

# UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

LITOFAZIES, MICROFAZIES Y BIOFAZIES DEL  
CÁMBRICO DEL ÁREA EL SAHuaral, SONORA  
CENTRAL: CONSIDERACIONES  
PALEOECOLÓGICAS Y PALEOGEOGRÁFICAS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS – GEOLOGÍA

PRESENTA:

GEÓL. HÉCTOR ARTURO NORIEGA RUIZ



HERMOSILLO, SONORA, 17 DE JUNIO DE 2019

**“Todo lo que hagas en la vida será insignificante, pero es muy importante que lo hagas porque nadie más lo hará...”**

Mahatma Gandhi

Dedicado a mis padres, Héctor Noriega y Claudia Ruiz, con infinito cariño y amor. Gracias por ayudarme a cumplir mis sueños, por darme todo en esta vida y estar presentes en cada etapa. Le doy gracias a Dios por tenerlos conmigo. Conocerlos mi suerte y amarlos un placer.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, en especial al Departamento de Geología por brindarme la oportunidad de formar parte del programa de Maestría en Ciencias-Geología. Al CONACYT por la beca otorgada para estos estudios. Agradezco al proyecto de CONACYT No. 235970 “*La Revolución del Cámbrico y la Gran Radiación del Ordovícico en el Norte de México y Oaxaca*”, bajo la responsabilidad del Dr. Juan José Palafox Reyes de la UNISON, así como al proyecto UNISON No. USO315003632: “*Bioestratigrafía y Paleoecología de los depósitos del Paleozoico de Sonora central, México*”; bajo la responsabilidad de la M.C. Alejandra Montijo González y Dr. Francisco Javier Cuen Romero. También se agradece al proyecto UNISON No. USO315003632. PRODEP: “*Paleoecología de los ecosistemas marinos del Cámbrico de Sonora, México: Bioestratigrafía, Paleobiogeografía y su relación con el cráton de Norteamérica*”; bajo la responsabilidad del Dr. Francisco Javier Cuen Romero.

Mi formación profesional no sería posible sin el apoyo incodicional de mi maestro y amigo el Dr. Francisco Javier Cuen Romero, a quien considero como un padre. Agradezco infinitamente todo su esfuerzo, paciencia, motivación y consejos en todo momento, por haber confiado en mi persona y creer en mi. Siempre será mi inspiración y ejemplo a seguir.

Mis más sinceros agradacimientos a mi maestra M.C. Alejandra Montijo González por su invaluable dedicación, apoyo y confianza en mí. Gracias por cuidarme y aconsejarme a lo largo de mi formación. Al Dr. Rogelio Monreal Saavedra por su ayuda trascendental, su tiempo y sus consejos en todo el proceso de elaboración de tesis. A la Dra. Blanca Estela Buitrón Sánchez por confiar en mi y su inagotable conocimiento, gracias por ser parte de mi inspiración en la paleontología.

Al Dr. Jesús Roberto Vidal Solano por todo su tiempo, consejos, recomendaciones y ayuda para los que formamos parte del programa de maestría. Una excelente coordinación.

Al M.C. Alfredo Ochoa por su apoyo, amistad e interés a lo largo de mi formación profesional. A Griselda Minjárez y a Grissita por su interés en que salga adelante.

I'm extremely grateful to Ph.D. Frederick Sundberg for your help, patience and knowledge. Thank you for being an exceptional person and part of my inspiration. The discoveries in the present work would not have been possible without your support.

Al Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega por su ayuda incondicional en todo momento, dedicación, paciencia y conocimientos para que pudiera culminar con mis estudios.

Al Dr. Guadalupe Espinoza Maldonado por su conocimiento, impulso e interés a lo largo de mi estancia en la Universidad.

Al M.C. Ismael Minjarez Sosa por sus comentarios e interés a lo largo de mi formación.

Al Dr. José Eduardo Valdez Holguín por todo el apoyo y entusiasmo para que pudiera realizar mis metas. Gracias por creer en mí.

A mi padrino Jesús Antonio Esquer por su orientación y sabios consejos en todo momento. Gracias por estar siempre en cada paso que doy.

Quiero agradecer a los maestros Dr. Juan José Palafox Reyes, M.C. Margarita de la O, Dr. Paz, Dra. Silvia Martínez, Dr. Kinardo Flores, por ayudarme, aconsejarme y guiarme en todo mi trayecto por la universidad.

A mis grandes amigos y personas que se han vuelto especiales en mi vida, gracias por formar parte de cada etapa. A Héctor Moreno, David Vega, Victor Vidaña, Jocelyn Galindo, René Armenta, Fernando Lucero, Manuel Alcantar, Yuliana Paredes, Alondra Moreno y Juan Hernandez, gracias por apoyarme con el trabajo de campo y detalles en la redacción.

## ÍNDICE

1. Resumen .....	12
2. Introducción .....	14
3. Objetivos.....	18
3.1. Objetivo general.....	18
3.2. Objetivos específicos.....	18
4. Antecedentes y trabajos previos.....	18
5. Generalidades.....	26
5.1. Ubicación del área de estudio .....	26
5.2. Clima .....	27
5.3. Fisiografía.....	27
6. Metodología.....	29
6.1. Trabajo de campo.....	29
6.2. Trabajo de laboratorio y gabinete .....	30
7. Marco geológico regional.....	31
8. Estratigrafía del Cerro El Sahuaral .....	34
8.1. Paleozoico – Cámbrico.....	34
8.1.1. Formación Proveedora .....	34
8.1.2. Formación Buelna.....	35
8.1.3. Formación Cerro Prieto .....	37
8.1.4. Formación El Gavilán .....	39
8.1.5. Formación El Tren.....	41
8.2. Cenozoico – Paleogéno .....	42

8.2.1. Oligoceno .....	42
8.3. Cenozoico - Cuaternario .....	42
9. Petrografía.....	45
10. Análisis de litofacies, microfacies y biofacies .....	50
10.1. Introducción .....	50
10.2. Litofacies.....	55
10.3. Microfacies.....	56
10.3.1. Formación Buelna.....	56
10.3.2. Formación Cerro Prieto .....	61
10.4. Interpretación de microfacies.....	64
10.5. Biofacies .....	65
11. Paleoicnología Sistemática.....	68
12. Paleontología Sistemática .....	72
13. Consideraciones paleogeográficas .....	95
14. Consideraciones paleocológicas .....	96
15. Discusión .....	115
16. Conclusión.....	118
17. Referencias citadas.....	120
18. Láminas.....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación del área de estudio y localidades cercanas, así como las vías de acceso.....	26
<b>Figura 2.</b> Tipos de clima de la región central de Sonora (García & CONABIO, 2008).....	27
<b>Figura 3.</b> Fisiografía de la región, representada por la Provincia Sierras y Llanuras Sonorenses (CONABIO, 1990). .....	28
<b>Figura 4.</b> Mapa geológico del área de estudio. Al centro el Cerro El Sahuaral, donde afloran los depósitos del Cámbrico inferior-medio estudiados en este trabajo. ....	43
<b>Figura 5.</b> Columna estratigráfica del Cámbrico del área del Sahuaral mostrando la distribución de la biota. ....	44
<b>Figura 6.</b> A) Cuarzo monocristalino, cementante sintaxial de sílice y pelicular de óxidos de fierro NC. B) Arenisca tomada con LN donde se observa minerales opacos pirita. Tomada con objetivo 4x. ....	45
<b>Figura 7.</b> Caliza con fragmentos de trilobites y aportes terrígenos en una matriz de microesparita (cuarzo). Dunham: wackestone. Folk: biomicrita. A) Muestra S-01. B) Muestra S-08. Objetivo: 4X. NC.....	46
<b>Figura 8.</b> Caliza con fragmentos de hiolítidos en una matriz micrítica. Se observa aporte de terrígenos. Dunham: wackestone. Folk: biomicrita. a) LN y b) NC. Muestra S-09. Objetivo: 4X.....	47
<b>Figura 9.</b> Caliza con fragmentos de trilobites en una matriz de micrita con presencia de óxidos de fierro. Dunham: packstone. Folk: biomicrita. a) LN y b) NC. Muestra S-06. Tomada con objetivo 4x. ....	48
<b>Figura 10.</b> Mudstone a) LN y b) NC. Objetivo: 4X.....	48
<b>Figura 11.</b> Oolitas micritizadas y superficiales e intraclastos en una matriz de micrita. Dunham: packstone. Folk: oomicrita. a) LN y b) NC. Muestra CP-3. Objetivo: 4X.....	49
<b>Figura 12.</b> Oolitas superficiales llenas de esparita y óxidos en una matriz de esparita; ocasionalmente presentan fragmentos de trilobites dentro de las oolias. Dunham: grainstone. Folk: ooesparita. a) luz natural y b) luz polarizada. Muestra CP-5. Objetivo: 4X.....	50

<b>Figura 13.</b> Microfacies Estándares (SMF) de Wilson (1975).....	52
<b>Figura 14.</b> Modelo propuesto por Flügel (2004) para los tipos de microfacies de rampa RMF. ....	52
<b>Figura 15.</b> A. Cuarzoarenita con abundantes icnofósil ( <i>Skolithos</i> isp), B. Cuarzoarenita con icnofósil ( <i>Monocraterion</i> isp).....	55
<b>Figura 16.</b> A. Caliza arenosa con cortes de equinodermos, aporte terrígeno y estilolitas en una matriz de micrita, luz polarizada. B. Fragmento de hiolitido reecristalizado en una matriz de micrita, luz polarizada. Muestra S-01. Objetivo: 4x.....	57
<b>Figura 17.</b> A. Caliza arenosa con fragmentos de equinodermos, trilobites, estilolitas y aporte terrígeno, en una matriz de micrita, luz natural. B. Caliza arenosa con intraclasto con trilobites, equinodermos, estilolitas y aporte terrígeno y en una matriz de micrita, luz polarizada. Muestra S-01. Objetivo: 4x.....	57
<b>Figura 18.</b> A. Floatstone con oncoideos, donde se observa oxidación en los bordes de las partes centrales y externas. B. Fragmento de la parte central de un oncolito donde se observa oxidación en los bordes externos y recristalización en la parte central, en una matriz de micrita, luz natural. C. La misma imagen pero con luz polarizada, Muestra S-04. Objetivo: 4x.....	58
<b>Figura 19.</b> A. Packstone con fragmentos de trilobites recristalizados y llenos de micrita y hiolítidos en una matriz de micrita. B. Wakestone con fragmento de hiolítidos oxidados y aporte terrígeno, en una matriz de micrita. C. Packstone con <i>Salterella</i> recristalizada y oxidada, en una matriz de micrita, Muestra S-06. Objetivo: 4x. LP.....	59
<b>Figura 20.</b> A. Packstone con oolitas normales y superficiales recristalizados en una matriz de micrita. B. Packstone con oolitas superficiales, fragmentos de trilobites y estilolitas en una matriz de micrita. Objetivo 4x. LP.....	61
<b>Figura 21.</b> A. Grainstone con oolitas superficiales y micritizadas, estilolitas en un cemento de esparita. B. Grainstone con oolitas micritizadas, fragmento de equinodermos en un cemento de esparita. Muestra CP-4. Objetivo: 4x. LP.....	62
<b>Figura 22.</b> Columna estratigráfica del Cámbrico del área del Sahuaral mostrando la distribución de las muestras con sus respectivas microfacies.....	64

<b>Figura 23.</b> Localización de las facies utilizando los modelos de Flügel y Wilson (2004).....	65
<b>Figura 24.</b> Biofacies 1: A) <i>Lingulella proveedorensis</i> . B) <i>Chancelloria eros</i> . C) Chancelóridos y braquiópodos linguliformes.....	67
<b>Figura 25.</b> Biofacies 2: A) <i>Pagetia</i> sp. B) <i>Tonkinella valida</i> (izquierda) y <i>Quadragnostus depressa</i> (centro). C) <i>Haplophrentis reesei</i> (derecha).....	67
<b>Figura 26.</b> Biofacies 3: A) <i>Tonkinella flabelliformis</i> (Centro) y <i>Quadragnostus depressa</i> (Derecha). B) <i>Ptychoparella (Elrathina) antiqua</i> . C) <i>Oryctocephalus reynoldsi</i> .....	68
<b>Figura 27.</b> <i>Monocraterion</i> isp .....	70
<b>Figura 28.</b> <i>Skolithos</i> isp. Escala=2 cm.....	71
<b>Figura 29.</b> <i>Girvanella</i> sp. Escala=2 mm.....	73
<b>Figura 30.</b> Escleritos de <i>Chancelloria eros</i> . Escala=2 mm. ....	75
<b>Figura 31.</b> <i>Lingulella proveedorensis</i> . Escala=2 mm. ....	77
<b>Figura 32.</b> <i>Linnasornia ophirensis</i> . Escala=2 mm. ....	78
<b>Figura 33.</b> <i>Acrothele</i> sp. Escala=2 mm.....	79
<b>Figura 34.</b> <i>Dictyonina minutipuncta</i> . Escala=2 mm.....	81
<b>Figura 35.</b> <i>Dictyonina ornatella</i> . Escala 2 mm.....	82
<b>Figura 36.</b> <i>Hyolithes sonora</i> . Escala=2 mm.....	84
<b>Figura 37.</b> <i>Haplophrentis reesei</i> . Escala=2 mm. ....	85
<b>Figura 38.</b> <i>Quadragnostus depressa</i> (centro), <i>Tonkinella valida</i> (izquieda) y <i>Ptychoparella (Elrathina) antiqua</i> (derecha). Escala=2 mm.....	87
<b>Figura 39.</b> <i>Pagetia</i> sp. Escala=1 mm.....	89
<b>Figura 40.</b> <i>Oryctocephalus reynoldsi</i> . Escala=1 mm.....	91
<b>Figura 41.</b> <i>Tonkinella flabelliformis</i> . Escala=5 mm. ....	92
<b>Figura 42.</b> <i>Tonkinella valida</i> . Escala=2 mm. ....	93
<b>Figura 43.</b> <i>Ptychoparella (Elrathina) antiqua</i> . Escala=5 mm.....	95
<b>Figura 44.</b> Diagrama rango-abundancia de las especies distribuidas en las formaciones del área El Sahuaral. El rango de abundancia oscila desde el más abundante hasta el menos abundante (eje x), mientras que la abundancia relativa está expresada en un eje log10. Como se observa, la	

Formación El Gavilán posee una mayor riqueza de especies (longitud de la curva) y equitatividad (gradiente de la curva) que el resto de las comunidades. ....	99
<b>Figura 45.</b> Curva de rarificación de la Fm. Proveedora donde se muestran individuos vs taxa por estación (A-E). ....	102
<b>Figura 46.</b> Curva de rarificación de la Fm. Buelna donde se muestran individuos vs taxa por estación (A-E). ....	106
<b>Figura 47.</b> Curva de rarificación de la Fm. El Gavilán donde se muestran individuos vs taxa por estación (A-E). ....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Microfacies SMF propuestas por Wilson (1975).....	53
<b>Tabla 2.</b> Microfacies tipo RMF para una rampa homoclinal tomada de Flügel (2004).....	54
<b>Tabla 3.</b> Microfacies Fm. Buelna. Simbología: A Abundantes, F Frecuentes, S Escasos, R Raros, T Trazas. ....	60
<b>Tabla 4.</b> Microfacies Fm. Cerro Prieto. Simbología: A Abundantes, F Frecuentes, S Escasos, R Raros, T Trazas. ....	63
<b>Tabla 5.</b> Distribución de especies por formación. A= Abundancia, AR= Abundancia relativa.	98
<b>Tabla 6.</b> Distribución de especies por estrato en la Formación Proveedora. ....	100
<b>Tabla 7.</b> Datos utilizados para la elaboración de la curva de rarificación para la Formación Proveedora. ....	102
<b>Tabla 8.</b> Distribución de especies por estrato en la Formación Buelna. ....	103
<b>Tabla 9.</b> Datos utilizados para la elaboración de la curva de rarificación para la Formación Buelna.....	105
<b>Tabla 10.</b> Distribución de especies por estrato en la Formación Cerro Prieto. ....	107
<b>Tabla 11.</b> Distribución de especies por estrato en la Formación El Gavilán. ....	109
<b>Tabla 12.</b> Datos utilizados para la elaboración de la curva de rarificación para la Formación El Gávilan. ....	112

## 1. RESUMEN

El estudio del Cámbrico sedimentario en México se ha incrementado en la última década, particularmente en el estado de Sonora. Desde mediados del siglo pasado, la presencia de rocas cámbrijicas en Sonora han sido objeto de numerosos estudios estratigráficos, paleontológicos y recientemente paleoecológicos (Cooper *et al.*, 1952; González-León, 1986, Almazán-Vázquez, 1989, Cuen *et al.*, 2019).

Las rocas del área del Sahuaral han sido brevemente estudiadas por algunos autores y se ha destacado por ser una nueva localidad del Cámbrico en México, siendo documentadas las formaciones litoestratigráficas Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán establecidas por Cuen *et al.* (2016) en el área de El Chihuarruita, San José de Gracia y estableciendo una estrecha correlación con la estratigrafía propuesta por Cooper *et al.* (1952) para la región de Caborca. Sin embargo, en el área del Sahuaral no se han realizado trabajos sistemáticos y a detalle para sugerir ambientes de depósito, así como definir los gremios que existieron durante la deposición.

En el presente trabajo se reconoce por primera vez la Formación El Tren en el área El Sahuaral, así como la presencia de las especies *Lingulella proveedorensis*, *Hyolithes sonora*, *Haplophrentis reesei*, *Tomagnostus* sp., *Oryctocephalus reynoldsi* y *Tonkinella flabelliformis*. Se realizó una colecta de material paleontológico, así como un análisis petrográfico y de microfacies, con base a 19 secciones delgadas, para determinar litofacies, microfacies y biofacies en el área, estableciendo una litofacies perteneciente a la Formación Proveedora, tres microfacies para la Formación Buelna; dos microfacies para la Formación Cerro Prieto y tres biofacies para la Formación El Gavilán. Con base a la información obtenida, las litofacies L1 para la Formación Proveedora indican un ambiente marino somero en condiciones de intermareal a submareal, relacionado con la icnofacies de *Skolithos*. Las microfacies establecidas MF1, MF2 y MF3 para la Formación Buelna y, MF4 y MF5 para la Formación Cerro Prieto denotan una plataforma carbonatada donde se presentaron transiciones desde un ambiente

lagunar de circulación, una plataforma restringida, a un ambiente de borde de plataforma donde hay buena circulación de agua lo que indica que su depósito se efectuó en un ambiente de alta energía. Las asociaciones faunísticas en la Formación El Gavilán permiten reconocer tres principales biofacies: Biofacies 1: se encuentra en la parte inferior de la secuencia, caracterizándose por la ausencia de trilobites. Biofacies 2: *Ptychagnostidae - Tomagnostus* se caracteriza por la presencia de diversos géneros de trilobites miómeros asociados. Biofacies 3: *Corynexochina - Tonkinella, Oryctocephalus* donde predominan trilobites de la familia Oryctocephalidae. De acuerdo con lo descrito respecto a las características litológicas y paleontológicas se establece que fueron depositadas en una plataforma externa transicionando a un ambiente más profundo, hacia la zona de talud. La presencia y abundancia de agnóstidos para los depósitos del Sahuaral, indica una estrecha relación biogeográfica con Laurentia y denota facies de plataforma abierta debido a que la presencia de agnóstidos no ha sido documentada en la plataforma interior.

Se realizó un primer estudio paleoecológico del Cámbrico en el área del Sahuaral, indicando riqueza y abundancia de especies dentro de las comunidades lo que sugiere características para el ambiente de depósito. La Formación Proveedora se caracteriza por la presencia de organismos bentónicos-filtradores que habitaban en línea de costa y mares someros. La Formación Buelna corresponde a un ambiente marino somero de condiciones arrecifales dominado por productores primarios-epifaunales. La Formación Cerro Prieto fue dominada por consumidores primarios-epifaunales y suspensívoros dentro de ambientes someros y saturados de alta energía. La Formación El Gavilán presentó varios grupos funcionales, dentro de los que destacan organismos suspensívoros y nectónicos de ambientes profundos de baja energía.

## 2. INTRODUCCIÓN

En México, las localidades pertenecientes al Paleozoico inferior sedimentario se encuentran escasas y de poca extensión y funcionan como secciones complementarias debido a que no se ha identificado una secuencia completa (Álvarez, 1949). El Cámbrico ha sido reportado en Sonora desde mediados del siglo pasado (Lochman, 1948; Álvarez, 1949; Cooper *et al.*, 1952). El Ordovícico se ha reconocido en el noroeste de Oaxaca (Robison & Pantoja-Alor, 1968), al este de Chihuahua (Barboza-Gudiño *et al.*, 2016) y al centro-oeste de Sonora (Almazán, 1989; Almazán-Vázquez *et al.*, 2006). El Silúrico está pobemente representado en el territorio mexicano, siendo reportado al noreste de Chihuahua (Sheeman, 1975) y en la región central de Sonora (Poole *et al.*, 1997; Stewart & Poole, 2002). Con base en lo anterior, el estado de Sonora presenta la mayor parte de los afloramientos del Paleozoico inferior en México, los cuales son característicos por contener abundante biota fósil, proporcionando información paleogeográfica y paleoecológica.

Las rocas del Proterozoico y Paleozoico afloran extensamente en todo el estado de Sonora y denotan que esta región formó parte del cráton de Norteamérica (Almazán *et al.*, 2006; Buitrón-Sánchez, 2016). A mediados del siglo pasado se iniciaron las investigaciones del Paleozoico inferior de Sonora con el reconocimiento de rocas del Cámbrico-Ordovícico en la región de Cobachi (King, 1939), y posteriormente se realizaron estudios en la región de Caborca (Cooper *et al.*, 1952), Arivechi (Almazán, 1989) y Sonora central (Vega-Granillo & Araux, 1987; Poole *et al.*, 1997; Cuen *et al.*, 2016). Estos estudios fueron afinando detalles estratigráficos y aspectos estructurales con énfasis en el contenido faunístico.

En la región de Sonora central, las rocas paleozoicas presentan dos facies sedimentarias, una calcárea de plataforma y la otra siliciclástica de cuenca (Stewart *et al.*, 1984). La primera corresponde a una secuencia constituida por caliza y arenisca de plataforma depositada en un ambiente somero con abundante fauna que indica edades del Cámbrico al Pérmico; y es considerada como continuidad de la secuencia sedimentaria precámbrica y del antiguamente denominado Miogeoclinal Cordillerano (Stewart *et al.*, 1984; Radelli, 1987). La segunda está

constituida generalmente por capas detríticas y carbonatadas de grano fino del Pensilvánico, que denota ambiente de cuenca (Howell *et al.*, 1987; Radelli *et al.*, 1987; Jones, 1990; Miller *et al.*, 1992).

El Período Cámbrico se caracteriza por la primera y repentina aparición de organismos con una anatomía más compleja con respecto a la fauna Ediacara, invertebrados marinos similares a los que se conocen actualmente, evento al que se le llama como Explosión Vida Cámbrica (Miller, 2014). Estos organismos complejos poseían esqueletos mineralizados, lo que permitió que se preservaran como fósiles debido a que poseían partes duras que resisten a los procesos diagenéticos (McAlester, 1973). La mayoría de los phyla que se conocen actualmente (32 de los 36) experimentaron una primera y significativa radiación evolutiva y adaptativa durante este período, dominando los mares los primeros grupos de poríferos, braquiópodos, moluscos, artrópodos y equinodermos (Zhang & Shu, 2013; Cuen *et al.*, 2017).

Antiguamente se consideraba que el Cámbrico en México únicamente afloraba en los estados de Chihuahua y Sonora. No obstante, estudios recientes sobre la estratigrafía y estructura de la Sierra Plomosa en Chihuahua sugieren que la unidad más antigua, la Formación Sóstenes, pertenece a una edad del Ordovícico, posiblemente Inferior hasta Superior, con base en la fauna predominante de gasterópodos, braquiópodos y conodontes (Barboza-Gudiño *et al.*, 2016). Asimismo, se ha reportado el límite del Cámbrico-Ordovícico en la Formación Tiñú de la región Nochixtlán, Oaxaca (Robison & Pantoja, 1968); sin embargo, los estudios demuestran trilobites y asociación faunística perteneciente a una edad del Tremadociano, por lo tanto y actualmente, el Cámbrico sedimentario en México se encuentra únicamente en el estado de Sonora aunque es necesario que se prosigan con las investigaciones para conocer la existencia de otros depósitos del Cámbrico en otras entidades de México.

En Sonora, las secuencias cámbricas se encuentran en diferentes localidades de manera esporádica y aislada, aunque con una abundante biota fósil reconocida por el buen estado de conservación (Buitrón, 1992; Cuen, 2012). Los estudios realizados desde mediados del siglo

pasado en el área de Caborca permitieron descubrir el Cámbrico por primera vez en México (Cooper & Arellano, 1946; Lochman, 1948; Álvarez, 1949; Cooper *et al.*, 1952; 1956).

Los artrópodos primitivos estuvieron representados en su mayoría por los trilobites y se estima que representan el 60% de los fósiles del Cámbrico, junto con braquiópodos (30%), poríferos, moluscos y equinodermos, así como otros grupos con una afinidad controversial e incierta como arqueociatos, hiolítidos y coeloescleritoforos (Cuen & Radelli, 2007). Los trilobites aparecieron hace unos 524 Ma, por lo que la base del Cámbrico (Fortuniano-Piso-2) es considerada como de una sucesión pre-trilobítica caracterizada por una gran abundancia de fósiles trazas, específicamente la presencia de *Trichophytes pedum*, el cual es utilizado para establecer el límite del Proterozoico-Cámbrico (Webster, 2011; Peng *et al.* in Gradstein *et al.*, 2012; Babcock *et al.* 2017). Con base en lo anterior, la columna bioestratigráfica para el Cámbrico está basada en alcances estratigráficos de trilobites, siendo una herramienta valiosa para reconstruir la paleogeografía y paleoecología durante el Cámbrico (Lochman & Wilson, 1958), sin embargo, es posible que la correlación a nivel global sea problemática debido al marcado provincialismo y la presencia de faunas endémicas de trilobites polímeros (Shergold, 1997; Webster, 2011; Peng *et al.*, 2012).

Las faunas de trilobites en el noroeste de México han sido divididas en cuatro regiones de acuerdo con su posición geográfica: Región Noroeste (Caborca), Región Norte (Cananea), Región Central (San José de Gracia y Mazatlán) y Región Este (Arivechi) (Cuen *et al.*, 2018). Dentro de la distribución de estas faunas se han documentado la presencia de 86 especies distribuidas en 61 géneros para el Cámbrico, teniendo como fauna asociada esponjas silíceas, arqueociatos, braquiópodos y equinodermos en las áreas de Caborca, Cananea, Mazatlán, Arivechi y San José de Gracia (Almazán-Vázquez, 1989; Cuen *et al.*, 2009; Cuen, 2012; Cuen *et al.*, 2016). Se ha documentado en el área de San José de Gracia, particularmente en el Cerro El Chihuarruita, la presencia de las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán, mismas que afloran en Caborca, así como también una gran abundancia fósil perteneciente al Cámbrico inferior y Cámbrico medio (Cirett y Aguilar, 1990; Almazán, 2002; Stewart *et al.*,

2002; Buitrón *et al.*, 2002; Nardin *et al.*, 2009; Buitrón *et al.*, 2011; Cuen, 2012; Cuen *et al.*, 2013; Danzós, 2014; Cuen *et al.*, 2019).

El presente trabajo se enfoca en realizar un estudio de litofacies, microfacies y biofacies en el área El Sahuaral, San José de Gracia, el cual ha sido estudiado por diversos autores (Stewart *et al.*, 2002; Barth, 2002; Ochoa, 2014; Encinas-Miranda, 2016; Danzós, 2018), describiendo la estratigrafía de las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto, El Gavilán, y el Tren, y el contenido fosilífero representado por icnofósiles, algas oncolíticas, poríferos, chancelóridos, braquiópodos, moluscos, trilobites y equinodermos, por tal motivo, es posible realizar estudios paleoecológicos de los ecosistemas marinos del Cámbrico por primera vez en esta localidad.

Con base en lo anterior, la motivación del presente trabajo consta de tres aspectos fundamentales:

1. Realizar estudios de estratigrafía, paleontología y sedimentología en el área El Sahuaral para entender contrastes litológicos y paleontológicos entre otras secuencias cámbrijicas en el estado. Lo anterior conlleva a realizar un análisis de litofacies, microfacies y biofacies de las muestras para determinar su ambiente de depósito. Las microfacies para la Formación Buelna y Cerro Prieto se analizarán con el modelo propuesto por Wilson (1975) y Flügel (2004) para rocas carbonatadas.
2. Caracterizar los ecosistemas del Cámbrico con el contenido fósil identificado.
3. Realizar una comparación de los paleoambientes y la paleoecología del área El Sahuaral con la secuencia del Cerro El Chihuarruita en San José de Gracia, Sierra de Mazatán en Mazatán, la secuencia en Arivechi, Sierra El Tule en Cananea y las unidades en Caborca, así como otras secuencias reconocidas en Norteamérica.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

El principal objetivo del presente trabajo es realizar un análisis de litofacies, microfacies y biofacies del Cámbrico del área El Sahuaral, Sonora central. Lo anterior se llevará a cabo mediante bioestratigrafía con base en trilobites del Cámbrico.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer y describir detalladamente las relaciones estratigráficas existentes entre las rocas del Cámbrico del área El Sahuaral, y compararlas con las secuencias expuestas en San José de Gracia, Arivechi, Cananea y Caborca, Sonora.
- Realizar un análisis bioestratigráfico, así como la implementación de las seis nuevas biozonas propuestas para el Cámbrico (Webster, 2011) en los afloramientos del área El Sahuaral, de esta manera ajustarse a los cambios en la escala de tiempo geológico para este período.
- Proponer las características paleoecológicas y paleogeográficas de los depósitos de El Sahuaral durante el Cámbrico y su relación al Cratón Norteamericano (Laurentia).

### **4. ANTECEDENTES Y TRABAJOS PREVIOS**

Aunque las rocas cámbricas se encuentran de forma esporádica y aislada, existe información relevante y detallada. El estudio de las rocas cámbricas en Sonora ha progresado de manera acelerada en años recientes (Cuen *et al.*, 2013; Buitrón *et al.*, 2016, 2017; Beresi *et al.*, 2019; Cuen *et al.*, 2019), siendo un tema de investigación importante debido a la presencia y buena preservación de fósiles relevantes. A continuación, se citarán algunos trabajos destacados:

Gómez y Torres-Izábal (1941) realizaron una exploración en el norte de Sonora efectuado para Petróleos Mexicanos y se percataron de la existencia de rocas cámbricas en el Cerro Los Arrojos, en el área de Caborca, excepcionalmente bien expuestas, encontrando y

recolectando los primeros trilobites conocidos en México los cuales fueron identificados por Stoyanow (1942).

Cooper & Arellano (1946, 1956) y Cooper *et al.* (1952) publicaron diversos trabajos sobre la estratigrafía y el contenido biótico de la región de Caborca, dando a conocer las primeras descripciones de algas calcáreas, arqueociatos, braquiópodos, moluscos y trilobites, particularmente, la presencia de *Girvanella* y *Olenellus* en Sonora.

Lochman (1948), describe siete géneros y siete especies de trilobites del Cámbrico temprano y medio del área de Caborca, identificadas como *Sombrerella mexicana*, *Mexicaspis stenopyge*, *Mexicella mexicana*, *Proveedoria starquistae*, *Arellanella caborcana*, *Caborcella arrojensis* y *Kistocare corbini*. Actualmente *Amecephalus arrojensis* y *Mexicella mexicana* representan zonas bioestratigráficas del Cámbrico medio en Norteamérica (McCollum & Sundberg, 2007; Webster, 2011).

Cooper *et al.* (1952) continuaron con las investigaciones en Caborca, y realizan un estudio detallado de la estratigrafía y paleontología, estableciendo las siguientes unidades, en orden cronoestratigráfico para el Cámbrico inferior: las formaciones Puerto Blanco, Proveedor, Buelna y Cerro Prieto, ésta última de edad incierta. Para el Cámbrico medio se considera la Formación Arrojos y la Formación El Tren. Lochman *in Cooper et al.* (1952), identificó los trilobites, citando más de 20 especies nuevas. Los trilobites de la Formación Puerto Blanco están representados por *Olenellus* sp. y como nuevas especies propuestas por Lochman a *Lochmanolenellus primus* (syn. *Wanneria mexicana*, *Wanneria mexicana prima*, *Laudonia mexicana*). Cooper *et al.* identificaron fragmentos de olenélidos en la Formación Proveedor asignándolos a *Wanneria mexicana*. En la Formación Buelna se reconocieron los trilobites *Fritzolenellus truemani* Walcott (syn. *Olenellus fremonti*), *Antagmus buttsi* Resser, y nuevas especies por Lochman (1952), como son *Paedeumias puertoblancensis* (syn. *Olenellus puertoblancensis* Lieberman, 1998), *Wanneria walcottana buelnaensis*, *Bonnia sonora*, *Antagmus solitarius*, *Onchocephalus buelnaensis*, *Onchocephalus mexicanus*. La Formación Cerro Prieto no presentó trilobites, mientras que la Formación Arrojos está representada por una abundante

fauna de trilobites como *Alokistocare althea* Walcott, *Kistocare tontoensis* Resser, *Kootenia exilaxata* Deiss, *Athabaskia bela* Walcott, *Ptychoparia clusia* Walcott, *Zacanthoides holopygus* Resser, *Amecephalus arrojosenis* Lochman, y las nuevas especies identificadas por Lochman *Alokistocare modestum*, *Alokistocare mexicana*, *Kochaspis cooperi*, *Ptarmigania* (*Ptarmiganoides*) *bispinosa*, *Sonoraspis torresi*, *Sonoraspis gomezi* Stoyanow (syn. *Glossopleura* sp., *Glossopleura leona*), *Albertella proveedora*, *Albertella* aff. *A. proveedora*, *Mexicapsis difuntoensis*, *Arellanella sonora*, *Inglefieldia imperfecta*, *Pachyaspis deborra*, y *Pachyaspis isabella*, así como también las especies ya descritas por Lochman en 1948. Los trilobites de la Formación El Tren son representados por *Athabaskia minor* Resser, *Inglefieldia* sp. y *Parehmania* sp.

Fritz (1975) evaluó también la estratigrafía del área de Caborca con base en trilobites. Las formaciones Buelna y Cerro Prieto las asignó a la Zona *Bonnia-Olenellus* y determinó que la transición al Cámbrico medio ocurre cerca de la base de la Formación Arrojos.

Baldis y Bordonaro (1981) establecieron la vinculación entre el Cámbrico del noroeste de México y el Cámbrico de la Precordillera Argentina, siendo depósitos relacionados a Laurentia.

Stewart *et al.* (1984) realizaron un estudio estratigráfico de las rocas sedimentarias del Proterozoico Superior y Cámbrico de la región de Caborca, identificando catorce formaciones y considerando estas como parte del *Miogeoclinal Cordillerano* en el noroeste de México. Para la Formación La Ciénega se reconocieron faunas pre-trilobíticas y la ocurrencia de fósiles traza de trilobites como *Rusophycus*, infiriendo la Zona de pre-*Fallotaspis*. La Formación Puerto Blanco contiene abundantes trilobites que fueron identificados por Lochman (1948) y Palmer (1982), siendo asignados a las Zonas de *Bonnia-Olenellus*, *Nevadella* y *Fallotaspis*.

González-León (1986) describe una secuencia de rocas sedimentarias del Cámbrico medio y superior en el área de la Sierra del Tule, Cananea, constituida principalmente por arenisca, caliza, capas de lodolita, limolita y arenisca de grano muy fino. La biota está representada por algas calcáreas y los trilobites *Arapahoia* sp., *Cedaria* sp., *Coosella* sp., *Coosia* sp., *Llanoaspis* sp., *Tricrepicephalus* sp. del Cámbrico medio y superior (Dresbachiano).

McMenamin (1987) informó sobre trilobites en la Formación Puerto Blanco, Sonora, determinando las zonaciones y estableciendo correlaciones con la Formación La Ciénega, noroeste de Sonora. El mismo autor identifica la especie cf. *Fallotaspis* sp. y nuevas especies como *Nevadia ovalis* y ?*Avefallotaspis orbis* (syn. *Judomia orbis*) del Cámbrico inferior. Los trilobites que se discutieron fueron importantes para correlacionar la Formación Puerto Blanco con otras localidades de Norteamérica.

Rivera-Carranco (1988a, 1988b) determinó el conjunto de procesos sedimentarios que actuaron en las unidades cámbricas del área de Caborca, con el fin de establecer las condiciones paleoambientales de su depósito, señalando que la mayor parte de estas formaciones representa medios de aguas someras y tranquilas de carácter lagunar, además de existir depósitos de intermareal y submareal.

Cirett & Aguilar (1989) son los descubridores del Cámbrico del área de San José de Gracia, quienes estudiaron la estratigrafía de las rocas de la región, identificando para el Cámbrico a las formaciones Proveedora, Buelna y Cerro Prieto; estas unidades las incluyen dentro del grupo San José (informal).

Almazán (1989) describió y nombró informalmente cuatro formaciones en la región de Arivechi centro oriental del estado de Sonora: La Sata, El Mogollón, La Huerta y Milpillas. Para la Formación La Sata, identifica las especies de trilobites *Amecephalus* sp., ?*Fieldaspis* sp., indicando la base de Cámbrico medio y representando la Zona Pre-*Glossopleura*. La Formación El Mogollón presenta las especies *Bathyuriscus* sp., *Ptychagnostus atavus*, *Ptychagnostus michaelsi*, *Hypagnostus parvifrons*, *Hypagnostus parvifrons*, *Peronopsis fallax*, *Peronopsis* sp., *Olenoides* sp. cf. *O. marjumensis*, ?*Modocia typicalis*, *Modocia* sp., y ?*Utaspis* sp., infiriendo que las rocas pertenecen a la parte media del Cámbrico medio. En la Formación La Huerta se encontraron los trilobites marjumiidos y ptychopariidos indeterminados, representando la parte superior del Cámbrico medio aunque los taxa no demostraban una edad precisa, mientras que la Formación Milpillas está representada por las especies *Aphelotoxon* sp., *Elviniella* sp., *Homognostus* sp., *Pseudoagnostus* sp., ?*Pterocephalia* sp. y ptycopariidos indeterminados, infiriendo la Zona

*Dunderbergia* o *Elvinia*, situando a estas rocas en la parte media del Cámbrico superior. Así, a la secuencia continua le fue asignada una edad de Cámbrico medio-Ordovícico con base a la identificación de zonas faunísticas: *Poliella denticulata*, *Bolaspidella*, y *Elvinia* (Cuen *et al.*, 2018).

Vega-Granillo (1996) describe la geología y el análisis estructural de la Sierra Mazatán, Sonora central, donde se encuentra una secuencia de rocas sedimentarias principalmente carbonatadas con delgadas intercalaciones detríticas hacia la parte inferior. Esta unidad contiene ejemplares de *Tonkinella valida*, *Quadragnostus depressa* (syn. *Peronopsis fallax depressa*), *Tomagnostus* sp. y *Ptychoparella* sp. (syn. *Syspacephalus* sp.), asignando la Zona de *Ehmaniella*; sin embargo, años más tarde serían asignadas a la parte superior de dicha zona (Sundberg, 1994), específicamente a la Subzona de *Altiocculus* por la presencia de *Tonkinella valida*, indicando una edad Serie 3, Piso 5, para Laurentia Lincolniano, Topazano.

Stewart *et al.* (2002) describen numerosas áreas donde se presentan secuencias de rocas de la cobertura Neoproterozoica y Paleozoica en Sonora. En el estudio, las secuencias neoproterozoicas y cámbricas son divididas en cuatro principales asociaciones: 1) La secuencia Neoproterozoica ubicada al noroeste de Hermosillo, conformada por rocas de los grupos Las Víboras y El Aguila, es considerada como parte del supercontinente Rodinia. 2) El Grupo Las Bolas, ubicado al este de Sonora, contiene depósitos glaciares en la parte inferior de la secuencia correspondientes a la Glaciación Sturtiana. 3) En la porción norte y noreste, los estratos del Neoproterozoico y Cámbrico pertenecientes al miogeoclinal cordillerano fueron depositados a lo largo del margen continental recién formado de Laurentia, que se inició después de la fragmentación del supercontinente Rodinia. 4) Al sureste, la cubierta cratonal del Cámbrico medio y superior dentro del miogeoclinal cordillerano. Los autores consideraron que Sonora se encuentra una posición única en la reconstrucción del hipotético supercontinente de Rodinia, estimando que una posición cerca de Australia o la Antártida parece ser la más probable.

Cuen *et al.* (2009) continuaron con los estudios geológicos en el área de San José de Gracia con énfasis en la estratigrafía y paleontología, y se establece como secciones de referencia

del Cámbrico del área de Caborca, identificando las formaciones Proveedor, Buelna, Cerro Prieto y Arrojos. El autor recolectó ejemplares de icnofósiles, algas oncolíticas, agmatos, chancelóridos, poríferos, braquiópodos, moluscos, equinodermos y trilobites, obteniendo información acerca de la paleoecología del depósito. Cuen (2012) realiza una reevaluación del material anterior e identifica los trilobites *Bristolia* sp. cf. *B. bristolensis* y *Olenellus* sp. del Cámbrico inferior, y las asigna a la Zona de *Bristolia mohavensis-Bristolia insolens* de una edad Serie 2, Piso 4 para Laurentia, Waucobiano, Dyerano. Para el Cámbrico medio, *Pentagnostus (Meragnostus) bonnerensis* (syn. *Peronopsis bonnerensis*), *Peronopsis* sp., *Pagetia resseri* *Bathyuriscus* sp., *Ptychoparella (Elrathina) antiqua* (syn. *Elrathina antiqua*), *Ogygopsis typicalis*, *Oryctocephalus* sp., y *Oryctocephalites walcotti*, identificando la Zona *Mexicella mexicana*, Subzona de *Albertella highlandensis* con edad Serie 3, Piso 5 para Laurentia, Lincolniano, Delamarano tardío.

Nardin *et al.* (2009) dieron a conocer la existencia de *Gogia granulosa* Robison, 1965 y determinaron la edad Cámbrico inferior-medio de las rocas de San José de Gracia en la región central de Sonora. Los autores en una reevaluación del material fósil, propuesto por Buitrón (2004) realizan un estudio paleontológico y sistemático de *Gogia granulosa*; así como una descripción detallada de los miembros litológicos propuestos por otros autores anteriores.

Cuen *et al.* (2013) describe escleritos aislados de *Chancelloria eros* Walcott 1920, *Diagoniella* sp. y asociaciones de espículas hexactinélidas-estauractinas y hexactina-pentactinas para el Cámbrico medio de San José de Gracia. Dichos organismos están asociados con otros representativos de la biozona *Albertella*, además de braquiópodos inarticulados.

Cuen *et al.* (2016) realizaron estudios de gran relevancia de la estratigrafía del Cerro El Chihuarruita en la región de San José de Gracia, estableciendo una estrecha correlación con la estratigrafía propuesta por Cooper *et al.* (1952) para la región de Caborca situada al noroeste del estado. Describieron la estratigrafía del Cámbrico del área San José de Gracia, conformada por cuatro formaciones: Proveedor, Buelna, Cerro Prieto, y propusieron una nueva unidad estratigráfica formal llamada la Formación El Gavilán (Cuen *et al.*, 2016). Estos autores reportan por primera vez la presencia de *Amecephalus arrojosenensis* en la base de la Formación

Cerro Prieto, el cual es indicador del Cámbrico medio. La Formación El Gavilán contiene espículas de esponja, chancelóridos, braquiópodos inarticulados, hyolítidos, trilobites, entre otros.

Buitrón *et al.* (2017) reportan por primera vez, para el Cámbrico inferior y medio de México, hiolítidos de la especie *Haplophrentis reesei* Babcock y Robison, 1988, y para la región de San José de Gracia la especie *Hyolithes* cf. *H. sonora* Lochman, 1952. Con base en la biota cámbrica, que incluye a estos hiolítidos, se establece una estrecha correlación con los depósitos de Canadá, Estados Unidos, Groenlandia, Sudamérica, norte de Europa, Asia, y noreste de Australia.

Cuen *et al.* (2018) en un estudio detallado y combinado con aportes previos de otros autores estableció la bioestratigrafía y las zonas faunales basado en trilobites de los depósitos cámbicos en Sonora. Asimismo, en este estudio se implementa la nueva división cámbrica propuesta por la Subcomisión Internacional de la Estratigrafía del Cámbrico, siendo utilizada para asignar las posiciones cronoestratigráficas a los estratos cámbicos de Sonora. Las zonas bioestratigráficas se establecieron según Webster (2011) y Webster y Bohach (2014).

Particularmente, en el Cerro El Sahuaral, los estudios realizados han sido escasos y recientes. No obstante, los resultados obtenidos han sido relevantes para demostrar una gran afinidad con los depósitos del área de Caborca y el área El Chihuarrita en San José de Gracia.

Morales-Montaño & Cota-Reyna (1990) enfocaron sus estudios en nuevas localidades cámbicas en Sonora, realizando la primera recolecta de fósiles en el Cerro El Sahuaral. Palmer (1990) identificó las especies *Peronopsis* sp., *?Pagetia* sp., *Bathyuriscus* sp., *Oryctocephalus* sp., ptychopariidos indeterminados y dorypygido indeterminado, posiblemente *Kootenia*, y braquiópodos inarticulados indeterminados.

Ochoa (2014) en su tesis profesional de licenciatura menciona la presencia de las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y Arrojos, estableciendo además una correlación con las rocas del área de Caborca y Cerro El Chihuarruita.

Encinas-Miranda (2016) en su tesis profesional de licenciatura realizó la descripción sistemática de la fauna de trilobites presente en la Formación El Gavilán, identificando por primera vez en esta región de Sonora cinco especies de trilobites: *Quadragnostus depressa*, *Pagetia* sp., *Oryctocephalus* sp., *Elrathina antiqua* y *Tonkinella valida*, esta última indica la Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*, una edad estimada de 505 Ma.

Danzos-Acuña (2018) menciona una bioestratigrafía a detalle con base en trilobites, destacando la presencia de trilobites de la Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona *Ehmaniella*.

## 5. GENERALIDADES

### 5.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Cerro El Sahuaral está ubicado en la parte central de Sonora, entre las coordenadas UTM 536 637 m E y 3 246 595 m N, a 7 km al norte del poblado de José de Gracia, ubicado a 43 km al noreste de la ciudad de Hermosillo (Figura 1).

El acceso principal al área de estudio es por la carretera federal No. 15 y la carretera federal No. 21, en el tramo Hermosillo-Ures.

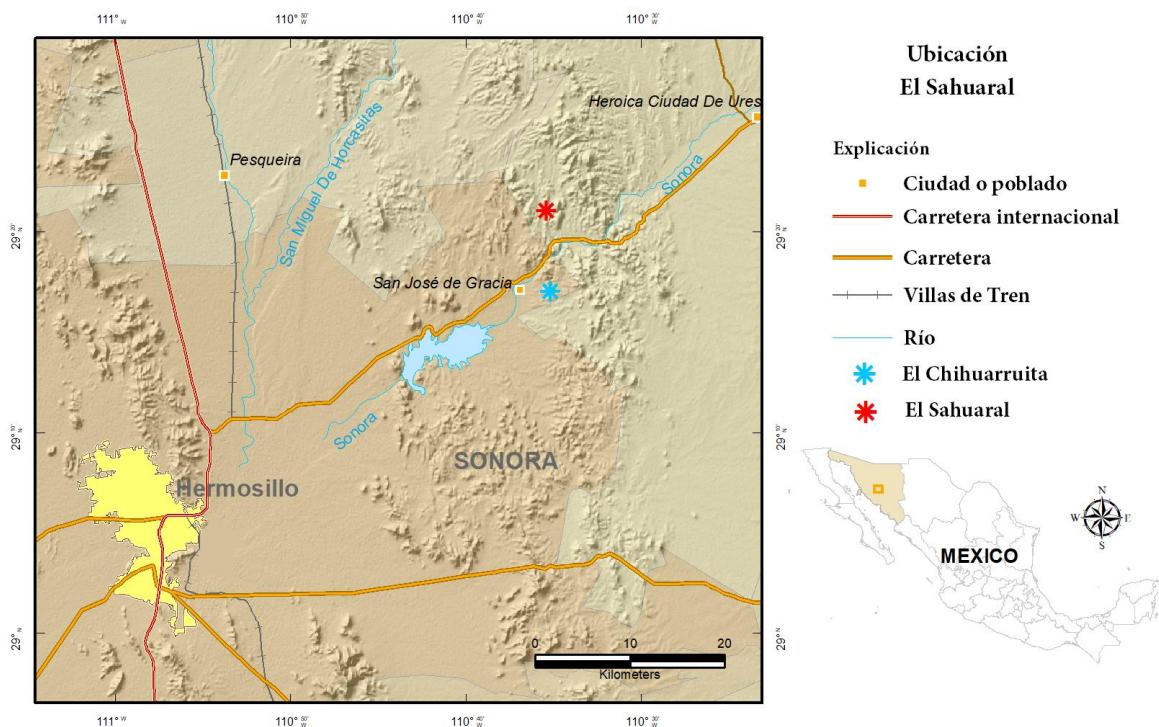


Figura 1. Ubicación del área de estudio y localidades cercanas, así como las vías de acceso.

## 5.2. CLIMA

Con base a la carta de climas de la República Mexicana (García & CONABIO, 1998) escala 1:1 000 000, el área de estudio comprende un tipo de clima BWh(x') y Bso (h')(x') que corresponde a muy árido, semicálido, con una temperatura media anual de entre 18 y 22°C, presentando lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual. (Figura 2).

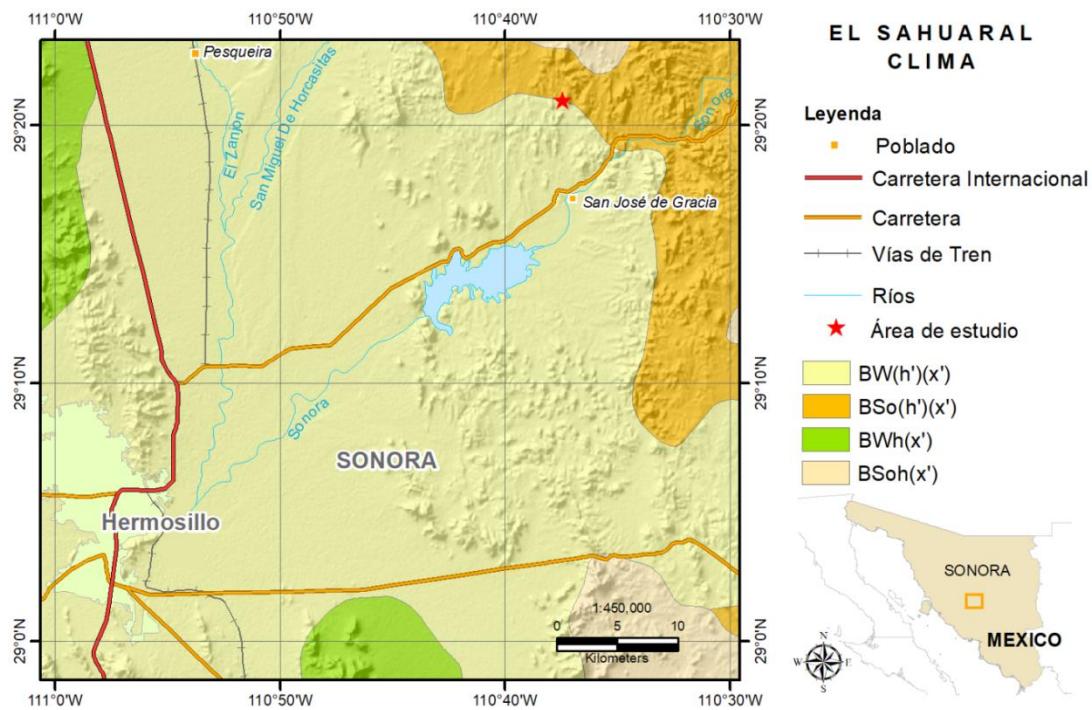
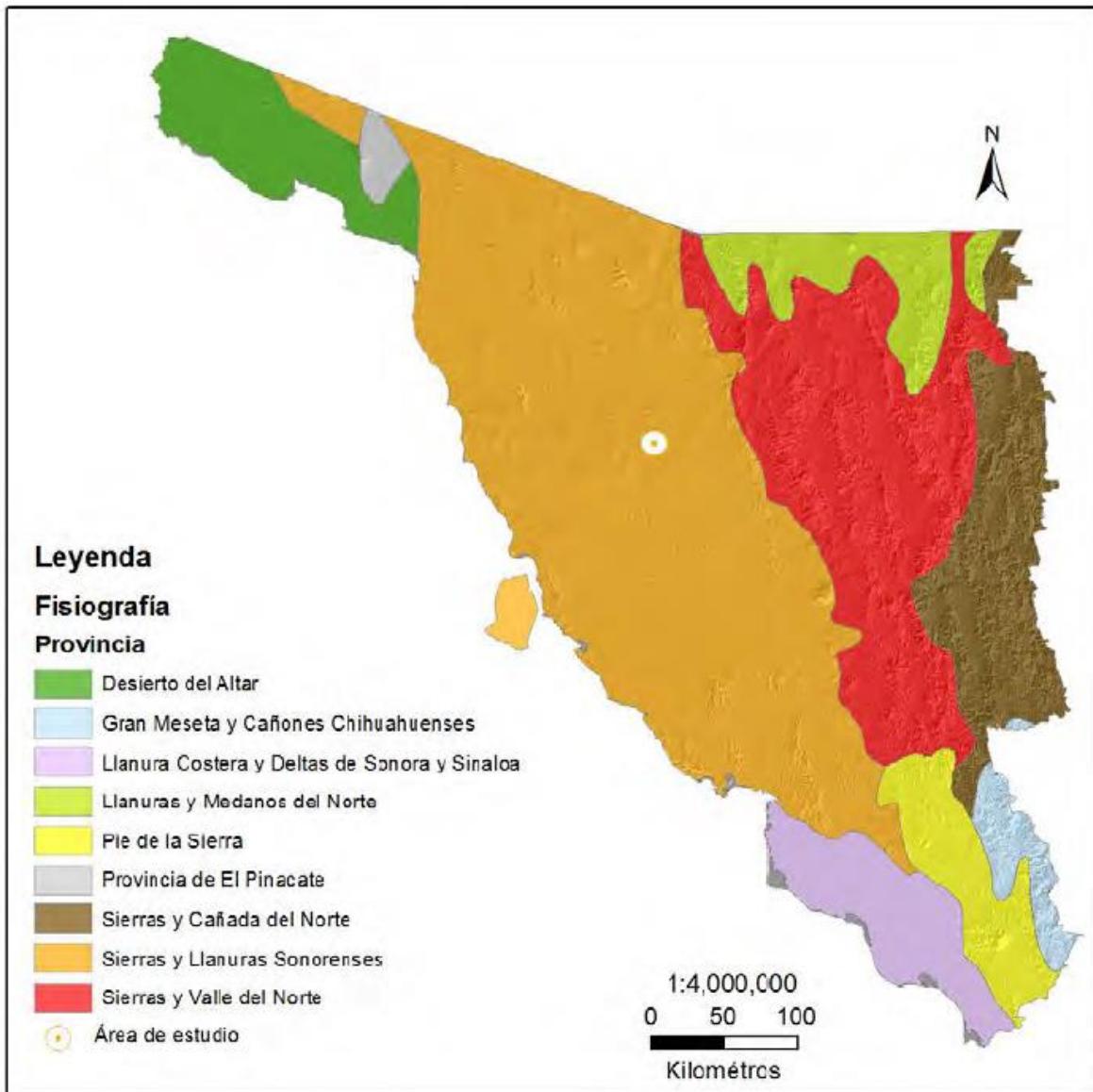


Figura 2. Tipos de clima de la región central de Sonora (García & CONABIO, 2008).

## 5.3. FISIOGRAFÍA

El estado de Sonora comprende cuatro principales provincias fisiográficas denominadas como provincia Sierra Madre Occidental, provincia Llanura Sonorense, provincia de Sierras y Llanuras del Norte y una pequeña porción al sur la provincia de la Llanura costera del Pacífico (INEGI, 2008). El área se ubica en la Provincia Sierras y Llanuras Sonorense (CONABIO, 1990). La provincia Sierras y Llanuras Sonorense es la más extensa y se prolonga hacia el norte

con el límite de los Estados Unidos de América y continúa a través del Desierto de Mojave y de Gila, caracterizándose por una disposición discontinua y paralela, de sierras aisladas y alargadas con rumbos preferenciales NW-SE. (Figura 3).



**Figura 3.** Fisiografía de la región, representada por la Provincia Sierras y Llanuras Sonorenses (CONABIO, 1990).

## **6. METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo el presente trabajo se recopiló información bibliográfica e investigaciones existentes por diversos investigadores e instituciones. Se consideró examinar a detalle aquellos trabajos con fines estratigráficos y paleontológicos pertenecientes al Cámbrico para identificar contenido similar en el área de interés. Para realizar la visita al área de estudio, El Sahuaral, fue conveniente determinar los accesos, recolectar muestras y material paleontológico de afloramientos y secuencias más completas.

Se obtuvieron imágenes de satélite en alta resolución del software Google Earth 7 °, se utilizó la carta topográfica de escala 1:50 000 de INEGI (2001) y la carta Geológico-Minera H12-D32 escala 1:50 000 del Servicio Geológico Mexicano (2002), así mismo, se determinó la posición geográfica del área de estudio con un GPS de mano Garmin GPSMAP serie 64 en datum WGS84.

### **6.1. TRABAJO DE CAMPO**

Se realizaron visitas al área de estudio, en el Cerro El Sahuaral, primeramente, con fines lógicos para determinar los accesos y seleccionar las secuencias mejor expuestas y completas, y así elaborar secciones estratigráficas continuas para no complicar el análisis estratigráfico; sin embargo, en el área de estudio se presentan pliegues y fallas normales, aunque no alteran los contactos continuos entre las formaciones.

Se realizó un perfil en sentido NE-SW y fue posible plasmar datos geológicos como unidades estratigráficas, contactos, litologías, rumbos y buzamientos. Se realizaron muestreos de forma sistemática de roca y material paleontológico durante el levantamiento de la sección, capturando por medio de GPS las coordenadas donde se tomaron las muestras, las cuales fueron señaladas con una clave, así como la orientación de las mismas con respecto a la base y cima del estrato. Se identificaron las unidades litológicas que afloran alrededor del Cerro El Sahuaral observadas de acuerdo con sus características físicas, las cuales incluyen: tipo de estratificación, tipo de contacto y espesores.

## 6.2. TRABAJO DE LABORATORIO Y GABINETE

El material paleontológico fue envuelto en papel periódico y colocado dentro de una bolsa de plástico marcada con la clave de estrato del cual se extrajo la muestra, para después en el laboratorio ser limpiadas mecánicamente con un cincel y martillo, y químicamente con ácidos y lavados.

Los fósiles fueron preparados utilizando agujas y pegamento a base de resina, y determinados mediante la diagnosis y descripciones propuestas en el *Treatise on Invertebrate Paleontology* de Moore (1959) con la finalidad de reconocer biozonas y realizar una correlación estratigráfica más precisa, obtener edades relativas y ambiente de depósito.

Para la elaboración de láminas, llevadas a cabo en el laboratorio de laminación del Departamento de Geología (Universidad de Sonora), se seleccionaron los mejores ejemplares de las muestras recolectadas pertenecientes a las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán para su estudio petrográfico y para el análisis de litofacies y microfacies. El análisis petrográfico de láminas delgadas se realizó en un microscopio petrográfico Leica EZ4 HD para determinar la litología y los microfósiles, y se recurrió a las clasificaciones para rocas detríticas propuestas por Petijhon (1973), y rocas carbonatadas propuestas por Folk (1972) y Dunham, utilizados para la clasificación composicional y textural respectivamente. Por medio del análisis petrográfico y litológico se determinaron los componentes y características texturales de las rocas por medio de 20 láminas delgadas, a su vez, obteniendo información mineralógica, diagénesis de la roca, bioestratigráfica y taxonómica, siendo útiles para la interpretación de ambientes de depósito y edades correspondientes. El conteo de los componentes aloquímicos en las rocas carbonatadas fue con base en la clasificación propuesta por Longoria y Montreal (1991) donde los términos a utilizaron son: traza (0-5 individuos), raro (6-10 individuos), escaso (11-16 individuos), frecuente (17-25 individuos) y abundante (más de 25 individuos).

## **7. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

El Servicio Geológico Mexicano (2002) en la carta Geológico-Minera (H12-D32) expone la cartografía del área de estudio y describe las rocas que afloran con edades del Paleozoico al Reciente. A continuación, se hace una breve descripción en orden cronológico de las unidades presentes en los alrededores del área de interés (Figura 4).

### **Unidad caliza, dolomía y arenisca (EiPcpCz, Do, Ar) (Almazán-Vázquez, 1996, comunicado)**

Comprende rocas del Paleozoico (Cámbrico inferior – Pérmico), entre las cuales se mencionan las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y Arrojos. Dichas unidades están compuestas principalmente por caliza, dolomía y arenisca.

Unidad de andesita y toba andesítica (KsTpaA-TA) y la unidad de riolitas y tobas riolíticas (KsTpaR-TR): Formación Tarahumara.

Se refiere principalmente a tobas y derrames de composición andesítica y toba riolítica con niveles sedimentarios intercalados (KsTpaA-TA, KsTpaA-Ar, KsTpaATq, Ks Tpa Cgp-Ar, KsTpaR-TR), con edades entre 70 y 90 Ma del Cretácico Superior – Paleoceno (McDowell *et al.*, 1994).

### **Unidad ignimbrita – toba riolítica (ToIg-TR). Grupo Yécora (Quintana & Grijalva, 1998)**

Esta unidad pertenece al grupo Yécora (informal) propuesto por Grijalva Noriega & Roldán Quintana (1998) para agrupar a todas las rocas volcánicas y piroclásticas de composición ácida con basaltos que afloran principalmente en la porción superior de la Sierra Madre Occidental en Sonora. Está constituida por ignimbritas, tobas, brechas riolíticas, riolitas, aglomerados, riodacitas y dacita, con edades de:  $24\pm0.4$ ,  $27.1\pm0.9$ ,  $31.2\pm0.7$ , a 39.2 Ma. Damon *et al.* (1983); McDowell (1997); que la ubica en el Oligoceno.

### **Unidad andesita (ToA)**

Unidad descrita de manera informal perteneciente al grupo Yecora, consiste de andesitas con espesor aproximado de 200 m que afloran hacia la parte suroeste de la carta Geológico-Minera (H12-D32). Su contacto inferior es discordante con las unidades JimR–Ar–A y KsTpaAr–Lu–CZ, el contacto superior también es discordante con las unidades Qhoal y Qptcgp. Se le asigna una edad tentativa con base en sus relaciones estratigráficas del Oligoceno (carta geológica H12-5, SGM 1999).

### **Unidad basalto-andesita (TmB–A)**

Pertenece al Grupo Yécora (informal). Esta unidad corresponde a flujos de basalto intercalados con aglomerados basálticos sobre los que descansa el conglomerado Báucarit. Esta unidad fue denominada “basaltos antiguos” por Johnpeer (1977). Las edades radiométricas de K/Ar realizadas en esta unidad van de 30.4 a 25.3 Ma (Bartolini, *et al.*, 1994).

### **Unidad conglomerado polimítico-arenisca (TmCgp–Ar): Formación Báucarit (King, 1939)**

La unidad está constituida por conglomerado polimítico de fragmentos de rocas volcánicas e intrusivas, con intercalaciones de arenisca y basalto principalmente, gravas y arenas poco consolidadas. Se tienen edades radiométricas de K/Ar de 17 a  $21 \pm 0.4$  Ma lo cual sitúa a esta unidad en el Mioceno (Bartolini, *et al.*, 1994).

### **Unidad Toba riolítica, dacita, andesita (TmTR, Da, A): Formación Lista Blanca (Dumble, 1990)**

El término fue establecido por Dumble (1900) para describir una secuencia constituida por niveles de conglomerados y rocas volcánicas en el cerro Lista Blanca al oeste de San Marcial Sonora, asignándole una edad Triásica. Esta unidad corresponde a la parte superior del Grupo Yécora (Quintana & Grijalva, 1998), consiste de una secuencia de toba riolítica, riolita, ignimbrita, andesita, dacita, aglomerado andesítico, ocasionales capas de basalto, traquita y algunos domos andesíticos y riolíticos, brecha lahárica y presenta horizontes zeolitzados y

perlíticos, con espesores variables de 100 a 500 m. Se tienen edades de radiométricas de K/Ar  $10.4 \pm 0.2$  Ma (Bartolini, *et al.*, 1994; McDowell *et al.*, 1997).

Se correlaciona en edad con los basaltos del campo volcánico Moctezuma en donde tiene edades de 0.53, y 1.7 Ma que indica una edad del Pleistoceno (Paz *et al.*, 2003).

### Unidad aluvión (Qhoal)

La unidad está compuesta por sedimentos no consolidados, principalmente gravas, arenas, limos y arcillas con espesores variables de más de 50 m. Aflora en los valles y en los arroyos del área de estudio. Cubre a todas las unidades desde las precámblicas hasta las pleistocénicas. El ambiente de depósito son lechos de arroyos, ríos y planicies.

### Rocas intrusivas

Unidad granito-granodiorita (KsTpaGr-Gd), TpaPqMz-PMz Pórfido cuarzomonzonítico – Pórfido Monzonítico: Batolito Laramide (informal), suite intrusiva El Jaralito (informal). Esta unidad forma parte del batolito Laramide que aflora ampliamente en el noroeste de México y fue ampliamente estudiado por Damon *et al.*, (1983). Posteriormente fue informalmente propuesto el nombre de suite intrusiva El Jaralito por Grijalva-Noriega & Roldán-Quintana (1998), esta unidad litodémica trata de agrupar aquellos afloramientos de rocas intrusivas de composición principalmente ácida a intermedia, cuyas edades varían desde el Cretácico Temprano al Eoceno, los cuales son muy abundantes a lo largo de toda la geografía del estado de Sonora.

## **8. ESTRATIGRAFÍA DEL CERRO EL SAHUARAL**

El Cerro El Sahuaral está representado por una secuencia sedimentaria del Cámbrico inferior-Cámbrico medio, constituida de una sucesión detrítico-carbonatada y dividida en cinco formaciones (de la base a la cima): Proveedora, Buelna, Cerro Prieto, El Gavilán y El Tren (Figura 4). Estas unidades fueron reconocidas por Cooper *et al.* (1952) en el área de Caborca, a excepción de la Formación El Gavilán, en el estado de Sonora. Posteriormente, Cuen *et al.*, (2009, 2012, 2016) reconocería dichas formaciones en el Cerro El Chihuarrita en San José de Gracia, y propone una nueva unidad estratigráfica formal llamada la Formación El Gavilán debido a diferencias litológicas con la Formación Arrojos en el área de Caborca, así como también la presencia de trilobites agnóstidos del Cámbrico medio.

### **8.1. PALEOZOICO – CÁMBRICO**

#### **8.1.1. FORMACIÓN PROVEEDORA**

**Definición:** La Formación Proveedora fue definida Cooper & Arellano (1946) en los cerros la Proveedora en el área de Caborca, Sonora, tomando su nombre de una antigua minería. La base consiste de cuarcita blanca relativamente masiva con manchas de óxidos e intercalaciones de lutitas gris oscuras a verde. La arenisca es de color café oscuro y café rojizo en su mayoría, de grano fino. El contenido fósil fue encontrado sobre superficies intemperizadas, y está representado por fragmentos de trilobites olenélidos, braquiópodos lingúlicos y alta bioturbación, los cuales no pudieron ser identificados por sus descriptores originales. La unidad posee un espesor de 226-260 m (Cooper & Arellano, 1942; Cooper *et al.*, 1952).

**Litología y espesor:** La Formación Proveedora se constituye generalmente de cuarcita y arenisca de grano fino, de color rosa de forma homogénea, presentando manchas de óxidos de fierro y la fuerte fracturación y contacto con capas de calizas, es decir, menos competente, le atribuye un aspecto fallado. Esta unidad posee un espesor aproximado de 160 metros. En la base aflora un paquete de cuarcita de color café-oscuro, con granos de cuarzo de grano fino, mientras que en la parte superior aflora un paquete de arenisca gruesa de cuarzo de color café y

posee una estructura conglomerática. El contacto inferior no se observa, sin embargo, el contacto superior es concordante con la Formación Buelna (Figura 4 y 5).

**Distribución:** La Formación Proveedora aflora en la cima del Cerro El Sahuaral y en la cima del Cerro El Chihuarruita.

**Relaciones estratigráficas:** El contacto inferior no se observa, mientras que el contacto superior es concordante con la Formación Buelna.

**Fósiles y posición cronoestratigráfica:** Se reconoce abundante bioturbación con icnofósiles, entre los que se identifican *Skolithos* isp. y *Arenicolites* isp., los cuales son muy abundantes, seguido de *Cruziana* isp., *Monocraterion* isp. y *Thalassinoides* isp. A pesar de que la unidad no presenta fósiles índice, se le asigna una edad de Cámbrico temprano por correlación con la Formación Proveedora del área de Caborca, en donde si se presentaron fragmentos de olenélidos, lingúlidos y gran abundancia de *Skolithos* isp. (Cooper *et al.*, 1952). La icnofacies *Skolithos* ha sido identificada comúnmente en el Cámbrico temprano (Goodwin & Anderson, 1974).

**Ambiente de depósito:** Tomando en consideración la gran abundancia de *Skolithos* isp. y *Arenicolites* isp., así como los estratos con intercalaciones de láminas de materiales finos y gruesos, la unidad consiste de un ambiente de intermarea a submarea (Buatois y Mangano, 2011). Es posible que la Formación Proveedora corresponda a la icnofacies de *Skolithos* (Pemberton *et al.*, 1992), indicando ambientes arenosos y de línea de costa, tales como zonas litorales y sublitorales, barras arenosas o frentes deltaicos. Por lo general se encuentran en ambientes marinos someros.

### 8.1.2. FORMACIÓN BUELNA

**Definición:** La secuencia fue definida por Cooper *et al.* (1952) en el Cerro Buelna, área de Caborca, constituida principalmente de caliza de color gris claro granular y algunas capas de arenisca calcárea. En la base se presentan capas delgadas de caliza gris oscura conteniendo coquinas de *Salterella* sp. y abundantes trilobites olenélidos, acumulados aparentemente por

acción mecánica. En la parte media de esta formación hay dos bancos de caliza muy resistentes a la erosión, formados exclusivamente por oncolitos de *Girvanella*. La parte media superior de la formación está constituida por arenisca calcárea y caliza de color gris-verdoso en capas delgadas y que contienen bancos oolíticos o conglomeráticos con clastos de caliza, con abundante contenido de trilobites como *Olenellus*, *Onchocephalus*, *Antagmus* y *Bonnia* (Cooper *et al.*, 1956; Rivera-Carranco, 1988a), logrando reconocer biozonas, en aquel tiempo valido, como *Obolella*, *Olenellus* y *Antagmus-Onchocephalus* del Cámbrico inferior. La parte superior comprende de caliza gris arenosa, seguido de un paquete de arenisca café de grano fino en capas delgadas. El espesor de la formación es de 70 metros, su base y su cima son concordantes con la Formación Proveedora y la Formación Cerro Prieto respectivamente.

En el Cerro El Chihuarruita, en el área de San José de Gracia, Nardin *et al.* (2009) dividieron la secuencia en siete diferentes miembros (A-G) englobando las rocas de esta formación en el miembro D, confiriendo estas rocas al Piso 4, a la Zona de *Bonnia-Olenellus*, la cual actualmente se encuentra en desuso, como se verá más adelante. Cuen *et al.* (2016, 2018) relacionan estas rocas con la Formación Buelna del área de Caborca, y asignan la biozona *Bristolia mohavensis/Bristolia insolens* del Cámbrico inferior (Serie 2, Piso 4) con base a las zonas bioestratigráficas establecidas por Webster (2011) y Webster y Bohach (2014), por lo que se abandona la biozona *Bonnia-Olenellus*.

**Litología y espesor:** La Formación Buelna consiste en caliza y caliza arenosa intercalada con lutita y caliza fosilífera, de la base a la cima. La base está constituida por una caliza arenosa de estratificación masiva, de aproximadamente 42 metros de espesor, donde se observan coquinas de *Saterella* sp, *Hyolithes sonora* y fragmentos de trilobites y braquiópodos. La parte media consta de intercalaciones de lutita y caliza. Sobre esta secuencia aflora una capa de caliza gris arenosa con alto contenido de algas oncolíticas. Los oncolitos son muy abundantes y miden de 5 a 25 mm de diámetro, poseen laminaciones concéntricas de 0.2 – 1.0 mm de espesor; son de color rojo a negro como resultado del alto contenido de óxidos en una matriz de micrita, y en ocasiones observándose filamentos tipo *Girvanella* (Beraldi–Campesi *et al.*, 2013). La secuencia continua con la presencia de capas de lutitas fisiles de color rojiza con

un espesor de 2m. En la cima se encuentra una capa de caliza gris–oscuro, con clastos arenosos de color amarillo en forma tabular que varían en tamaño de 10 a 15 cm. Con gran contenido de fósiles como hyolithes, agmatos y fragmentos de trilobites. El espesor de esta unidad de 60 metros (Figura 4 y 5).

**Distribución:** La sección de referencia de la Formación Buelna en el área El Sahuaral, aflora únicamente en la parte noroeste de la loma El Sahuaral.

**Relaciones estratigráficas:** La base y cima de esta unidad son concordantes con la Formación Proveedora y Cerro Prieto respectivamente

**Sección y área tipo:** La formación toma su nombre del cerro Buelna, área de Caborca, donde se encuentra su localidad tipo. En el área de El Sahuaral se midió una sección de referencia NE-SW de aproximadamente 60 metros.

**Fósiles y posición cronoestratigráfica:** En la parte media se presentan fósiles como los hiolítidos *Hyolithes sonora* Lochman, 1952, *Haplophrentis ressei* Babcock y Robison, 1988, en asociación con fragmentos de biceratópsidos como *Bristolia* sp. cf. *B. bristolensis* Resser, 1928, fauna representativa de la Zona de *Bristolia mohavensis* y/o *Bristolia insolens* del Cámbrico inferior (Serie 2, Piso 4) (Webster, 2011). La parte superior presenta algas oncolíticas asignadas a *Girvanella* sp.

**Ambiente de depósito:** Para la Formación Buelna se considera un ambiente marino, somero, de aguas tranquilas con aporte de terrígenos, como lo demuestra la caliza con fragmentos de granos de cuarzo muy angulosos; esto producido por posibles tormentas o aportes repentinos de material proveniente del exterior.

### **8.1.3. FORMACIÓN CERRO PRIETO**

**Definición:** Fue definida en Cerro Prieto, como una caliza maciza, color negro – oscuro, con oncolitos, posiblemente *Girvanella*, y oolitas, así como algunas muestras de bioturbación que dan el aspecto de moteados, asignándola al Cámbrico inferior (Cooper et al.1956).

**Litología y espesor:** La Formación Cerro Prieto es una caliza oolítica masiva de color gris oscuro-negro, que forma crestones que sobresalen del terreno, y se encuentra ligeramente dolomitizada con gran resistencia al intemperismo kárstico bien definido de forma homogénea formando cantiles, y un espesor de 70 metros, y posee una gran cantidad de vetillas de calcita. Las oolitas se observan oxidadas, de color naranja, con un diámetro menor a 01 mm, se observan vetillas de calcita blanca con un espesor de 01 mm, con presencia de cristales de hematita y pirita oxidada, encontrándose ligeramente dolomitizada. En el área de Caborca, la Formación Cerro Prieto aflora como una caliza gris–oscura, formando crestones que sobresalen del terreno y con alto intemperismo tipo karstico. En el área del Cerro el Sahuaral aflora con la misma actitud. La unidad en el área de Caborca posee estructuras circulares que no fueron estudiadas por los autores originales (Cooper *et al.*, 1956), y que son asignadas dudosamente a *Girvanella*, en el área de San José de Gracia posee gran cantidad de oolitas (Figura 4 y 5).

**Distribución:** La Formación Cerro Prieto también aflora en los cerros de los Arrojos, Proveedora, Buelna y Difuntos, área de Caborca y los cerros El Chihuarrita y el Sahuaral.

**Relaciones estratigráficas:** Sobreyace de manera concordante a la Formación Buelna del Cámbrico inferior y es sobreycida de manera concordante por la formación El Gavilán del Cámbrico medio.

**Sección y área tipo:** La Formación Cerro Prieto posee su localidad tipo en el cerro Prieto a 03 km al suroeste de Caborca. En el área de El Sahuaral se midió una sección NE-SW de 70 m.

**Fósiles y posición cronoestratigráfica:** Esta unidad no proporcionó fósiles. Antiguamente, por su posición estratigráfica, Cooper *et al.* (1952, 1956) la consideraron como la transición del Cámbrico inferior al Cámbrico medio debido a que sobreyace de manera concordante a la Formación Buelna, y es sobreycida de manera concordante por la Formación Arrojos. Sin embargo, en el Cerro Chihuarrita, San José de Gracia, se identificaron fragmentos de *Amecephalus arrojensis*, y por lo tanto, la presencia de la Zona de *Amecephalus arrojensis* o *Poliella denticualata*, confiriendo una edad del Piso 4-5 (Lincolniano), reportando por primera

vez la presencia de este trilobite del Cámbrico medio en el área (Cuen *et al.*, 2016). Con base en lo anterior, es posible que la Formación Cerro Prieto en el Cerro El Sahuaral sea de una edad similar.

**Ambiente de depósito:** La Formación Cerro Prieto es considerada de un ambiente de intermarea a plataforma somera, esto con base a la presencia de oolitas que también revelan condiciones relacionados con aguas marinas altamente agitadas, someras y supersaturadas.

#### 8.1.4. FORMACIÓN EL GAVILÁN

**Definición:** Fue definida formalmente por Cuen *et al.* (2016) como una nueva unidad litoestratigráfica, siguiendo las reglas de North American Commission on Stratigraphic Nomenclature (2005). El nombre se deriva del río El Gavilán, ubicado a 4.5 km al oeste de la colina de El Chihuarruita, donde se encuentra la sección tipo de la Formación El Gavilán. Fue descrita como una secuencia compuesta por intercalaciones de lutita de color rojo y caliza de color gris-oscuro, con abundantes fósiles. La litología predominante es lutita de color rojo, la cual está intensamente fracturada formando delgadas láminas menores a 03 cm de espesor. Las capas de caliza varían en espesor desde 30 hasta 50 cm, siendo menos frecuentes, y con un contenido faunístico menor. Esta formación posee un espesor de 233.70 metros.

En la parte basal de la unidad, se encuentran horizontes de lutita donde son muy abundantes los braquiópodos *Acrothele* sp. y *Linnarsonia* sp. Sobre esta parte, en los horizontes de lutita superiores la fauna se torna muy abundante, identificándose los trilobites *Peronopsis* sp., *P. bonnerensis*, *Oryctocephalus* sp., *Oryctocephalites walcotti*, *Elrathina antiqua*, *Ogygopsis typicalis*, *Bathyuriscus* sp. y *Pagetia resseri*. Entre los braquiópodos se encuentran *Acrothele* sp., *Prototreta* sp., *Dictyonina* sp., *Linnarsonia* sp., y *Lingulella* sp., así como otros no identificados debido a su mal estado de conservación. En la cima de la unidad se presenta espículas de esponjas hexactinélidas así como escleritos aislados de *Chancelloria eros* Walcott, 1920 y *Diagoniella* sp. (Cuen *et al.*, 2013).

La distribución principal es en el cerro El Chihuarruita y posee un espesor de 233 metros, el contacto inferior es concordante con la Formación Cerro Prieto y el contacto

superior es discordante con rocas volcánicas cenozoicas. Las asociaciones faunísticas confieren una edad de Piso 5, y en la cronología regional de Laurentia se puede datar en Lincolniano, Delamarano tardío, asignada a la parte superior de la Zona de *Mexicella mexicana*, Subzona de *Albertella highlandensis*, Zona de *Ptychagnostus praecurrentis* (plataforma abierta).

**Litología y espesor:** La Formación El Gavilán está constituida de materiales detríticos y carbonatados, aflorando un potente paquete de lutita de color rojo, la cual está intensamente fracturada, formando delgadas láminas menores a 03 cm de espesor con intercalaciones de capas de caliza color gris-oscuro, varían en espesor desde 30 hasta 50 cm, siendo menos frecuente y con un contenido faunístico menor. La secuencia posee un espesor de 255 m (Figura 4 y 5).

**Distribución:** La Formación El Gavilán aflora en los cerros El Chihuarruita y El Sahuaral.

**Relaciones estratigráficas:** El contacto inferior de la unidad es concordante con la Formación Cerro Prieto, el contacto superior es concordante con la Formación El Tren.

**Sección y área tipo:** La Formación El Gavilán posee su localidad tipo al sureste del Cerro El Chihuarruita, área de San José de Gracia, en las coordenadas geográficas 29° 17' 03" N y 110° 34' 54" W; mientras que la sección de referencia del área El Sahuaral se ubica al suroeste de la colina.

**Fósiles y posición cronoestratigráfica:** Se caracteriza por abundantes fósiles de invertebrados del Cámbrico medio, entre los que destacan los trilobites *Quadragnostus depressa*, *Tomagnostus* sp., *Pagetia* sp., ?*Bristolia* sp., ?*Olenellus* sp., *Oryctocephalus reynoldsi*, *Oryctocephalus* sp., *Bathyuriscus* sp., *Tonkinella flabelliformis*, *T. valida*, *Ptychoparella (Elrathina) antiqua* entre otros, en asociación con braquíópodos inarticulados (*Acrothele* sp., *Dictyonina minutipuncta*, *D. ornatella*., *Linnarsonia ophirensis*., y *Lingulella proveedoensis*), poríferos (*Chancelloria eros*, *Allonia tintinopsis*, *Archiasterella* sp.), hyolitidos (*Haplophrentis ressei*), entre otros. El contenido faunístico de la unidad se reconoce por primera vez en el área de estudio a la Formación El Gavilán con una edad del Piso 5 (Topazano) con base a la presencia de

trilobites de la *Subzona Altioculus*, parte superior de la *Zona Ehmaniella*. La Formación Gavilán del Cerro El Sahuaral se biocorrelaciona con los depósitos del Rancho Sobechi, en el área de Mazatlán, indicando las mismas biozonas, con base a la presencia de *Tonkinella valida*. (Vega-Granillo, 1996).

**Ambiente de depósito:** La Formación El Gavilán es considerada como un depósito de plataforma externa como lo demuestran los estratos formados por la intercalación de lutitas y calizas y la abundancia de fósiles de trilobites *Quadragnoutus depressa*, *Pagetia resseri*, *Oryctocephalus reynoldsi*, *Oryctocephalus* sp., *Oryctocephalites walcotti*, *Tonkinella flabelliformis*, *Tonkinella valida*, *Ptychoparella (Elrathina) antiqua* (Cuen, et al., 2016). La abundancia y amplia distribución geográfica de los trilobites agnóstidos les confiere un valor irrefutable como los mejores índices globales para la correlación de los estratos del Cámbrico. En los afloramientos del área de Caborca y Cananea se ha documentado sólo la presencia de trilobites polímeros, indicando ambientes marinos someros (plataforma interior). Los depósitos del área de Mazatlán, San José de Gracia y Arivechi contienen trilobites agnóstidos, indicando depósitos de plataforma abierta.

#### 8.1.5. FORMACIÓN EL TREN

**Definición:** Fue definida por Cooper et al. (1952) a la formación de caliza dolomítica que aflora principalmente en el Cerro de Los Arrojos en el área de Caborca. La Formación El Tren se la denominado como una secuencia constituida en la base por un conjunto de calizas de aspecto moteado, que gradúan hacia la cima a calizas dolomitizadas y a una alternancia entre estratos de dolomías pardas y negras (Rivera-Carranco, 1988). La unidad se sobrepone a la Formación Los Arrojos y al resto de formaciones cámbricas en el área de Caborca, limitada en la parte superior por una superficie de erosión.

**Distribución:** La unidad se distribuye en los cerros ubicados al oeste y suroeste del Cerro El Sahuaral (Figura 4).

**Relaciones estratigráficas:** El contacto inferior de la unidad es concordante con la Formación El Gavilán, mientras que el contacto superior eno fue observado en el área.

**Sección y área tipo:** La Formación El Tren posee su localidad tipo en la cima de los cerros Los Arrojos, área de Caborca.

**Fósiles y posición cronoestratigráfica:** No se identificó contenido faunístico dentro de la secuencia. Sin embargo, en el área de Caborca se reportaron las especies de trilobites *Athabaskia minor*, *Inglefieldia* sp. y *Parehmania* sp., en asociación biótica principalmente con los braquiópodos *Pegmatreta* y *Dictyonina*. Cuen *et al.*, (2017), le asignaron a una edad perteneciente a la parte superior de la Zona de *Glossopleura walcotti*, correspondiendo una edad del Piso 5, Lincolniano, Delamarano.

**Ambiente de depósito:** Es posible que la Formación El Tren se desarrolló en un depósito donde el efecto del reflujo de aguas sobresaturadas de magnesio produjeron la dolomitización de los carbonatos de calcio, esto dado a que la secuencia está constituida por calizas, calizas dolomíticas y dolomías con intercalaciones de anhidrita (Rivera-Carranco, 1988).

## 8.2. CENOZOICO – PALEOGÉNO

La unidad de riolitas y tobas riolíticas corresponde a la Formación Tarahumara, y consiste principalmente a tobas y derrames de composición andesítica y toba riolítica con edades entre 70 y 90 Ma del Cretácico Superior – Paleoceno con niveles sedimentarios intercalados (McDowell *et al.*, 1994). Estos depósitos afloran al este de El Cerro El Sahuaral.

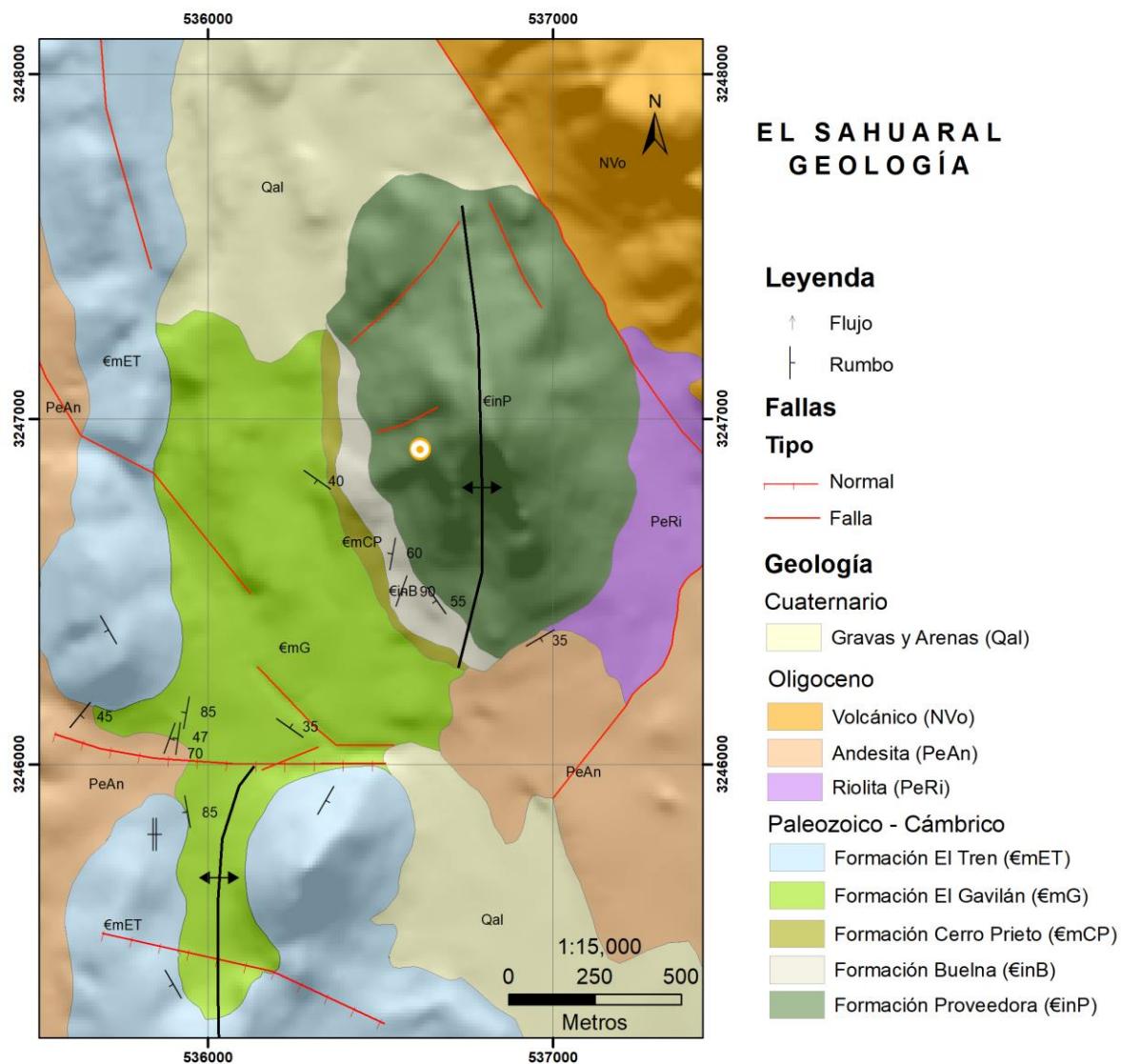
### 8.2.1. OLIGOCENO

La unidad de andesitas posee un espesor aproximado de 200 m que aflora hacia el suroeste de El Cerro El Sahuaral, sobreyciendo a la Formación El Gavilán del Cámbrico medio, mientras que el contacto superior es discordante con rocas volcánicas de composición principalmente ácida a intermedia del Oligoceno y del Cuaternario.

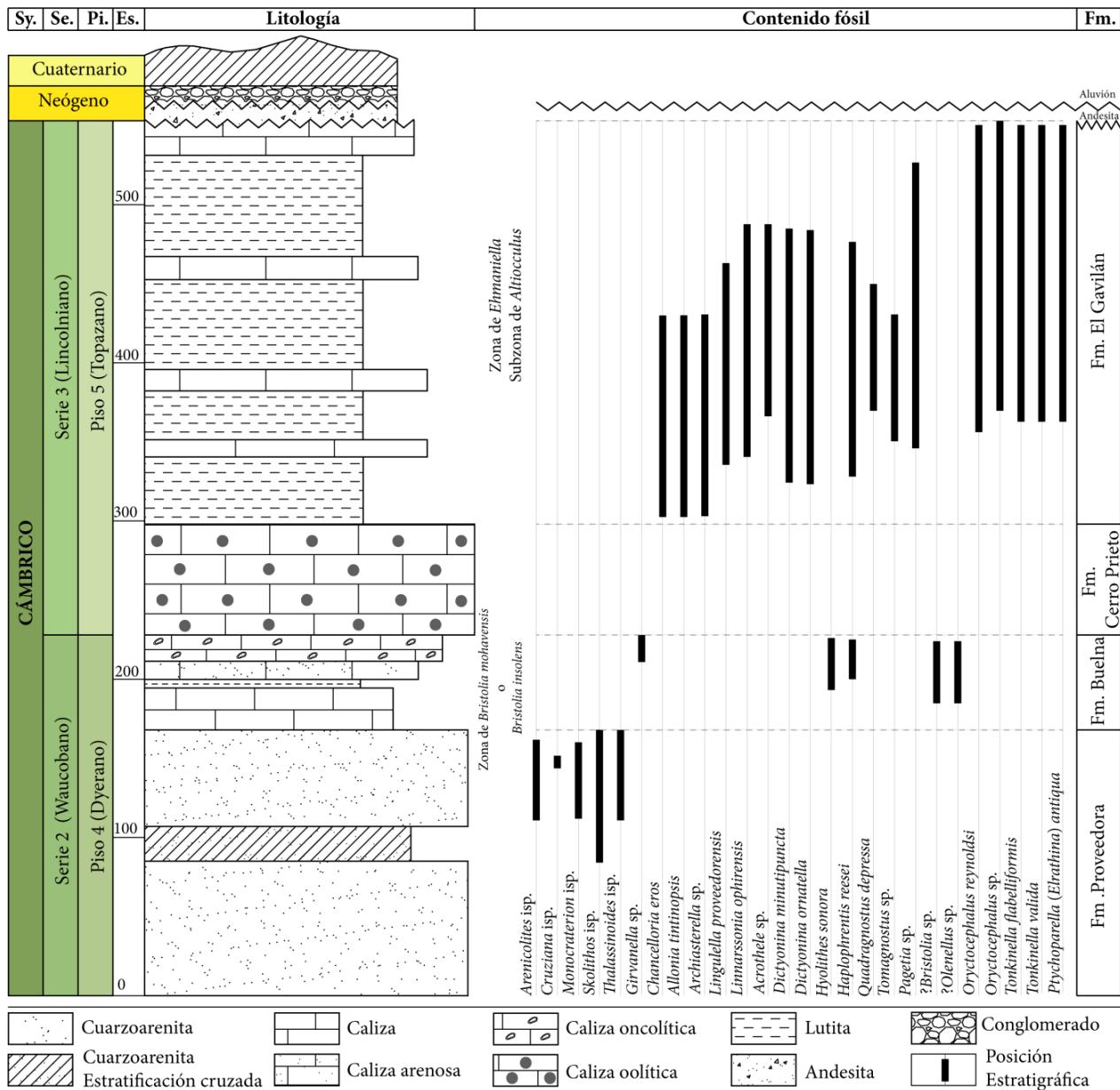
## 8.3. CENOZOICO - CUATERNARIO

Las rocas consisten en sedimentos no consolidados, principalmente gravas, arenas, limos y arcillas, que afloran en los valles y en los arroyos del área de estudio. Cubre a todas las

unidades desde las precámbricas hasta las pleistocénicas. El ambiente de depósito son lechos de arroyos, ríos y planicies.



**Figura 4.** Mapa geológico del área de estudio. Al centro el Cerro El Sahuaral, donde afloran los depósitos del Cambriico inferior-medio estudiados en este trabajo.



**Figura 5.** Columna estratigráfica del Cámbrico del área del Sahuaral mostrando la distribución de la biota.

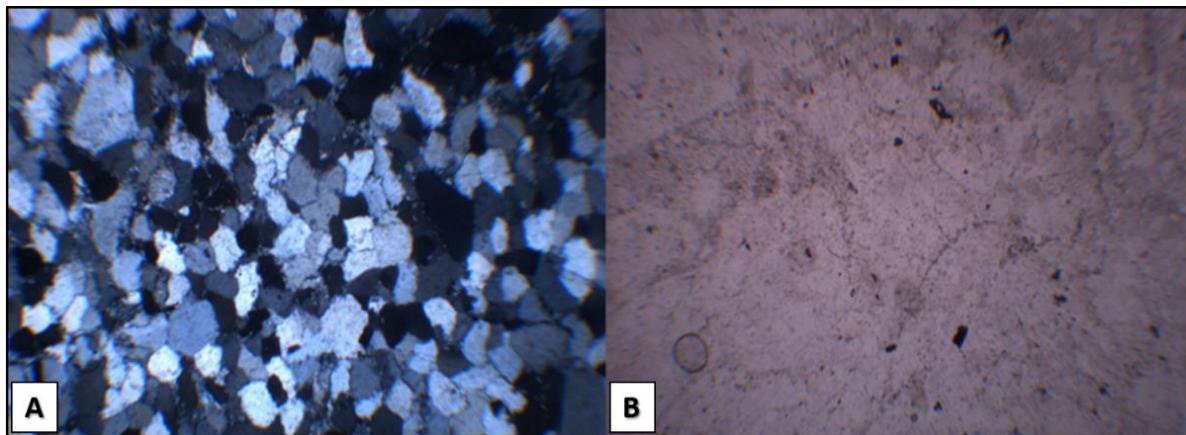
## 9. PETROGRAFÍA

Para la clasificación de las muestras pertenecientes a las formaciones ya mencionadas se recurrió a diferentes clasificaciones propuestas por los siguientes autores: Para rocas carbonatadas se utilizó la propuesta de Folk (1962) y Dunham (1962) para la determinación composicional y textural, respectivamente, complementando con la propuesta de Embry & Klovan (1972) para granos mayores a 2 mm, y para rocas detríticas se usó Pettijohn *et al.* (1973).

### Formación Proveedora

#### *Cuarzoarenita*

Los clastos son de tamaño menores a 2 mm, de forma angulosa a subangulosa, bien clasificados, presentan un empaquetamiento de grano soportado, el contacto entre los granos es preponderante el longitudinal, con un cemento sintaxial y pelicular, se considera texturalmente madura. Sus componentes principales son: cuarzo mayor al 95%, feldespatos y fragmentos de rocas y minerales opaco (pirita) < 5%. Según Pettijohn *et al.* (1973) se clasifica como cuarzoarenita (Figura 6).



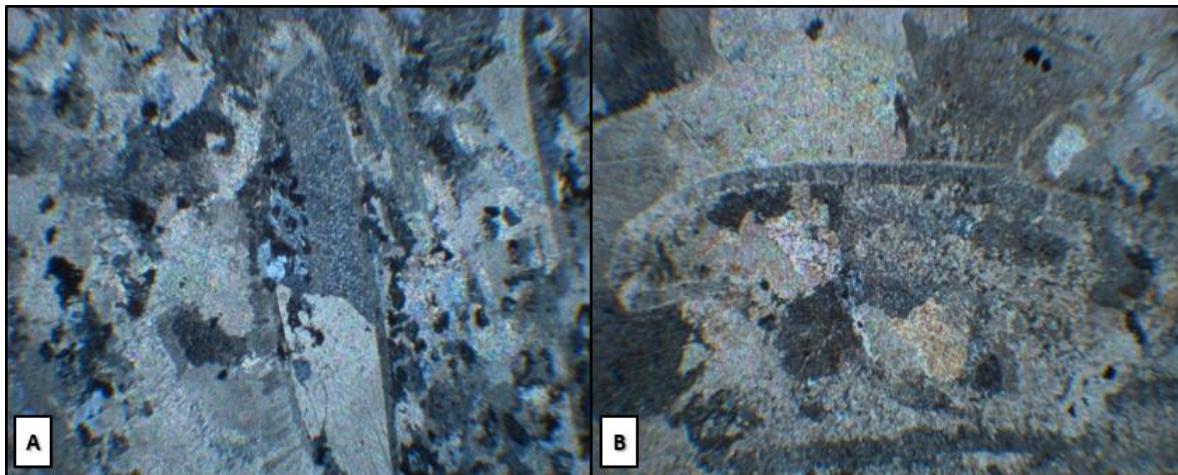
**Figura 6.** A) Cuarzo monocristalino, cementante sintaxial de sílice y pelicular de óxidos de fierro NC. B) Arenisca tomada con LN donde se observa minerales opacos pirita. Tomada con objetivo 4x.

## Formación Buelna

### *Biomicrita/Floatstone*

Presenta una fábrica soportada por micrita, con tamaño de grano de limo a arena fina con una clasificación moderada; los ortoquímicos están representados en su mayoría por micrita 20% los aloquímicos representados principalmente oncolitos (58%), fragmentos trilobites (5%), equinodermos (10%). Se observa vetillas de calcita. El material terrígeno (5%) de tamaño de grano fino, compuesto por cuarzo monocristalino de forma subredondeado a subanguloso y óxidos de fierro (2%) (Figura 7).

Corresponde a las muestras S-01, S-02, S-04, S-05, S-08 y S-10, clasificadas en su mayoría como biomicrita (según Folk, 1962), floatstone según Embry & Klovan (1972).



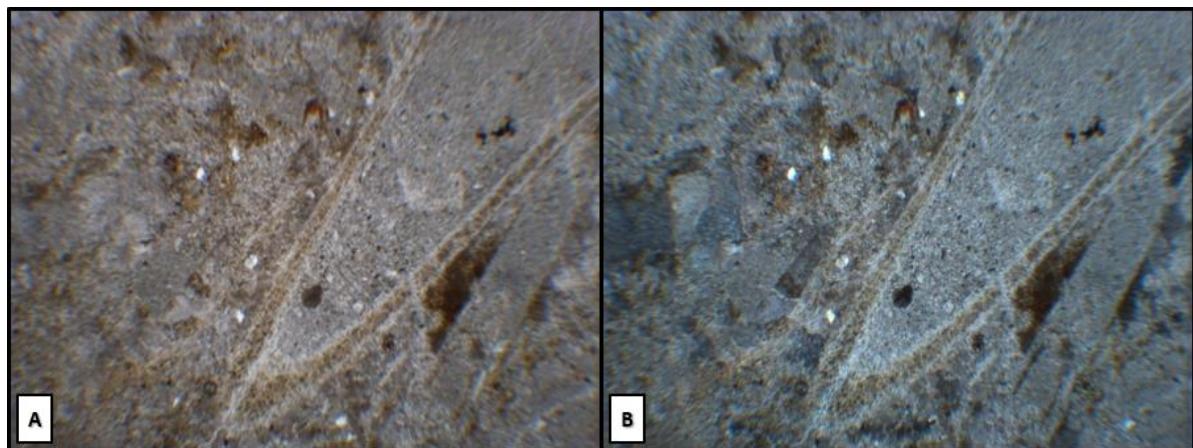
**Figura 7.** Caliza con fragmentos de trilobites y aportes terrígenos en una matriz de microesparita (cuarzo). Dunham: wackestone. Folk: biomicrita. A) Muestra S-01. B) Muestra S-08. Objetivo: 4X. NC.

### *Biomicrita/Wackestone*

Presenta una fábrica soportada por micrita y óxidos de fierro, con tamaño de grano limo arena fina y una clasificación moderada; los ortoquímicos están representados en su mayoría por micrita 50% los aloquímicos representados principalmente por bioclastos de

trilobites (20%), hiolítidos (15%) equinodermos (10%). El material terrígeno (5%) compuesto por cuarzo monocristalino en su mayoría, de forma subangulosa a subredondeada (Figura 8).

Corresponde a las muestras S-03, S-05, S-08 y S-09, clasificadas según como biomicrita según Folk (1962) y wackestone según Dunham (1962).

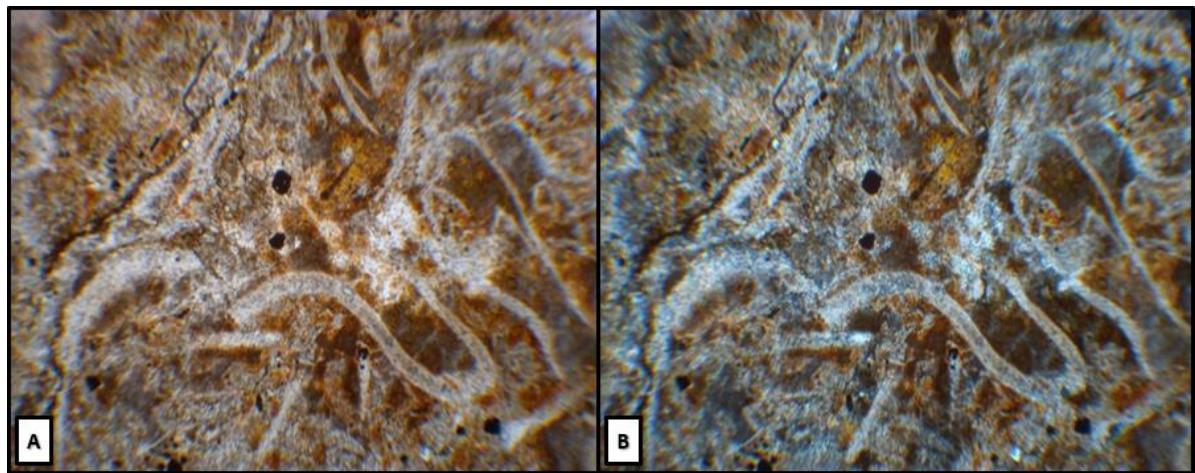


**Figura 8.** Caliza con fragmentos de hiolítidos en una matriz micrítica. Se observa aporte de terrígenos. Dunham: wackestone. Folk: biomicrita. a) LN y b) NC. Muestra S-09. Objetivo: 4X.

#### *Bomicrita/Packstone*

Presenta una fábrica soportada por micrita, con tamaño de grano limo arena fina y una clasificación moderada; los ortoquímicos están compuestos en su mayoría por micrita 30%; los aloquímicos representados principalmente por bioclastos de trilobites (30%), hiolítidos (15%), equinodermos (5%) y salterellas (10%). Se observa vetilla de esparita. El material terrígeno (5%) de tamaño de grano fino, compuesto por cuarzo monocristalino forma subredondeado a subanguloso y óxidos de fierro (5%) (Figura 9).

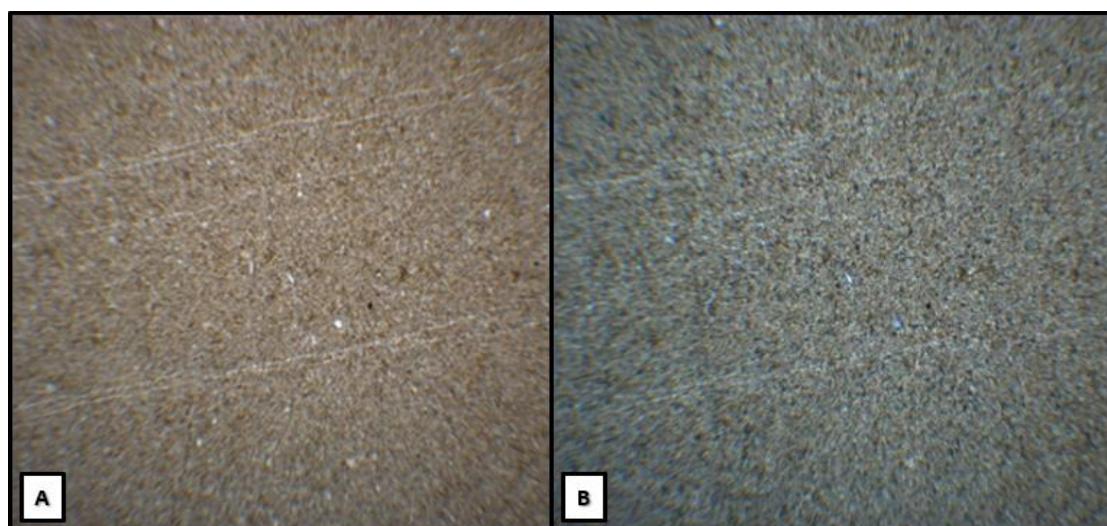
Corresponde a las muestras S-06 y S-07, clasificadas según como biomicrita según Folk (1962) y packstone según Dunham (1962).



**Figura 9.** Caliza con fragmentos de trilobites en una matriz de micrita con presencia de óxidos de fierro. Dunham: packstone. Folk: biomicrita. a) LN y b) NC. Muestra S-06. Tomada con objetivo 4x.

#### *Lodolita calcárea*

Presenta una fábrica de lodo soportada, con tamaño de arena de grano muy fino a fino, los ortoquímicos están representados por micrita (95%) y aloquímicos no identificados (2%). Muestra S-11 (Figura 10).



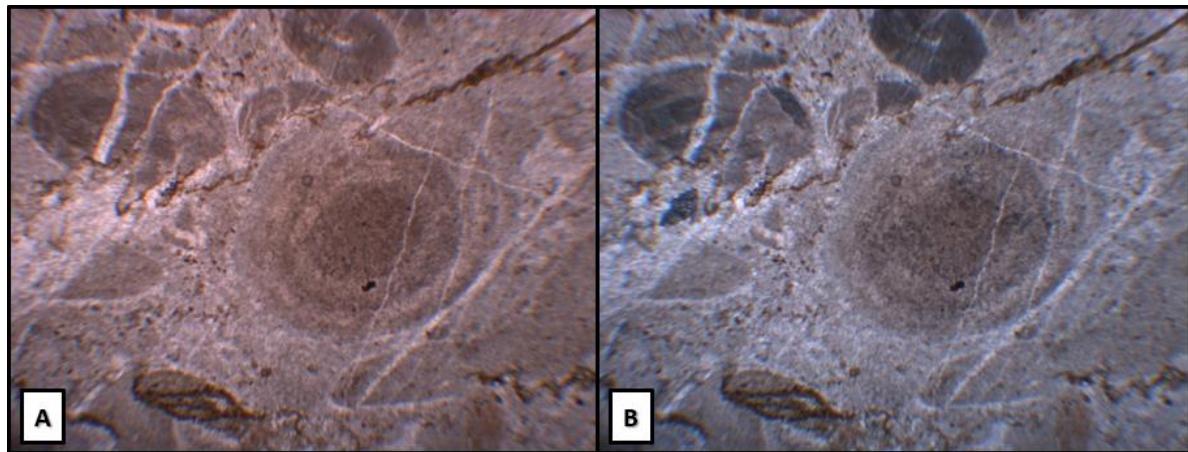
**Figura 10.** Mudstone a) LN y b) NC. Objetivo: 4X.

## Formación Cerro Prieto

### *Oomicrita/packestone*

Presenta una fábrica de grano soportado con tamaño de grano fino, bien clasificado y óxidos de fierro; los ortoquímicos están representados en su mayoría por una matriz de micrita (45%) y microesparita 5%; los aloquímicos están presentes las oolitas micritizadas 50% e intraclastos 20% y equinodermos 15%. Se observa cementación tardía (fibrosa radial), así como presencia de estilolitas y vetillas de calcita (Figura 11).

Corresponde a las muestras CP-1 y CP-3, clasificadas según como oomicrita según Folk (1962) y packstone según Dunham (1962).

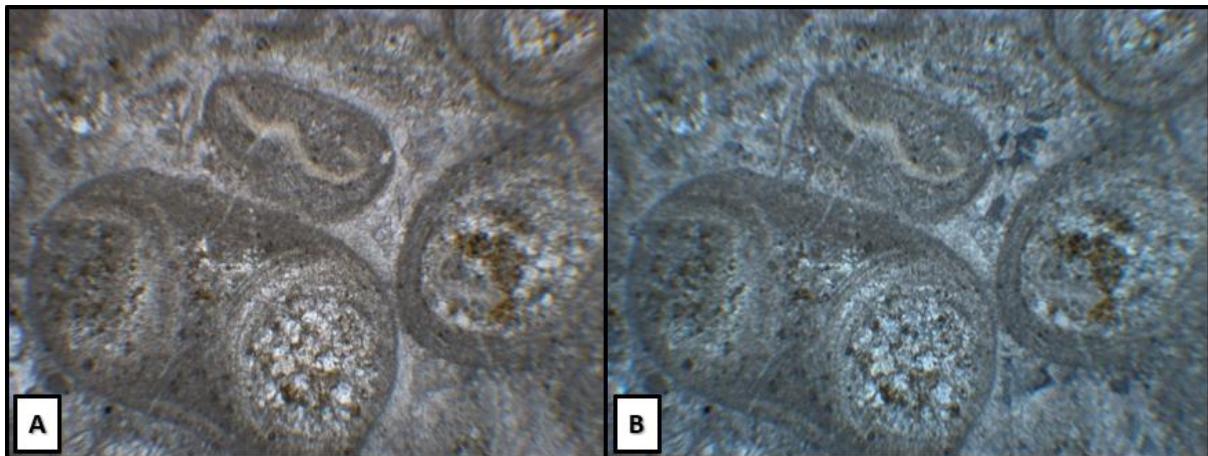


**Figura 11.** Oolitas micritizadas y superficiales e intraclastos en una matriz de micrita. Dunham: packstone. Folk: oomicrita. a) LN y b) NC. Muestra CP-3. Objetivo: 4X.

### *Oesparita/Grainstone*

Presenta una fábrica de grano soportado con tamaño de grano fino a grueso y moderadamente clasificado; los ortoquímicos están representados en su mayoría por esparita (30%), los aloquímicos están representados por oolitas (60%), equinodermos (8%), oncolitos (2%). La mayoría de las oolitas encuentran reemplazadas por dolomita y ocasionales óxidos de fierro. Se observa principalmente una cementación tardía de mosaico (Figura 12).

Corresponde a las muestras CP-2, CP-4 y CP-5, clasificadas como oomicrita según Folk (1962) y packstone según Dunham (1962).



**Figura 12.** Oolitas superficiales llenas de esparita y óxidos en una matriz de esparita; ocasionalmente presentan fragmentos de trilobites dentro de las oolias. Dunham: grainstone. Folk: ooesparita. a) luz natural y b) luz polarizada. Muestra CP-5. Objetivo: 4X

## 10. ANÁLISIS DE LITOFAZIES, MICROFAZIES Y BIOFAZIES

### 10.1. INTRODUCCIÓN

Las litofacies reflejan las condiciones físicas y químicas en las que se ha formado un cuerpo de roca evidenciando un proceso sedimentario particular, se pueden definir por características físicas composicionales: litología, color, estructuras, composición, textura, fósiles y arquitectura sedimentaria, normalmente por una combinación de estos atributos.

El término de microfacies se refiere a las facies sedimentarias que pueden ser estudiadas y caracterizadas en pequeñas secciones de una roca. El nombre es generalmente aplicado a las características que pueden ser determinadas mediante el estudio de secciones delgadas con un microscopio petrográfico. Flügel (2004) define el término microfacies como “El total de todos los criterios paleontológicos y sedimentológicos, los cuales pueden ser clasificados en secciones delgadas y secciones pulidas”.

El propósito del análisis de microfacies es proporcionar una descripción detallada de las características de las rocas carbonatadas, (tipos, forma, tamaño de los granos carbonatados, tipos y formas de crecimiento de los fósiles, tamaño y forma de los granos, tipo de ortoquímicos: micrita, o cemento; y fábrica de las partículas). De esta manera el objetivo del análisis de microfacies es la interpretación del ambiente.

Flügel (2004) y Wilson (1975) han propuesto usar los datos de microfacies carbonatadas para establecer un número restringido de tipos de microfacies principales que sirven como modelos para todas las microfacies carbonatadas, independientemente de las edades de las rocas carbonatadas. Estas microfacies están referidas como Tipos de Microfacies Estandares (SMF); y pueden ser agrupadas dentro de “zonas” de facies, las cuales son usadas luego para construir un modelo depositacional generalizado para las rocas carbonatadas (Figura 13 y Tabla 1).

Flügel (2004) propuso los Tipos de Microfacies de Rampa (RMF) comparables en algunos casos con las SMF de Wilson (1975). Las RMF no poseen el carácter estándar de las SMF, su utilización permite la caracterización de cinturones de facies y superficies de valor estratigráfico, difícilmente reconocibles macroscópicamente en este tipo de ambiente, (Figura 14 y Tabla 2).

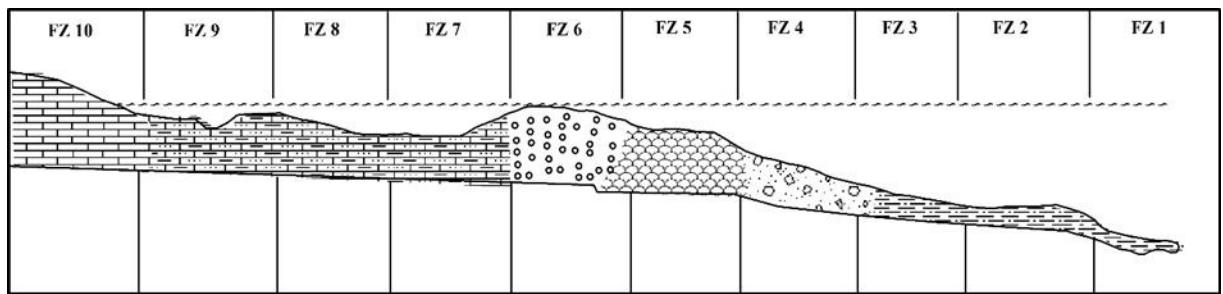


Figura 13. Microfacies Estándares (SMF) de Wilson (1975).

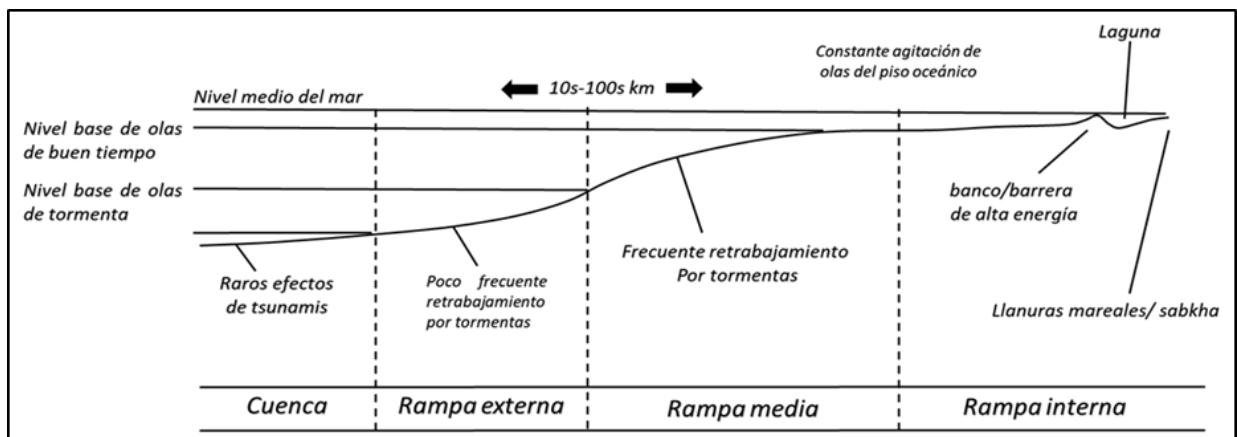


Figura 14. Modelo propuesto por Flügel (2004) para los tipos de microfacies de rampa RMF.

SMF	Nombre	Características
1	Espiculita	Color oscura abundantes organismos, mudstone o wackestone arcilloso, conteniendo espículas, comúnmente orientadas y reemplazadas por calcita.
2	Calcsiltita microbioclástica	Pequeños bioclastos y peloídes con una textura grainstone o packstone, ondulitas en escala milimétrica, comúnmente laminados.
3	Mudstone o wackestone pelágico	Matriz de micrita, con granos de arena fina o limo dispersos constituidos por microfósiles pelágicos o megafauna.
4	Microbrecha o packstone bioclastico -litoclástico	Granitos desgastados de carácter robusto, originalmente puede consistir en bioclastos y/o litoclastos cementados; también puede incluir cuarzo, pedernal, u otros tipos de fragmentos de carbonato; comúnmente gradados.
5	Packstone floatstone o grainstone bioclastico	Constituido principalmente de bioclastos derivados de organismos que habitan los flancos y la parte superior de los arrecifes; llenos geopétalos o infiltrados por sedimento fino.
6	Rudstone arrecifal	Grandes bioclastos y organismos de la parte superior y flancos del arrecife. En forma de matriz.
7	Boundstone	Constituidos por organismos sésiles Pueden ser llamados framestone si se constituyen por agregados masivos y de formas robustas, bindstone si están constituidos por incrustaciones lamelares enmarañadas construyendo cavidades y capas incrustadas de micrita, y bafflestone si su composición es de complejos y delicadas masas de micrita.
8	Fósiles completos wackestone	Organismos sésiles inmersos en micrita, el cual contiene algunos bioclastos dispersos, infauna y epifauna bien preservada.
9	Wackestone bioclastico o micrita bioclastica	Sedimentos micríticos que contiene fragmentos de diversos organismos mezclados y homogenizados por bioturbación; los bioclastos pueden estar micritizados.
10	Packstone-wackestone con bioclastos desgastados y cubiertos en micrita	Los sedimentos exhiben inversión textural, los granos muestran evidencia de formación en ambientes de alta energía, pero contiene matriz lodosa.
11	Grainstone con bioclastos cubiertos por cemento de esparita	Bioclastos cementados con cemento esparítico; los bioclastos pueden estar micritizados.
12	Coquina, grainstone o rudstone bioclastico	Constituido por un depósito de conchas de ciertos tipos de organismos dominantes, carece de matriz lodososa.
13	Grainstone bioesparítico con oncoïdes	Constituido principalmente por oncoïdes en un cemento esparítico
14	Lags	Partículas cubiertas y desgastadas; puede incluir ooides y peloídes que son ennegrecidos y manchados de hierro; con fosfatos; también puede incluir litoclastos alóctonos.
15	Grainstone de ooides	Ooides bien formados y clasificados de tamaño que va de 0.5 a 1.5 mm fábrica empaquetada; con estratificación cruzada.
16	Pelsparita o grainstone peloidal	Probablemente pellets fecales; pueden ser mezclados con ostrácodos o foraminíferos; puede contener láminas gruesas gradadas y una fábrica fenestral.
17	Grainstone o grapestone pelsparítico	Mezclas de facies de peloídes aislados, peloídes aglutinados y granos agregados (grapestones y lumps); puede incluir algunos granos recubiertos.
18	Grainstone de foraminíferos o algas	Consiste en concentraciones comúnmente mezcladas con peloídes.
19	Loferita	Laminada a bioturbada, mudstone o wackestone peleteado; puede gradar a pelsparita con fábrica fenestral; la asociación de ostrácodos y peloídes es común en mudstone; también puede incluir micrita con foraminíferos, gasterópodos y algas.
20	Mudstone de estromatolitos de algas	Estromatolitos.
21	Espongiostroma	Fábrica de algas ramificadas en sedimento fino (limo-lodo).
22	Micrita con oncoïdes grandes	Wackestone o floatstone que contienen oncoïdes.
23	Micrita pura homogénea sin fósiles y sin laminación	Micrita; puede contener cristales de minerales evaporíticos.
24	Rudstone o floatstone con litoclastos gruesos y/o bioclastos	Clastos comúnmente constituidos de micrita o calcilitas sin fósiles, y puede tener un arreglo imbricado, estratificación cruzada, los estratos; matriz esparsa.
25	Mudstone evaporítico-carbonatado laminado	Alternancia de carbonato cristalino fino (caliza, dolomita), estratos diagenéticamente deformados con cristales de evaporita (yeso).
26	Rudstone y packstone con pisoides	Acumulaciones de pisoides autóctonos y alóctonos, con variedad de formas, tamaños de milímetros a centímetros, densamente empaquetados, comúnmente cementados por cementos meteóricos. Los núcleos de los pisoides son usualmente pisoides rotos o cortezas de cemento.

Tabla 1. Microfacies SMF propuestas por Wilson (1975).

Microfacies tipo SMF			
RMF	NOMBRE	TIPO DE RAMPA	CARACTERÍSTICAS
1	Calcilita y <i>mudstone</i> con peloídes	Externa	Fragmentos esqueletales muy finos, espículas de esponjas.
2	<i>Mudstone</i> y <i>wackestone</i> arcilloso con bioturbación	Externa	Pocos foraminíferos aglutinados, ostrácodos y equinodermos.
3	<i>Wackestone</i> y <i>packstone</i> bioclástico con bioturbación	Externa	Diversos y abundantes fósiles (bivalvos, braquiópodos y equinodermos) y peloídes; granos esqueletales no desgastados.
4	<i>Wackestone</i> y <i>packstone</i> peloídal	Externa	Consiste de pequeños peloídes, pequeños litoclastos y bioclastos.
5	<i>Mudstone</i> pelágico	Externa	Contiene microfósiles planctónicos y fósiles nectónicos de mar abierto (ej: ammonites)
6	<i>Grainstone</i> peloídal y bioclástico	Externa	Gradado, laminado y con estratificación cruzada fina (tempestitas).
7	<i>Packstone</i> bioclástico	Media	Abundantes equinodermos, bivalvos y foraminíferos; granos esqueletales
8	<i>Packstone</i> y <i>wackestone</i> con bioturbación	Media	Contiene varios granos esqueletales, intraclastos, oncoídes y peloídes.
9	<i>Wackestone</i> , <i>packstone</i> y <i>floatstone</i> con bioclastos e intraclastos	Media	Con intraclastos micríticos y bioclastos derivados de rampa, puede contener algunas microbrechas.
10	Conglomerados de caliza	Media	Rampa distalmente empinada ( <i>rampa distalmente empinada</i> )
11	Margas con intraclastos y guijarros de caliza	Media	Rampa distalmente empinada ( <i>rampa distalmente empinada</i> )
12	<i>Boundstone</i> con corales	Media	Contiene <i>framestones</i> de corales y algas rojas.
13	<i>Wackestone</i> y <i>packstone</i> bioclástico con foraminíferos	Interna	Con abundantes foraminíferos grandes (ej: orbitolínidos)
14	<i>Wackestone</i> y <i>packstone</i> bioclástico con granos esqueletales	Interna	Con granos esqueletales, varios intraclastos y algunos ooides ( <i>near-shoal</i> )
15	<i>Floatstone</i> bioclástico	Interna	Con diversos materiales derivados de arrecifes, (cerca de arrecifes, corales, algas o fragmentos de bivalvos)
16	<i>Mudstone</i> , <i>wackestone</i> o <i>packstone</i> con foraminífero	Interna	Con abundantes foraminíferos miliólidos
17	<i>Wackestone</i> bioclástico con algas	Interna	Con algas verdes dasycladáceas
18	<i>Wackestone</i> bioclástico con ostrácodos	Interna	
19	Caliza o <i>mudstone</i> no bioturbado	Interna	
20	<i>Wackestone</i> y <i>packstone</i> bioclástico con algas calcáreas	Interna	Con foraminíferos bentónicos.
21	<i>Packstone</i> y <i>floatstone</i> con oncoídes	Interna	Oncoídes aglutinados, con granos esqueletales, sedimentarios y cuarzo terrígeno.
22	Caliza o <i>mudstone</i> dolomítico	Interna	Micrita finamente laminada; con escasos fósiles de ostrácodos y foraminíferos.
23	<i>Bindstone</i> fenestral	Interna	Fábrica de algas ramificadas en sedimento fino limo-lodo.
24	<i>Mudstone</i> y <i>packstone</i> intraclastos	Interna	
25	<i>Bindstone</i> con láminas de evaporitas y carbonatos	Interna	Contiene cristales evaporíticos (yeso).
26	<i>Grainstone</i> y <i>packstone</i> bioclástico de grano medio a grueso	Interna	Contiene varios granos esqueletales bentónicos.
27	<i>Grainstone</i> y <i>packstone</i> bioclástico	Interna	Compuesto de pocos granos esqueletales dominantes
28	<i>Floatstone</i> y <i>rudstone</i> bioclástico	Interna	Exhibe una fábrica altamente desordenada.
29	<i>Grainstone</i> con ooides	Interna	Presenta ooides concéntricos densamente empaquetados.
30	<i>Grainstone</i> y <i>packstone</i> con ooides y conchas	Interna	Presenta abundantes fragmentos de conchas.

Tabla 2. Microfacies tipo RMF para una rampa homoclinal tomada de Flügel (2004).

En este trabajo se propone para el área de estudio: una litofacies perteneciente a la Formación Proveedora, cuatro microfacies para la Formación Buelna; dos microfacies para la Formación Cerro Prieto y tres biofacies para la Formación El Gavilán.

## 10.2. LITOFACIES

Litofacies 1: Está compuesta por cuarzoarenitas de color blanco rosado, de forma masiva en estratos gruesos a muy gruesos, abundante fracturamiento y bioturbación, los clastos de tamaño menores a 2 mm (medio a grueso), de forma subangulosa a subredondeados, bien clasificados, granos soportados, presentan cementante sintaxial y pelicular, se considera texturalmente madura. Los componentes principales son cuarzo mayor al 95%, fragmentos de rocas (cuarzo policristalino y microcristalino) menor al 5%. Esta litofacies es característica por contener una gran abundancia de icnofósiles (*Arenicolites* isp., *Cruziana* isp., *Monocraterion* isp., *Skolithos* isp. y *Thalassinoides* isp.). El alto contenido de bioturbación e icnofósiles indican un ambiente litoral o de zona costera, intermareal - submareal, probablemente de la icnofacies de *Skolithos*. Esta litofacies está presente en la muestra FP1, FP2 y FP3 (Figura 15).



**Figura 15.** A. Cuarzoarenita con abundantes icnofósil (*Skolithos* isp), B. Cuarzoarenita con icnofósil (*Monocraterion* isp).

### **10.3. MICROFACIES**

Se realizó el análisis de microfacies de 16 láminas delgadas, correspondientes a las 11 muestras de la Formación Buelna, y 5 muestras para Formación Cerro Prieto (Figura 24). En la cual se obtuvieron 5 tipos de microfacies basadas en la caracterización litológica y el agrupamiento de diferentes fósiles (algas oncolíticas, agmatos, hiolítidos, trilobites y equinodermos).

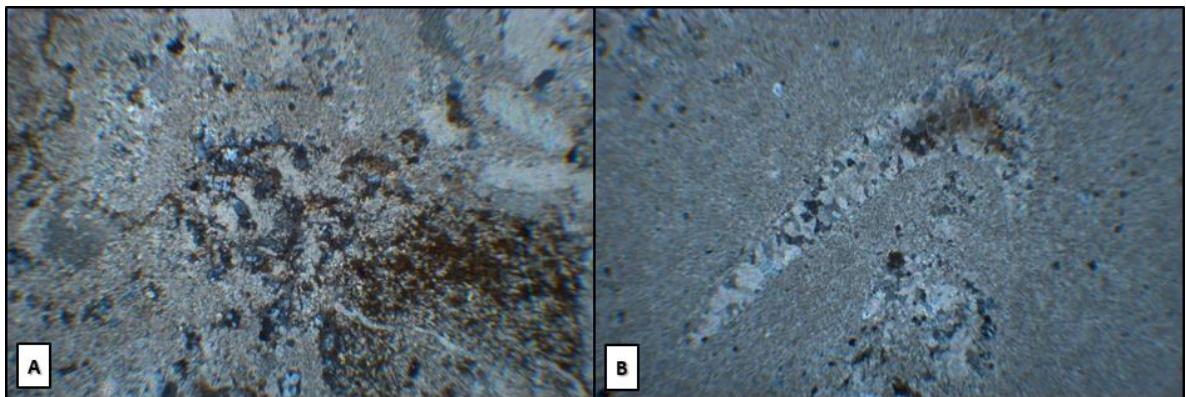
#### **10.3.1. FORMACIÓN BUELNA**

En la Formación Buelna se identificaron tres microfacies: caliza arenosa, floatstone con oncoides grandes y wackestone/packstone. Ver Tabla 3 y Figura 24.

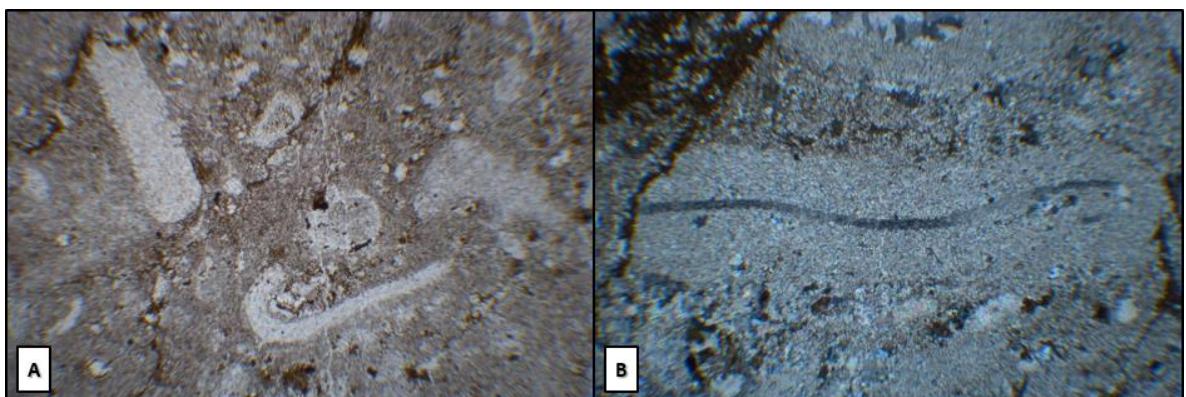
##### **Microfacies 1 (MF1): Caliza arenosa**

Está constituida por trilobites, hiolítidos, equinodermos, y fragmentos de roca, con aporte terrígeno y óxidos de fierro en un cemento esparítico. Algunos fragmentos de trilobites y hiolítidos se encuentran silicificados y otros recristalizados.

Esta microfacies es similar al tipo SMF 10 y un tipo RMF 27 desarrollada en una rampa interna de acuerdo con el modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye bioclastos recristalizados por esparita, principalmente se presenta una cementación tardía tipo blocky. Se asocia a un ambiente lagunar de circulación abierta Zona de Facies 7, según el modelo propuesto por Wilson, (1975). Esta microfacies está presente en la muestra S-01 (Figura 16 y 17).



**Figura 16.** A. Caliza arenosa con cortes de equinodermos, aporte terrígeno y estilolitas en una matriz de micrita, luz polarizada. B. Fragmento de hiolitido reecristalizado en una matriz de micrita, luz polarizada. Muestra S-01. Objetivo: 4x.

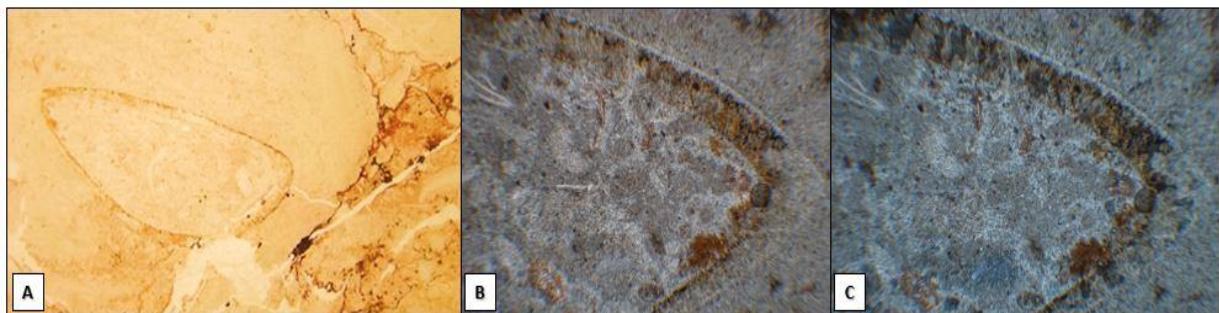


**Figura 17.** A. Caliza arenosa con fragmentos de equinodermos, trilobites, estilolitas y aporte terrígeno, en una matriz de micrita, luz natural. B. Caliza arenosa con intraclasto con trilobites, equinodermos, estilolitas y aporte terrígeno y en una matriz de micrita, luz polarizada. Muestra S-01. Objetivo: 4x.

#### Microfacies (MF2): Floatstone con oncoïdes grandes

Se compone de algas oncolíticas que van de 1 cm hasta 3 cm con abundantes fragmentos de que incluyen escasos fragmentos de trilobites y hiolítidos en una matriz de micrita parcialmente recristalizada a microesparita. Se presentan agmatos, hiolítidos, y placas de equinodermos que fueron sustituidas por óxidos de fierro.

Esta microfacies es similar al tipo SMF 22 y un tipo RMF 21 desarrollada en una rampa interna a media de acuerdo con el modelo propuesto por Flügel (2004) asociada a un ambiente plataforma restringida Zona de facies 8, según el modelo propuesto por Wilson (1975). Esta microfacies está presente en las láminas S-02, S-04 y S-10 (Figura 18; lamina 1, figuras 10-11).

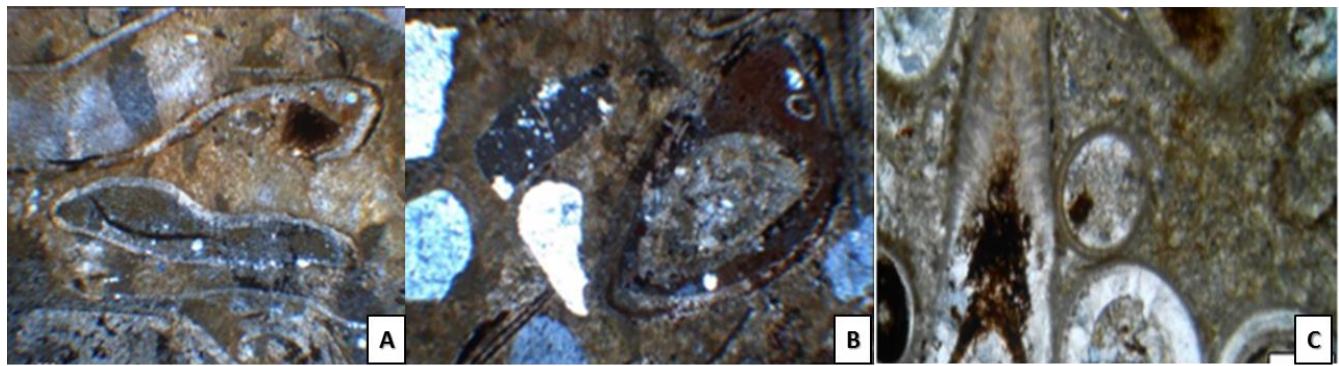


**Figura 18.** A. Floatstone con oncoides, donde se observa oxidación en los bordes de las partes centrales y externas. B. Fragmento de la parte central de un oncolito donde se observa oxidación en los bordes externos y recristalización en la parte central, en una matriz de micrita, luz natural. C. La misma imagen pero con luz polarizada, Muestra S-04. Objetivo: 4x.

#### Microfacies 3 (MF3): Wackestone/packstone

Está constituida por agmatos, trilobites, hiolítidos, equinodermos, y fragmentos de roca, con aporte de material terrígeno y óxidos de fierro en una matriz de micrita, con tamaño de grano arena fina. Algunos fragmentos de trilobites se encuentran silicificados y otros recristalizados.

Esta microfacies es similar al tipo SMF 09 y un tipo RMF 7 desarrollada en una rampa media de acuerdo con el modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye depósitos de organismos dominantes, carece de una matriz lodosa y se asocia a un ambiente de margen de plataforma de arrecifes, Zona de Facies 7, según el modelo propuesto por Wilson, (1975). Esta microfacies está presente en las láminas S-03, S-04, S-05, S-06, S-07, S-08 y S-09 (Figura 19; lamina 1, figuras 7-15; lámina 2).



**Figura 19.** A. Packstone con fragmentos de trilobites recristalizados y llenos de micrita y hiolítidos en una matriz de micrita. B. Wakestone con fragmento de hiolítidos oxidados y aporte terrígeno, en una matriz de micrita. C. Packstone con *Salterella* recristalizada y oxidada, en una matriz de micrita, Muestra S-06. Objetivo: 4x. LP.

Datos de Microfacies de: Cerro El Sahuaral (San José de Gracia, Sonora)												
FORMACIÓN BUELNA												
Unidad de Microfacies SJ		S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09	S-10	S-11
Textura	Mudstone										✓	
	Wackestone					✓			✓	✓		
	Floatstone	✓	✓		✓	✓			✓		✓	
	Packstone			✓			✓	✓				
	Grainstone											
	Rudstone											
	Framestone											
Dolomita					✓		✓	✓	✓			
Siliciclásticos		✓		✓		✓				✓		
Aloquímicos	Intraclastos											
	Cortoides											
	Oolitas											
	Pelets											
	Trilobites	S	S	F	S	S	A	A	A	S	S	
	Anélidos											
	Equinodermos	T	T	S	F	T	R	T	S		F	
	Braquiópodos											
	Esponjas											
	Salterella		T				T		T			
	Hiolítidos	T	S	T		T	T	A	T	A	T	
	Algas Oncolíticas	A		F							F	
Otros												
Partículas de terrígenas		A	S	F	S	F		R	R	T	T	A
Diagénesis	Cementante Temprano "A"	✓										
	Cementante Tardío "B"	✓	✓			✓		✓	✓		✓	
	Neomorfismo	Coalescivo										
		Inversión										
		Recristalización	✓		✓							
	Estilolitas		✓		✓					✓		
	Porosidad											
	Dolomitización											
	Dedolomitización											
	Silicificación	✓										
	Minerales autigénicos											
	Otros											

Tabla 3. Microfacies Fm. Buelna. Símbología: A Abundantes, F Frecuentes, S Escasos, R Raros, T Trazas.

### 10.3.2. FORMACIÓN CERRO PRIETO

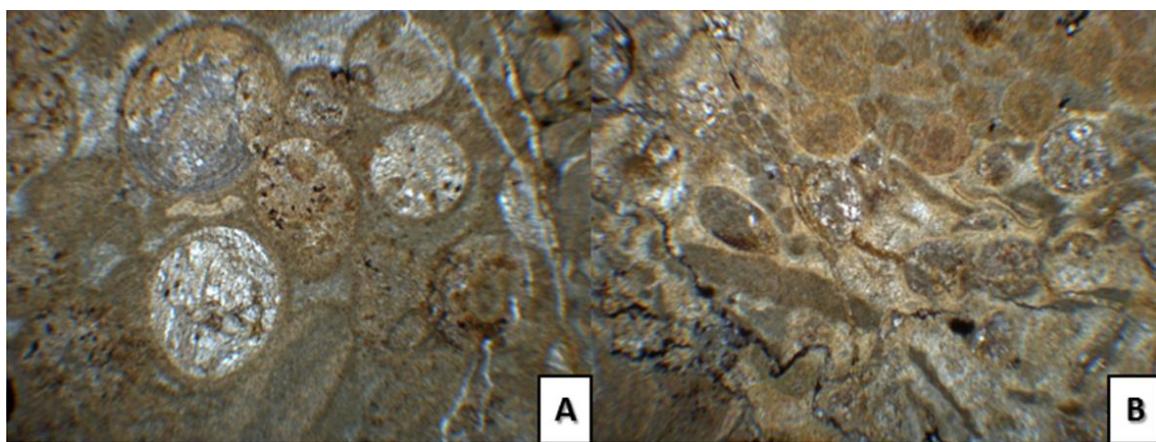
En la Formación Cerro Prieto se reconocieron dos microfacies: packstone y grainstone.

Ver Tabla 4 y Figura 22.

#### Microfacies 4 (MF4): Packstone/oomicrita

Pakstone (Dunham, 1962) y oomicrita (Folk, 1962), de color gris oscuro, constituida por abundantes ooides micritizados y escasos bioclastos. Estos últimos consisten de fragmentos de trilobites y placas de equinodermos. Los ooides consisten en oolitas superficiales en su mayor parte, y escasas oolitas normales. Se observan líneas estitolíticas perpendicular a la estratificación. Los procesos diagenéticos presentes son: micritización, cemento tipo B (granular), silicificación dentro de los oolitos, recristalización y oxidación.

Esta microfacies es similar al tipo SMF 10 y un tipo RMF 21 desarrollada en una rampa interna de acuerdo al modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye oolitas lo que indica que su depósito se efectuó en un ambiente de alta energía, pero contiene matriz lodosa y se asocia a un ambiente de plataforma abierta laguna Zona de facies 7, según el modelo propuesto por Wilson, (1975). Esta microfacies está presente en las láminas CP-1 y CP-3 (Figura 20; lámina 1, figuras 1 y 2).

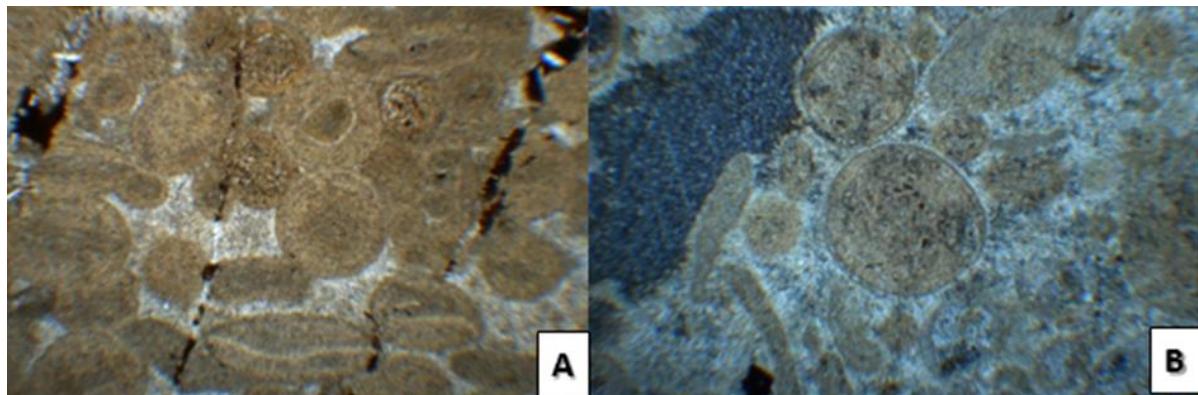


**Figura 20.** A. Packstone con oolitas normales y superficiales recristaliados en una matriz de micrita. B. Packstone con oolitas superficiales, fragmentos de trilobites y estitolitas en una matriz de micrita. Objetivo 4x. LP.

### **Microfacies 5 (MF5): Grainstone/ooesparita**

Grainstone (Dunham, 1962) y ooesparita (Folk, 1962), de color gris oscuro, con escaso cuarzo detrítico y trazas de bioclastos correspondientes a fragmentos de placas de equinodermos (cf. *Gogia*). Los ooides son más abundantes las oolitas superficiales y normales. Los procesos diagénéticos presentes son: cemento tipo B (granular), dolomitización, algunos ooides se encuentran oxidados y en menor proporción silicificados y ocasionales líneas estiolíticas.

Esta microfacies es similar al tipo SMF 15 y un tipo RMF 27 desarrollada en una rampa interna de acuerdo al modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye grainstone de ooides recratalizados bien seleccionados y bien formados y se asocia a un ambiente de borde de plataforma donde hay buena circulación de agua lo que indica que su depósito se efectuó en un ambiente de alta energía de Zona 6 según el modelo propuesto por Wilson, (1975). Esta microfacies está presente en las láminas CP-2, CP-4, CP-5 (Figura 20; lámina 1, figuras 4-6).



**Figura 21.** A. Grainstone con oolitas superficiales y micritizadas, estiololitas en un cemento de esparita. B. Grainstone con oolitas micritizadas, fragmento de equinodermos en un cemento de esparita. Muestra CP-4. Objetivo: 4x. LP.

Datos de Microfacies de: Cerro El Sahuaral (San José de Gracia, Sonora)					
FORMACIÓN CERRO PRIETO					
Unidad de Microfacies SJ		CP-1	CP-2	CP-3	CP-4
Número de muestra		CP-1	CP-2	CP-3	CP-5
Textura	Mudstone				
	Wackestone				
	Floatstone				
	Packstone	✓		✓	
	Grainstone		✓		✓
	Rudstone				
	Framestone				
Dolomita					
Siliciclásticos		✓			
Aloquímicos	Intraclastos	S	F	A	F
	Cortoides				
	Oolitas	S	A	A	A
	Pelets				
	Trilobites	R	S	T	S
	Anélidos				
	Equinodermos	S			T
	Braquiópodos				
	Esponjas				
	Salterella				
	Hiolítidos				
	Algas Oncolíticas		T		
Otros					
Partículas de terrígenas		S			
Diagénesis	Cementante Temprano "A"				
	Cementante Tardío "B"	✓	✓	✓	
	Neomorfismo	Coalescivo			
		Inversión			
		Recristalización			✓
	Estilolitas	✓	✓	✓	✓
	Porosidad				
	Dolomitización				
	Dedolomitización				
	Silicificación				
	Minerales autigénicos				
	Otros				

Tabla 4. Microfacies Fm. Cerro Prieto. Simbología: A Abundantes, F Frecuentes, S Escasos, R Raros, T Trazas.

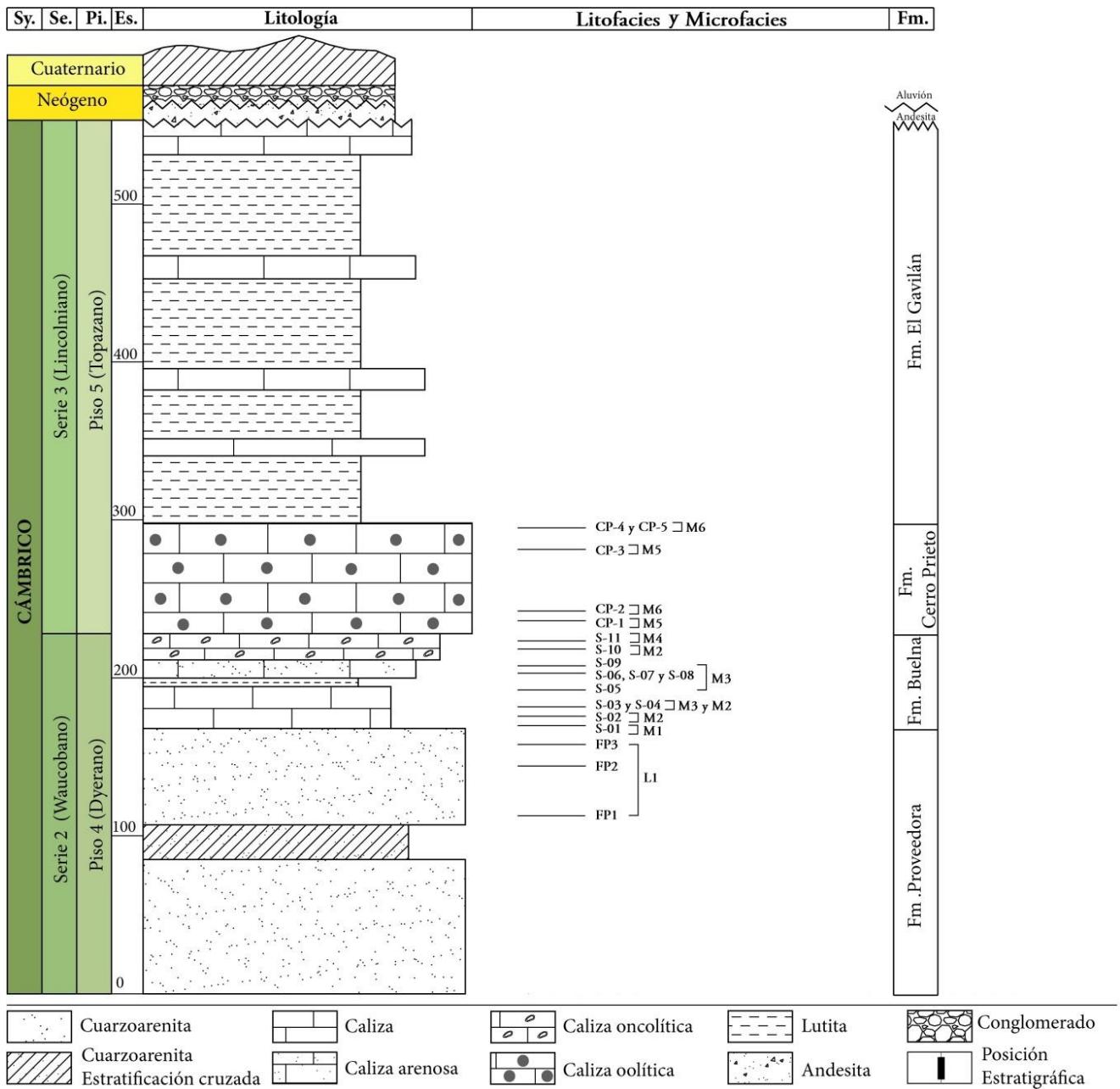


Figura 22. Columna estratigráfica del Cámbrico del área del Sahuaral mostrando la distribución de las muestras con sus respectivas microfacies.

#### 10.4. INTERPRETACIÓN DE MICROFACIES

Con base al arreglo textural y el contenido aloquímico determinados en el estudio de las microfacies de la Formación Buelna sugieren cambios en el nivel del mar. Las facies calcáreas

indican que la secuencia fue depositada en una sucesión del ambiente de plataforma abierta lagunar al de plataforma restringida. El ambiente de plataforma abierta lagunar consistió en aguas relativamente estancadas representado por trilobites bentónicos, equinodermos y hiolítidos, cambiando a plataforma restringida, la cual incluye componentes de aguas someras como los oncoídes, retornando a la posición de plataforma abierta lagunar de aguas moderadamente agitadas a alta energía, esto sustentado por la abundancia de trilobites bentónicos y hiolítidos.

La Formación Cerro Prieto se depositó en aguas tranquilas en una plataforma lagunar, migrando a plataforma retrabajada con energía de moderada a alta, donde se presentaron trilobites (Figura 23).

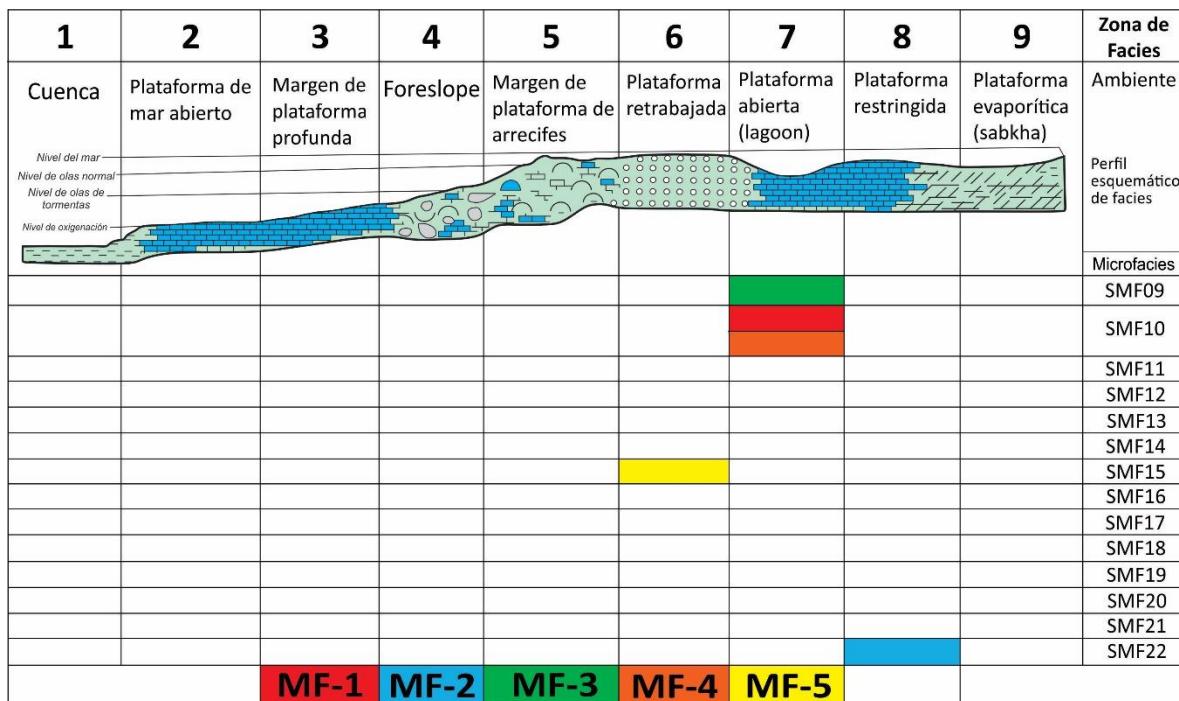


Figura 23. Localización de las facies utilizando los modelos de Flügel y Wilson (2004).

## 10.5. BIOFACIES

El término biofacies se refiere a todas las características biológicas del cuerpo rocoso (Moore 1949), para el presente trabajo se ha sido utilizado de dos maneras: en un sentido

estratigráfico refiriéndose a un cuerpo de roca, el cual se caracteriza por el contenido fósil que lo distingue de las partes contiguas de la roca, y en un sentido ecológico para hacer referencia a la biota que caracterizan una parte o el cuerpo rocoso. Con el análisis taxonómico, se definieron las siguientes biofacies en la Formación El Gavilán y de acuerdo con lo descrito respecto a las características litológicas y paleontológicas se proponen las biofacies.

Biofacies 1: Ausencia de trilobites. Es la primera biofacies que se encuentra en la Formación El Gavilán (base) caracterizándose por la ausencia de trilobites; no obstante, existe asociación biótica representada por grupo de chancellóridos como *Chancelloria eros*, *Allonia tintinopsis* y *Archasterella* sp., braquípodos inarticulados como *Lingulella proveedorensis*, *Linnarsonia ophirensis*, *Dictyonina minutipuncta*, *Dictyonina onratella*, y hiolítidos como *Haplophrentis reesei*. Desde el punto de vista litológico se caracteriza por la abundancia de lutita color rojo, y la presencia de chancelóridos y braquípodos linguliformes corrobora la abundancia y distribución global de estos organismos en ambientes marinos someros y cálidos del Periodo Cámbrico (Cuen *et al.*, 2013) (Figura 24).

Biofacies 2: *Ptychagnostidae - Tomagnostus*. Esta biofacies representa la parte intermedia de la Formación El Gavilán y se caracteriza por la abundancia de diversos géneros de trilobites miómeros asociados como *Tomagnostus* sp., *Pagetia* sp., *Quadragnostus depressa* y los trilobites poliméridos *Oryctocephalus reynoldsi*, *Oryctocephalus* sp., *Tonkinella flabelliformis*, *Tonkinella valida* y *Ptychoparella (Elrathina) antiqua*; sin embargo, *Tomagnostus* representa el género de esta biofacies debido a que únicamente presenta en este intervalo, de ahí el nombre de la biofacies. El grupo de chancellóridos y braquípodos linguliformes siguen presentándose en esta biofacies, la cual, está distribuida en una secuencia de lutita con intercalación de caliza, y es considerada de un ambiente de plataforma exterior (Figura 25).

Biofacies 3: *Corynexochina - Tonkinella, Oryctocephalus*. Esta asociación biótica es común en la parte superior de la Formación El Gavilán, donde predominan trilobites de la familia *Oryctocephalidae* como *Oryctocephalus reynoldsi*, *Oryctocephalus* sp., *Tonkinella flabelliformis*, *Tonkinella valida* y ptychopariidos como *Ptychoparella (Elrathina) antiqua*. Esta

biofacies se caracteriza por la ausencia de chancellóridos y braquiópodos linguliformes y trilobites miómeros, representando una plataforma de mar abierto (Figura 26).

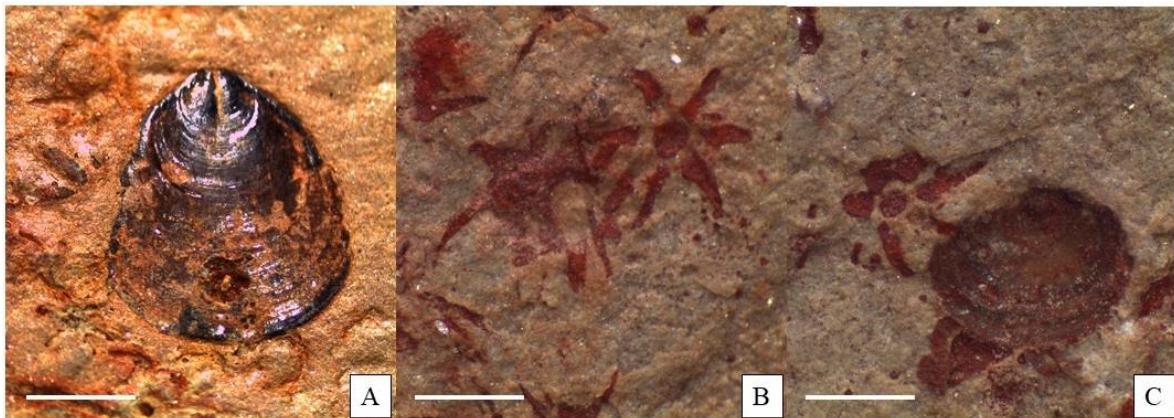


Figura 24. Biofacies 1: A) *Lingullela proveedorensis*. B) *Chancelloria eros*. C) Chancellóridos y braquiópodos linguliformes.

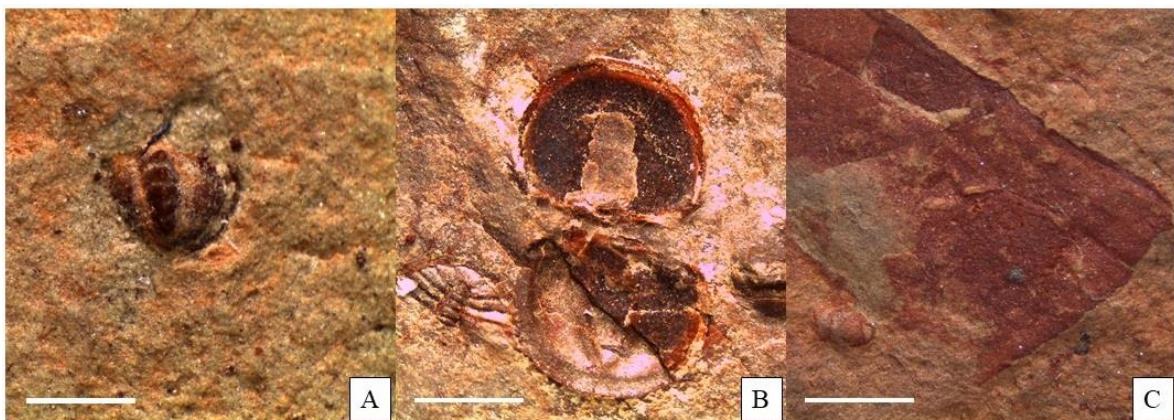
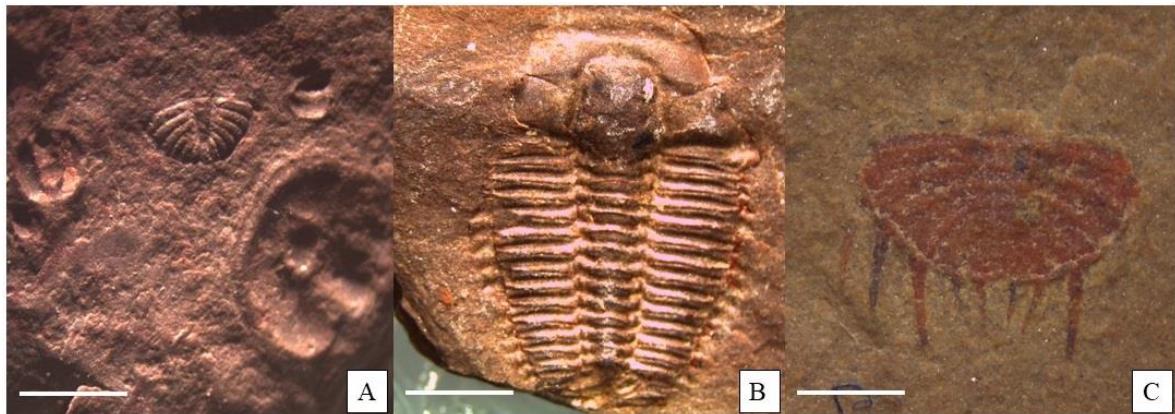


Figura 25. Biofacies 2: A) *Pagetia* sp. B) *Tonkinella valida* (izquierda) y *Quadragnostus depressa* (centro). C) *Haplophrentis reesei* (derecha).



**Figura 26.** Biofacies 3: A) *Tonkinella flabelliformis* (Centro) y *Quadragnostus depressa* (Derecha). B) *Ptychoparella (Elrathina) antiqua*. C) *Oryctocephalus reynoldsi*.

## 11. PALEOICNOLOGÍA SISTEMÁTICA

### Icnogénero *Arenicolites* Salter, 1875

**Diagnosis:** Madrigueras simples, posiblemente hechas por vermes, que producen cavidades verticales en forma de “U”, gruesas o delgadas, perpendiculares al plano de estratificación y conservados como relieve completo en vistas en sección transversal. La presencia de aberturas en pares podría estar relacionada con *Arenicolites*.

**Icnoespecie tipo:** *Arenicola carbonaria* Binney, 1852

*Arenicolites* isp.

**Ocurrencia:** Escasa, Formación Proveedora, Cámbrico inferior, Icnofacies de *Skolithos*.

**Distribución geográfica:** Europa, Norteamérica (Häntzschel, 1962) y África (Seilacher, 1990).

**Discusión:** El icnogénero *Arenicolites* corresponde a un representante cosmopolita, frecuentemente asociado a *Diplocraterion*, siendo distintos por la ausencia de la perturbación de tipo *Spreite*; el producto del desplazamiento vertical o lateral de una cavidad (Fürsich, 1974a). Comúnmente se interpreta como un dominio de los organismos con forma de gusano,

asociados a poliquetos y enteropneustos, que se alimentan por suspensión en ambientes marinos, generalmente de poca profundidad (Fürsich, 1974b; Bromley, 1996).

#### Icnogénero *Cruziana* d'Orbigny, 1842

**Diagnosis:** Estructuras alargadas y rastros cubiertos por rasguños en forma de espinas o transversales, con o sin zonas lisas o rasguños longitudinales periféricos a los rasguños internos, con o sin crestas laterales o con marcas difusas si es un hiporelief, interpretados como pistas de locomoción o desplazamiento de un artrópodo trilobitomorfo. Se presentan surcos de bilobatos con estrías transversales en forma de “V”, por lo tanto, estaría relacionado con madrigueras bilobuladas (Keighley y Pickerill, 1996).

#### Icnoespecie tipo: *Cruziana furcata* Seilacher, 1955

#### *Cruziana* isp.

**Ocurrencia:** Escasa, Formación Proveedora, Cámbrico inferior, Icnofacies de *Skolithos*.

**Distribución geográfica:** Cosmopolita.

**Discusión:** *Cruziana* ha sido interpretado como un icnofósil asociado a trilobites como organismos productores, y también a otros artrópodos. Los trilobites invertebrados bentónicos se destacan por ser los más abundantes y comunes durante el Cámbrico (Sour-Tovar *et al.*, 2018). Por otro lado, existen interpretaciones que asocian a *Cruziana* como resultado de hábitos de depredadores, carroñeros y detritívoros, estructuras superficiales que dejaron trilobites olenélidos (Fortey y Owens, 1999).

#### Icnogénero *Monocraterion* Torell, 1870

**Diagnosis:** Madrigueras verticales simples sin recubrimiento, liso ó comúnmente anulado, aberturas con forma de embudo, no tan abundante como *Skolithos* (Hass *et al. in* Moore *et al.*, 1962).

Icnoespecie tipo: *Tigilites dufrenoyi* Häntzschel 1975

*Monocraterion* sp. (Figura 27).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación Proveedora, Cámbrico inferior, Icnofacies de *Skolithos*.

**Distribución geográfica:** India, Polonia, España y Norteamérica (Rai & Singh, 1983; Orlowski, 1989; Hagadorn & Fedo, 2000).

**Discusión:** *Monocraterion* se diferencia claramente de *Skolithos* en mostrar estructuras tubulares radiales. (Alpert, 1974; Jensen, 1997; Schlirf & Uchman (2005). Jensen (1997) y Schlirf & Uchman (2005) sugirieron la restricción de *Monocraterion* al holotipo, una decisión que está respaldada por autores posteriores (Mángano *et al.*, 2005; Desjardins *et al.*, 2010). Además, se ha propuesto que una parte superior con forma de embudo no es una icnotaxobase adecuada en madrigueras verticales simples, ya que se trunca fácilmente por la erosión y puede representar una modificación abiótica por las corrientes (Fürsich, 1974b). En lechos densamente bioturbados que también contienen *Arenicolites* isp., Una vista del plano de la cama no permite la distinción entre *Skolithos linearis* y *Arenicolites* isp.



Figura 27. *Monocraterion* isp.

Icnogénero *Skolithos* Haldeman, 1840

Icnoespecie tipo: *Fucoides ?linearis* Haldeman, 1840

**Diagnosis:** Tubos verticales en areniscas, diámetro aproximado de 0.2 a 1 cm, generalmente rectos, nunca ramificados; rara vez con anulaciones (Hass *et al.* in Moore *et al.*, 1962).

*Skolithos* isp. (Figura 28).

**Ocurrencia:** Abundante, Formación Proveedora, Cámbrico inferior, Icnofacies de *Skolithos*.

**Distribución geográfica:** Europa, América, Groenlandia y Tasmania (Häntzschel, 1962).

**Discusión:** Por lo general, este icnofósil se encuentra en arenisca. Se interpretan que las madrigueras fueron la dominancia de vermes que presentaban hábitos suspensívoros, excavando túneles para esconderse de los depredadores y para obtener una posición vertical en la interfaz sedimento-agua. La posición vertical beneficia al organismo debido a que le permite filtrar las partículas de la columna de agua (Azizi *et al.*, 2017). Pemberton *et al.* (1992) consideran que estos icnofósiles son los que determinan a la icnofacies *Skolithos*, correspondiendo a medios depositacionales de elevada energía hidrodinámica y transporte.



Figura 28. *Skolithos* isp. Escala=2 cm.

Icnogénero *Thalassinoides* Ehrenberg, 1944

**Diagnosis:** Cuevas y sistemas de madrigueras en ejes cilíndricos verticales o inclinados y túneles horizontales, solitarios, rectos o formando ramnificaciones. Las madrigueras son cilíndricas, entre 2 a 20 cm de diámetro. Ramas regulares que se presentan en formas “Y” o “T” con sus diámetros en aumento en los sitios de bifurcación para formar bulbos e inflaciones irregulares (Kennedy, 1967).

**Icnoespecie tipo:** *Thalassinoides callianassae* Ehrenberg, 1944

*Thalassinoides* isp.

**Ocurrencia:** Escasa, Formación Proveedora, Cámbrico inferior, Icnofacies de *Skolithos*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica, Europa y Asia.

**Discusión:** *Thalassinoides* se presenta en una gran variedad de sustratos como lutita, arenisca, conglomerado, caliza y dolomía. Es posible confundir *Thalassinoides* con otras madrigueras grandes y pasivamente llenas como *Spongeliomorpha*, *Psilonichnus* y *Parmaichnus* (verticalmente en forma de “Y”) y *Camborygma*. Por otro lado, las madrigueras llenas activamente podrían ser similares a *Planolites*, *Asterosoma* e incluso *Artichnus* (Knaust, 2017). *Thalassinoides* es un componente común de la icnofacies *Cruziana*, donde ocurre en sustratos relativamente cohesivos (Knaust, 2017).

## 12. PALEONTOLOGÍA SISTEMÁTICA

Phylum Cyanobacteria Stanier y Cohen, 1977

Subphylum Hormogonopyceae Elenkin, 1938

Familia Girvanellaceae Luchinina, 1975

Género *Girvanella* Nicholson y Etheridge, 1878

Especie tipo: *Girvanella problematica* Nicholson y Etheridge, 1878

**Diagnosis:** Filamentos cilíndricos de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$  de diámetro externo, simples o ligeramente enredados; unido al sustrato con un soporte curvo o sinuoso (Peel, 2018). Las especies del género *Girvanella* son algas o cianobacterias que segregan caliza. Estas estructuras oncolíticas forman pequeñas masas calcáreas nodulares compuestas de pequeños tubos enlazados.

*Girvanella* sp. (Figura 29).

**Ocurrencia:** Abundante, Formación Buelna, Cámbrico inferior, Zona de *Bristolia mohavensis - Bristolia insolens*.

**Distribución geográfica:** Cosmopolita.

**Discusión:** *Girvanella* se refiere a microfósiles tubulares generalmente relacionados con cianobacterias y no con estructuras sedimentarias (Riding, 1975; Beraldí *et al.*, 2013). La presencia de oncolitos en las rocas sedimentarias del Cámbrico en México demuestra la amplia distribución geográfica que tales microbialidades lograron en el pasado y, por lo tanto, la importancia significativa de los microbios en los procesos sedimentarios y biogeoquímicos a lo largo del tiempo. Las oncolitas fósiles se conocen desde el Precámbrico hasta la actualidad y marcan un episodio importante de desarrollo de sedimentos microbianos en esta parte del sur de Laurentia en el Cámbrico Inferior (Beraldí *et al.*, 2013).



Figura 29. *Girvanella* sp. Escala=2 mm.

Phylum Incertae sedis

Clase Coeloscleritophora Bengston y Missarzhevsky, 1981

Orden Chancelloriida Walcott, 1920

Familia Chancelloriidae Walcott, 1920

Género *Chancelloria* Walcott, 1920

Especie tipo: *Chancelloria eros* Walcott, 1920

*Chancelloria eros* Walcott, 1920 (Figura 30)

**Diagnosis:** Escleritos con rayos cilíndricos que se adelgazan hacia los extremos. Los escleritos son simétricamente radiales y tienen predominantemente siete rayos (7+1) más uno vertical, algunos pueden tener cuatro a más de ocho radios laterales, parcialmente de tamaño diferente, organizados en planos horizontales, los cuales pueden distar curvadamente hacia el exterior; los radios horizontales pueden sobresalir verticalmente, pero en algunas ocasiones están ausentes (Janussen *et al.*, 2002; Cuen *et al.*, 2013).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Cosmopolita.

**Discusión:** Los chancelóridos son considerados como un grupo problemático del Cámbrico. Walcott (1920) describió los primeros escleritos y fragmentos de chancelóridos, y los incluyó en la Clase Heteractinellida, dentro del phylum Porifera (Janussen *et al.*, 2002; Cuen *et al.*, 2013). Posteriormente, investigaciones revelaron que el modo de crecimiento de los escleritos de este organismo es diferente al presente en las esponjas, posicionándolo al grupo extinguido Coeloscleritophora (Bengtson & Missarzhevsky, 1981; Cuen *et al.*, 2013). Beresi *et al.* (2019) menciona que la fauna de chancelóridos de la Formación El Gavilán en el área El Sahuaral presenta afinidad con la biota de la misma formación en el Cerro El Chihuarrita de

San José de Gracia, Sonora, Burgess Shale y la Formación Marjum y Wheeler Shale de Utah, EUA. (Beresi *et al.*, 2019).

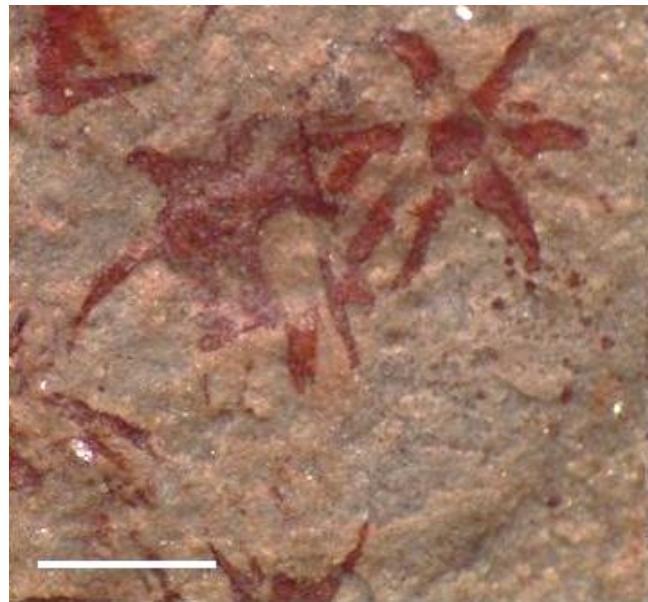


Figura 30. Escleritos de *Chancelloria eros*. Escala=2 mm.

Phylum Brachiopoda Duméril, 1806

Subphylum Linguliformea Williams *et al.*, 1996

Clase Lingulata Gorjansky & Popov, 1985

Orden Lingulida Waagen, 1885

Superfamilia Linguloidea Menke, 1828

Familia Obolidae King, 1846

Subfamilia Obolinae King, 1846

Género *Lingulella* Salter, 1864

Especie tipo: *Lingulella davisii* M'Coy, 1851

*Lingulella proveedorensis* Cooper in Cooper *et al.*, 1952 (Figura 31).

**Diagnosis:** Concha pequeña para el género, alargada, con la longitud igual a aproximadamente 1.5 veces el ancho; ornamentada con finas líneas de crecimiento y ondulaciones concéntricas; valva pedicular atenuada y con rostro agudamente puntiagudo, valva braquial desigualmente convexa en perfil lateral y con el máximo de convexidad en el tercio posterior (Cooper *et al.*, 1952).

**Ocurrencia:** Escasa. Formación El Gavilán. Cámbrico medio. Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Cosmopolita.

**Discusión:** Son escasas las especies de *Lingulella* conocidas del Cámbrico inferior (Cooper *et al.*, 1952). Se han descrito cerca de 100 especies para este género, la mayoría mal preservadas o representadas por un solo ejemplar, asimismo el rango estratigráfico y su distribución geográfica aún es cuestionada (Streng *et al.*, 2011). Cooper *et al.* (1952, 1956) documentaron la especie *Lingulella proveedorensis* del Cámbrico inferior de la Formación Puerto Blanco en el área de Caborca. Según el autor, dicha especie es similar a *L. gravillensis* Walcott, en tamaño y proporciones, pero tiene más atenuada la valva pedicular, y la valva braquial con los hombros más anchos. Almazán-Vázquez identificó especies de *Lingulella* en la Formación El Mogallón en la región de Arivechi, Sonora (Almazán-Vazquez, 1989).



Figura 31. *Lingulella proveedorensis*. Escala=2 mm.

Orden Acrotretida Kuhn, 1949

Superfamilia Acotretoidea Schuchert, 1893

Familia Acrotretidae Schuchert, 1893

Género *Linnarsonia* Walcott, 1885

Especie tipo: *Obolella transversa* Hartt, 1868

*Linnarsonia ophirensis* Walcott 1902 (Figura 32).

**Diagnosis:** *Linnarsonia ophirensis* Walcott 1902, se caracteriza por su convexidad y la altura relativa de su pseudointerárea ventral, que es ampliamente triangular y profundamente cóncava en perfil transversal, con una extensa depresión mediana y pequeña pero distintas características estriadas. por su convexidad y la altura relativa de su pseudointertarea ventral (Zell & Rowell, 1988).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Asia central, Reino Unido y Utah.

**Discusión:** *Linnasornia ophirensis* se extiende desde la base de la Zona de *Ptychagnostus gibbus* hasta la Zona de *Ptychagnostus atavus* (Babcock *et al.*, 2006; Engelbretsen & Peng, 2007). Almazán-Vázquez reporta la presencia de *Linnasornia ophirensis* en asociación con especies de trilobites y espícululas de esponja en el miembro A de la Formación El Mogollón en la región de Arivechi, Sonora (Almazán-Vazquez, 1989).



**Figura 32.** *Linnasornia ophirensis*. Escala=2 mm.

Familia Acrothelidae Walcott y Schuchert, 1908

Género *Acrothele* Linnarsson, 1876

**Diagnosis:** Valvas desiguales en profundidad, circulares en contorno; la valva pedicular es un cono irregular, con foramen pequeño, redondeado en el declive posterior; interior con dos troncos paleales ampliamente divergentes. Valva braquial moderadamente convexa en los perfiles lateral y anterior. Superficie marcada por líneas concéntricas y por un tamiz tupido de pústulas pequeñas (Cooper *in* Cooper *et al.*, 1956).

**Especie tipo:** *Acrothele coriacea* Oehlert, 1887

*Acrothele* sp. (Figura 33).

**Ocurrencia:** Abundante, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Cosmopolita.

**Discusión:** *Acrothele* es un género cosmopolita representado por abundantes especies y que es común en el Cámbrico medio (Rowell, 1980; Peel, 1988). En México, Cooper *et al.* (1952) identifica y describe la especie *Acrothele concava* del Cámbrico medio de la Formación Arrojos en la región de Caborca; asimismo, Almazán-Vázquez (1989) documenta la especie en el Cámbrico superior de la Formación La Huerta en la región de Arivechi, en asociación con *Micromitra* sp., *Prototreta attenuata* y lingúlidos indeterminados, como también trilobites indeterminados.



Figura 33. *Acrothele* sp. Escala=2 mm.

Clase Paterinata Williams *et al.*, 1996

Orden Paterinida Rowell, 1965

Familia Paterinidae Schuchert, 1893

Género *Dyctyonina* Cooper, 1942

Especie tipo: *Trematis pannulus* White, 1874

*Dictyonina minutipuncta* Cooper in Cooper et al., 1952 (Figura 34).

**Diagnosis:** Concha grande para el género, transversalmente elíptica en contorno; biconvexa en perfil; márgenes lateral y anterior redondeados; superficie marcada por ondulaciones de crecimiento concéntricas y finas líneas de crecimiento, arrugas radiales irregularmente dispuestas y, posiblemente, producidas por escorrimiento de la caliza y pequeñas depresiones estrechamente reunidas y transversalmente elípticas (Cooper in Cooper et al., 1952).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica, Europa y Australia (Liñán & Mergl, 2001; Laurie, 1987; Hunt & Mabey, 1966; Cooper et al., 1952).

**Discusión:** Los géneros *Paterina*, *Micromitra* y *Dictyonina* son más abundantes cerca del inicio del Cámbrico medio, persistiendo hasta el Paibiano del Furongiano temprano (Popov et al., 2009; Mergl y Kraft, 2016). Posteriormente, con su desaparición en el Furongiano comenzó un lento declive del grupo. Liñán & Mergl (2001) reportaron el género *Dictyonina* del Cámbrico de las Cadenas Ibéricas de España. Laurie (1987) estudió los detalles preservados de la musculatura y los sistemas vasculares en braquíópodos del Cámbrico, identificando aff. *Dictyonina* sp. en la Cuenca Amadeus, Australia central. Cooper (1942) estableció el género *Dictyonina*, describiendo lo similar que resulta a *Paterina* y *Micromitra* en contorno, perfil y homeodeltidio. Identificó las especies *Dictyonina minutipuncta* y *Dictyonina* sp. en la Formación Arrojos en la región de Caborca, Sonora.

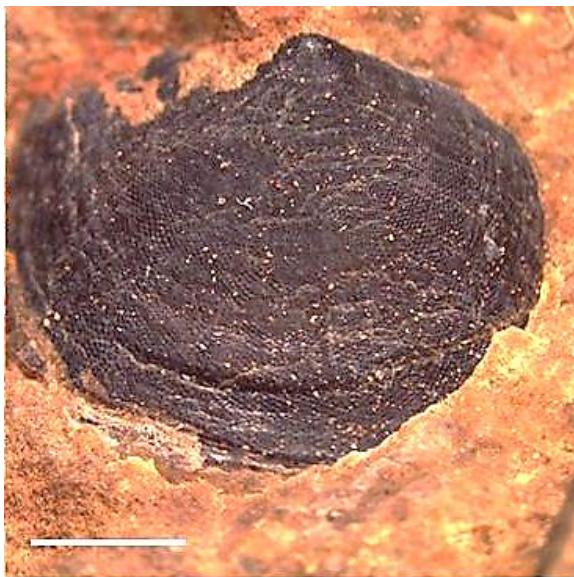


Figura 34. *Dictyonina minutipuncta*. Escala=2 mm.

*Dictyonina ornatella* Linnarsson, 1876 (Figura 34).

**Diagnosis:** Especies de *Dictyonina* caracterizadas por un gran homeodeltirio que cubre casi por completo el deltirio, un contorno transversal de la cáscara, una ornamentación concéntrica gruesa y distintas articulaciones radiales (Liñán & Mergl, 2001).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Noruega, Escudo Báltico, Norte de Europa (Martinsson, 1968; Brunton & Harper, 2000).

**Discusión:** Martinsson (1968) reportó fósiles del Cámbrico interesantes desde el punto de vista ecológico y paleogeográfico en Las islas Åland, Finlandia. La fauna del Cámbrico medio está comprendida por trilobites y braquiópodos, destacando la presencia de *Dictyonina ornatella*. Brunton & Harper (2000) indican la presencia de *Dictyonina ornatella* en calizas del Cámbrico medio en la localidad de Ritland, Noruega occidental.



**Figura 35.** *Dictyonina ornatella*. Escala=2 mm.

Phylum Mollusca? Linnaeus, 1758

Clase Hyolitha Marek, 1963

Orden Hyolithida Matthew 1962

Familia Hyolithidae Nicholson, 1872

Género *Hyolithes* Eichwald, 1840

**Diagnosis:** Los hiolítidos se caracterizan por poseer una concha cónica o subpiramidal, de simetría bilateral y compuesta de aragonita. En la parte anterior se presenta una abertura que se cierra mediante un opérculo, poseen dos piezas calcáreas y ligeramente asimétricas llamadas helen, articulados en el interior del opérculo y que por lo general no se conservan (Sabattini *in* Camacho, 2007).

**Discusión:** La posición sistemática de los hiolítidos ha sido frecuentemente discutida, la mayoría de las veces siendo considerados como una clase extinta de moluscos, o lofoforádos del Cámbrico al Pérmico. Sin embargo, se ha definido que cuenta con el aparato filtrador

lofóforo, mismo que poseen los braquiópodos mediante el cual se alimentan y respiran (Moysiuk *et al.*, 2017). Estudios recientes describen a un nuevo género y especie de hiolítido ortothecido, *Pedunculotheca diania*, que presenta una estructura de unión no mineralizada que se asemeja al pedúnculo de los braquiópodos, siendo el primer reporte de un órgano peduncular en hiolítidos (Sun *et al.*, 2018).

**Especie tipo:** *Hyolithes acutus* Eichwald, 1840

*Hyolithes sonora* Lochman, 1952 (Figura 36).

**Diagnosis:** Concha cónica, recta, la superficie dorsal casi plana (muy ligeramente convexa) y la superficie ventral frecuentemente convexa; sección transversal con ángulos laterales agudos, el diámetro dorsoventral en la línea media mide dos tercios de la longitud del lado dorsal. Superficie externa del lado dorsal cruzada por líneas de crecimiento usuales. Arqueadas y estrechamente espaciadas. Superficie del molde interno cruzada por innumerables estrías muy finas y concéntricas; varios rebordes longitudinales estrechos aparecen a los lados de los márgenes externos en las conchas menores (Lochman *in Cooper et al.*, 1952).

**Ocurrencia:** Abundante, Formación Buelna, Cámbrico inferior, Zona de *Bristolia mohavensis - Bristolia insolens*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica.

**Discusión:** Lochman *in Cooper et al.* (1952) propone la especie *Hyolithes sonora* que procede de la Formación Arrojos del área de Caborca, Sonora, asociándola con 10 o más ejemplares de la zona *Glossopleura-Kootenia*, mencionando a su vez lo complicado que es comparar *H. sonora* con las otras especies de *Hyolithes* descritas del Cámbrico medio debido a la mala conservación.



**Figura 36.** *Hyolithes sonora*. Escala=2 mm.

Género *Haplophrentis* Babcock y Robison, 1988

Especie tipo: *Haplophrentis reesei* Babcock y Robison, 1988

*Haplophrentis reesei* Babcock y Robison, 1988 (Figura 37).

**Diagnosis:** Hiolítido con septo dorsomedial débil y longitudinal en concha. Surcos longitudinales laterales pareados individualmente en el dorso y en el ventrículo. Líneas de crecimiento estrechamente espaciadas en concha fina; transverso en el dorso, sumamente arqueado en venter. Ángulo apical inicial de 15°-18°, expandiéndose a 22°-30°. Angulo apical del escudo cónico 95°-110°. Rugas en escudo cónico sutil y comarginal (Babcock y Robison, 1988).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación Buelna, Cámbrico inferior, Zona de *Bristolia mohavensis* - *Bristolia insolens*. Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica, México, Groenlandia, Sudamérica, norte de Europa, Asia y noreste de Australia (Buitrón *et al.*, 2017).

**Discusión:** *Haplophrentis reesei* fue descrita para el Cámbrico medio de la Spence Shale localizada al norte de Utah, Estados Unidos de Norteamérica (Babcock y Robison, 1988). Buitrón *et al.* (2017) describieron por primera vez la especie *Haplophrentis reesei* para el Cámbrico de México, indicando que existió una amplia provincia faunística que comprendió Norteamérica, México, Groenlandia, Sudamérica, norte de Europa, Asia y noreste de Australia que formaba parte del océano Pantalásico.



**Figura 37.** *Haplophrentis reesei*. Escala=2 mm.

Phylum Arthropoda Von Siebold, 1848

Subphylum Trilobitomorpha Moore, 1959

Clase Trilobita Walch, 1771

Orden Agnostida Salter, 1864

Suborden Agnostina Salter, 1864

Superfamilia Agnostoidea M'Coy, 1849

Familia Spinagnostidae Howell, 1935

Género *Quadragnostus* Howell, 1935

Especie tipo: *Quadragnostus solus* Howell, 1935

*Quadragnostus depressa* (Westergard, 1946) Naimark, 2012 (Figura 38).

**Diagnosis:** Cefalón subcuadrado a subcircular y moderadamente convexo, parecido a *Peronopsis*; lóbulo posterior de la glabela con márgenes laterales paralelos o expandiéndose ligeramente, redondeados en la parte anterior. Glabela cercana a lados paralelos pero puede afilarse o expandirse ligeramente hacia la parte anterior. Surco F3 marcado o ligeramente inclinado hacia la parte posterior. Surco F2 ausente o muy débil. Presencia de nódulo medio en el punto medio de la posteroglabela. Presencia de surco del cefalón como en el pigidio, relativamente amplio. Pigidio subcuadrado a subcircular. Eje amplio, variable en tamaño. Surcos F1 y F2 débiles o ausentes. Nódulo medio grande, comúnmente elongado terminando cerca del margen posterior (Robison, 1982).

**Ocurrencia:** Abundante, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica.

**Discusión:** Aunque se creía que *Quadragnostus* era un sinónimo menor de *Peronopsis*, se reconoció que Quadragnostidae Howell, de 1935, tenía prioridad sobre Peronopsidae Westergard (1936), y por lo tanto se promovió para cubrir muchos géneros previamente clasificados como Spinagnostidae. Por lo tanto, una racionalización objetiva produjo la clasificación básica de los trilobites agnóstoides que, en forma ligeramente modificada, se utilizan actualmente (Shergold *et al.*, 1990).



**Figura 38.** *Quadragnostus depressa* (centro), *Tonkinella valida* (izquierda) y *Ptychoparella (Elrathina) antiqua* (derecha). Escala=2 mm.

Familia Diplagnostidae Whitehouse, 1936

Género *Tomagnostus* Howell, 1935

**Diagnosis:** Mejillas escrobiculadas; surco mediano preglabellar poco desarrollado; lóbulo glabellar anterior subcuadrado a semiovada; lóbulo glabellar posterior con surcos F2 bien desarrollados y nódulo glabellar axial alargado; lóbulos basales simples a ligeramente alargados; eje del pigidio con surcos F2 bien desarrollados; nodo axial moderado a pequeño en M2; posteroaxis con depresión transversal cerca de la longitud media; surco medial postaxial débilmente desarrollado.

**Especie tipo:** *Agnostus fissus* Lundgren in Linnarsson, 1879

*Tomagnostus* sp.

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica, Europa y Asia Central (Berg-Madsen, 1984; Young & Ludvigsen, 1989; Fatka & Kordule, 1992; Weidner & Nielsen, 2016)

**Discusión:** Fatka & Szabad (2014) mencionan que la Zona de *Onymagnostus hybridus*, del Cámbrico medio, se caracteriza por las especies del mismo nombre y se producen a través de toda la zona. Los niveles más bajos de esta zona se caracterizan por la repentina aparición de varios agnóstidos, entre ellos, *Tomagnostus*.

Suborden Eodiscina Kobayashi, 1939

Superfamilia Eodiscoidea Raymond, 1913

Familia Pagetiidae Kobayashi, 1935 ó Eodiscoidae Raymond, 1913

Género *Pagetia* Walcott, 1916

**Diagnosis:** Glabela bien definida, afilada, anillo occipital extendido en la espina larga; arreglos elevados posteriormente, depresión preglabellar bien marcada; borde más bien estrecho, con piezas radiales; lóbulos palpebrales encogidos y estrechos, ojos, crestas distintas en algunas especies; librígena (mejilla libre) lateral, pequeña; suturas faciales dirigidas transversalmente al margen tanto delante como detrás de los ojos. Tórax con 2 segmentos. Pigidio con un eje largo y bien segmentado extendido hacia la columna vertebral; regiones pleurales surcadas o no, con borde estrecho; margen liso.

**Especie tipo:** *Pagetia bootes* Walcott, 1916

*Pagetia* sp. (Figura 39).

**Ocurrencia:** Abundante, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica, Sudamérica, Asia, Australia.

**Discusión:** *Pagetia* es miembro de la superfamilia Eodiscoidea que apareció por primera vez en el Cámbrico temprano, y había desaparecido al comienzo del Cámbrico tardío, sin dejar descendientes reconocibles excepto la superfamilia ciega Agnostoidea (Jell, 1975). Jell (1975) menciona que es posible que estos animales pelágicos hayan pasado el día en zonas cercanas a aguas oscuras, en el nivel de máxima penetración de luz, y que hayan ascendido a la superficie durante la noche. Otros, sin embargo, vivían en la plataforma en aguas poco iluminadas. Ópik (1956) identifica asociaciones faunísticas, comprendidas por trilobites de las Capas Sandover del área de Elkdra, Territorio del Norte, Australia, reportando la presencia de *Pagetia significantis*. Lin & Yuan (2009) reportaron el género *Pagetia* en la Formación Kaili en Guizhou, China, siendo el trilobite más abundante presente en la unidad. Se ha documentado la presencia de *Pagetia* sp. (Almazán, 2002) y *Pagetia resseri* (Cuen, 2012) en rocas del Cámbrico del área de San José de Gracia, Sonora.



Figura 39. *Pagetia* sp. Escala=1 mm.

Orden Corynexochida Kobayashi, 1935

Familia Oryctocephalidae Beecher, 1897

Género *Oryctocephalus* Walcott, 1886

**Diagnosis:** Glabela de lados paralelos o expandiéndose ligeramente hacia adelante; surcos glabellares bien impresos como depresiones (fosas). Lóbulo palpebral distante de la glabela. Las áreas posteriores de la gena fija no se extienden más allá de los lóbulos palpebrales, espinas genales largas. Tórax con siete segmentos; surcos y depresiones pleurales impresas, no paralelas unas de otra; cinco o seis pares de espinas marginales, el cuarto par es el más marcado en la mayoría de las especies (Moore, 1959).

**Especie tipo:** *Oryctocephalus primus* Walcott, 1886

*Oryctocephalus* sp.

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica, Sudamérica, Asia y Australia (Shergold, 1969).

**Discusión:** *Oryctocephalus* es un género importante durante el Cámbrico medio, debido a que presenta una amplia distribución geográfica y corto rango cronoestratigráfico, pudiendo ser utilizado como fósil índice (*Oryctocephalus indicus*). En Sonora, se ha documentado la presencia de *Oryctocephalus* en el área de San José de Gracia, en asociación con abundantes agnóstidos y escleritos aislados de *Chancelloria eros*, confiriendo la secuencia a un ambiente marino de plataforma externa (Cuen, 2012).

*Oryctocephalus reynoldsi* Reed 1899 (Figura 40).

**Ocurrencia:** Escasa. Formación El Gavilán. Cámbrico medio. Zona de *Mexicella mexicana*, Subzona de *Albertella highlandensis*. Zona de *Ptychagnostus atavus*.

**Distribución geográfica:** Australia y Norteamérica.

**Discusión:** En Australia, se ha reportado la especie *Oryctocephalus reynoldsi* y una asociación de trilobites oryctocephalidos en las Capas Sandover del área de Elkdra, al sur en las

Capas Arthur Creek del área de Huckita, Territorio del Norte, y al sureste en el área Broken Hill, Nueva Gales del Sur, siendo posible establecer una correlación (Öpik, 1956; Smith, 1963). Geyer & Landing (2006), enfatizó que Reed (1910) en el mismo artículo describió la especie *Oryctocephalus* cf. *O. reynoldsi*, la cual fue puesta en sinonimia con *O. indicus* por Jell & Hughes (1997) y casi con toda seguridad representa la misma especie.



Figura 40. *Oryctocephalus reynoldsi*. Escala=1 mm.

#### Género *Tonkinella* Mansuy, 1916

Especie tipo: *Tonkinella flabelliformis* Mansuy, 1916

*Tonkinella flabelliformis* Mansuy, 1916 (Figura 41).

**Diagnosis:** Proporcionescefálicas como en *Oryctocephalus* pero los surcos glabelares con menos forma de depresiones (fosas). Tórax con cinco segmentos, pleuras terminadas suavemente. Pigidio semicircular, tan grande como elcefalón, margen redondeado. Eje afilado, segmentado, regiónpleuralconvexa, radialmente organizada en surcos carentes de depresiones interpleurales; sin surco marginal o borde (Moore, 1959).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Este de Asia (Wentang *et al.*, 1995) y Norteamérica.



**Figura 41.** *Tonkinella flabelliformis*. Escala=5 mm.

*Tonkinella valida* Tchernysheva, 1962 (Figura 42).

**Diagnosis:** *Tonkinella* presenta cranidio con crestas oculares fuertemente dirigidas posterolaterales, borde anterior ligeramente hacia arriba, lóbulo frontal convexo bajo, *plectrum* y surco medial en el lóbulo frontal. Pigidio con margen liso, surcos pleurales moderados a moderadamente superficiales de profundidad uniforme que no alcanzan el borde, segmento pleural posterior ancho y 5-6 anillos axiales (Tchernysheva, 1962; Sundberg, 1994).

**Ocurrencia:** Escasa, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altioculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Norteamérica, China (Sundberg, 1994; Wentang *et al.*, 1995).

**Discusión:** *Tonkinella* corresponde a uno de los géneros de trilobites cosmopolitas del Cámbrico medio (Gonzalo *et al.*, 2003). La presencia de *Tonkinella valida* indica una Serie 3,

Etapa 5 y Lincolniano. Topazano para Laurencia. La Subzona de *Altiocculus* Sundberg (1994) se encuentra en la parte superior de la Zona de *Ehmaniella*, y su límite inferior se basa en la primera aparición de *Altiocculus*, mientras que el límite superior se basa en la primera aparición de *Bolaspidella* Resser (1937). *Tonkinella valida* ha sido documentada para la Caliza Trailer y la Caliza Swasey, Utah, y también para la Caliza Pole Canyon, en Nevada, en asociación con otros trilobites del Cámbrico medio (Sundberg, 1994). Vega (1996) reporta una fauna representativa que comprende de los trilobites *Tonkinella valida*, *Quadragnostus depressa*, *Syspachechalus* sp. y ?*Tomagnostus* sp. los cuales son asignados a la parte inferior de la Zona de *Ehmaniella*.



Figura 42. *Tonkinella valida*. Escala=2 mm.

Orden Ptychopariida Swinnerton, 1915

Suborden Ptycopariina Ritcher, 1933

Superfamilia Ptycopariacea Mattew, 1887

Familia Alokistocaridae Resser, 1939

Género *Elrathina* Resser, 1937

**Especie tipo:** *Conocephalites cordillerae* Rominger, 1887

*Ptychoparella (Elrathina) antiqua* Palmer y Halley, 1979 (Figura 43).

**Diagnosis:** Cranidio amplio, presencia de ojos, estrías longitudinales en un área preglabellar amplia. Presencia de tubérculos en el cranidio, numerosos segmentos torácicos y pigidio pequeño. Cranidio como el género *Ptychoparia* pero el el pigidio muy corto (Moore, 1959).

**Ocurrencia:** Abundante, Formación El Gavilán, Cámbrico medio, Subzona de *Altiocculus*, parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

**Distribución geográfica:** Cosmopolita

**Discusión:** *Elrathina* corresponde a un género de importancia bioestratigráfica durante el Cámbrico medio inferior, para el cuál su posición sistemática es incierta, siendo considerado anteriormente como un representante de la familia Alokistocaridae Resser, 1939. *Elrathina antiqua* fue propuesta por Palmer & Halley (1979), en el Miembro Lutita Pahrump Hills de la Formación Carrara, en asociación con *Chancia maladensis*, *Ogygopsis typicalis*, *Pagetia maladensis*, *Pagetia resseri*, *Peronopsis lautus*, entre otras. Sundberg (1999) en un estudio sistemático y análisis filogenético de ptychopariidos, excluye al género *Elrathina* de la familia Alokistocaridae, posicionándolo como un sinónimo de *Ptychoparella*. Se establece que *Ptychoparella* comprende desde el Cámbrico inferior inferior al Cámbrico medio de Laurentia (Rasetti, 1951, 1955; Fritz, 1968; Sundberg, 1994; Blaker y Peel, 1997; Sundberg, 1999).



Figura 43. *Ptychoparella (Elrathina) antiqua*. Escala=5 mm.

### 13. CONSIDERACIONES PALEOGEOGRÁFICAS

En Sonora, se estima que los estratos del Neoproterozoico fueron depositados con el supercontinente Rodinia, el cual es considerado que se fragmentó y dio origen a la formación de nuevos continentes hace aproximadamente 750 Ma incluyendo Laurentia, a lo largo de la cual se formó el Miogeoclinal Cordillerano de Norteamérica (Stewart *et al.*, 2002). Esta última consiste en extensos depósitos de plataforma continental que se sitúan a lo largo del margen occidental de Norteamérica y parte de Sonora. En las primeras fases de la evolución cordillerana estuvo presente la ruptura Neoproterozoica del supercontinente Rodinia lo cual provocó la sedimentación a lo largo de un margen continental pasivo hasta el Devónico tardío.

La abundancia y amplia distribución geográfica de los trilobites agnóstidos les confiere un valor irrefutable como los mejores índices globales para la correlación de estratos cámbicos. El conocimiento de estas faunas sugiere la existencia de una provincia faunística que abarca localidades en Sonora y Norteamérica (Utah, Nevada, California, Pennsylvania, Idaho y Montana). La asociación faunística de la localidad permitió establecer relaciones

paleogeográficas con faunas del norte de Utah y con el sureste de Idaho. La evidencia geológica y paleomagnética que se tiene indica que en el Precámbrico se tenía un Supercontinente. Reconstrucciones paleogeográficas de Norte América (Stewart *et al.*, 2002) sugieren que el margen occidental se encontraba localizado en los trópicos, orientado este-oeste durante el Cámbrico temprano (Buitrón-Sánchez *et al.*, 2016).

## 14. CONSIDERACIONES PALEOCOLÓGICAS

El término ecología proviene de las palabras griegas *oikos* (casa) y *logos* (estudio o tratado), es definida como el estudio científico de la relación entre los organismos y su medio ambiente. Este concepto considera que dicha relación incluye condiciones físicas y componentes biológicos, examinando los procesos que controlan la distribución y la abundancia de organismos. Por lo tanto, el estudio de la ecología de comunidades pasadas, basándose en el registro fósil, es denominado como paleoecología (Smith y Smith, 2007).

Una comunidad es definida como la asociación de organismos que interaccionan de manera directa o indirectamente (Smith y Smith, 2007). También reconoce que las especies que habitan en una asociación estrecha deben de interactuar, ya sea compitiendo por los recursos compartidos, como alimento, luz, espacio o humedad. Pueden suministrarse ayuda mutua, depender como fuente de alimentación o pueden simplemente no tener efectos directos una sobre otra.

Para caracterizar la paleoecología es necesario que se tomen muestras de rocas con contenido fosilífero. Una vez efectuado, se deben conocer atributos como el número de especies, su abundancia relativa, la naturaleza de sus interacciones y la estructura física. Las comunidades se caracterizan no sólo por la mezcla de especies y por las interacciones que existen entre ellas (la estructura biológica) sino también por sus características físicas. La estructura física de la comunidad refleja factores abióticos, tales como la profundidad y el flujo del agua en ambientes acuáticos.

Otra característica que se debe evaluar en una comunidad es la distribución espacial de los individuos, que determinan el establecimiento y desarrollo de los individuos en un ambiente dado. Ludwing & Reynolds (1988) clasificaron la distribución en tres patrones básicos: distribución aleatoria, distribución uniforme y distribución agregada.

La distribución aleatoria no presenta ningún patrón de orden, por lo cual la distribución de cada individuo es independiente de la de los demás. Los individuos distribuidos uniformemente se encuentran espaciados de manera más o menos equitativa. Por lo general, resulta de alguna forma de interacción negativa entre los individuos, como la competición por el alimento o el espacio, la cual funciona para mantener cierta distancia entre los miembros de una población. La distribución agregada resulta ser la más común en donde los individuos se encuentran agrupados, resultado de varios factores como un comportamiento gregario, modo reproductivo el hábitat de recursos, entre otros.

Con base en la estadística y relación entre la media ( $\mu$ ) y la varianza ( $\sigma^2$ ) del número de individuos por unidad muestrada se estima el patrón de distribución espacial, por lo que:

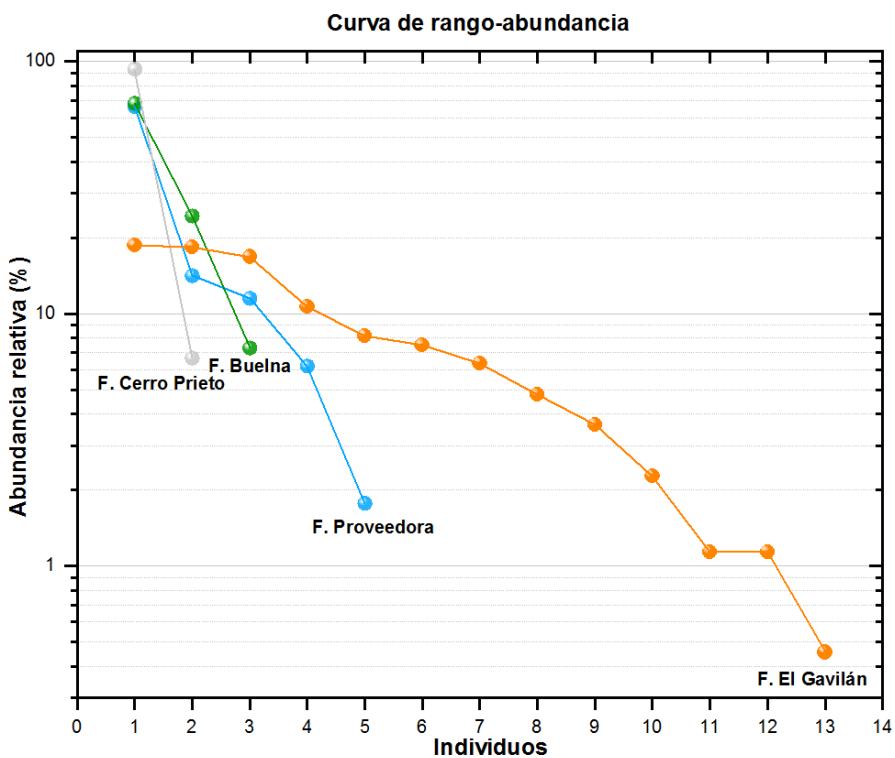
1. La distribución aleatoria está representado por  $\sigma^2 = \mu$ , indicando un tratamiento estadístico de Poisson.
2. La distribución uniforme se representa por  $\sigma^2 < \mu$ , indicando un tratamiento estadístico de tipo binomial positivo.
3. La distribución agregada está representando por  $\sigma^2 > \mu$ , indicando un tratamiento estadístico de tipo binomial negativo.

Uno de los métodos comunes más utilizados para comparar patrones de riqueza de especies y abundancia entre comunidades es mediante una gráfica de abundancia relativa de cada especie en relación al rango u orden de las especies de la más abundante a la menos abundante. Según Smith & Smith (2007) el número de especies y su abundancia relativa determinan la diversidad, representando una aproximación a la estructura biológica de la comunidad.

En la Tabla 5 se muestra la distribución y abundancia de especies por formación. La abundancia relativa representaría el porcentaje de cada una de las especies que contribuye al número total de individuos muestreados por formación.

Especie	A	AR
<b>Formación Proveedora</b>		
<i>Skolithos</i> isp.	75	66.37
<i>Arenicolites</i> isp.	16	14.15
<i>Thalassinoides</i> isp.	13	11.5
<i>Monocraterion</i> isp.	7	6.19
<i>Cruziana</i> isp.	2	1.76
<b>Total</b>	113	100
<b>Formación Buelna</b>		
<i>Girvanella</i> sp.	56	68.29
<i>Hyolithes sonora</i>	20	24.39
<i>Haplophrentis reesei</i>	6	7.31
<b>Total</b>	82	100
<b>Formación Cerro Prieto</b>		
<i>Amecephalus arrojosensis</i>	14	93.33
Brachiopoda sp. indet.	1	6.66
<b>Total</b>	15	100
<b>Formación El Gavilán</b>		
<i>Elrathina antiqua</i>	82	18.63
<i>Quadragnostus depressa</i>	81	18.40
<i>Acrothele</i> sp.	74	16.81
<i>Pagetia</i> sp.	47	10.68
<i>Tonkinella valida</i>	36	8.18
<i>Chancelloria eros</i>	33	7.5
<i>Tomagnostus</i> sp.	28	6.36
<i>Oryctocephalus</i> sp.	21	4.77
<i>Pegmatreta rara</i>	16	3.63
<i>Dictyonina minutipuncta</i>	10	2.27
<i>Haplophrentis reesei</i>	5	1.13
<i>Linnarsonia ophirensis</i>	5	1.13
<i>Dictyonina ornatella</i>	2	0.45
<b>Total</b>	440	100

Tabla 5. Distribución de especies por formación. A= Abundancia, AR= Abundancia relativa.



**Figura 44.** Diagrama rango-abundancia de las especies distribuidas en las formaciones del área El Sahuaral. El rango de abundancia oscila desde el más abundante hasta el menos abundante (eje x), mientras que la abundancia relativa está expresada en un eje log10. Como se observa, la Formación El Gavilán posee una mayor riqueza de especies (longitud de la curva) y equitatividad (gradiente de la curva) que el resto de las comunidades.

La especie más abundante está representada primero con el eje x, con su correspondiente valor en el eje y (abundancia relativa). El proceso se continúa hasta que se representen todas las especies. La Figura 44 muestra la distribución y abundancia de especies por formación.

Posteriormente, se realizaron curvas de rarefacción las cuales muestran número de especies vs número de individuos. Se observan diferencias respecto a la muestra utilizada, es decir, la cantidad de ejemplares con que se contó para realizar el muestreo.

## FORMACIÓN PROVEEDORA

Con base al muestreo llevado a cabo en el área del Sahuaral, se colectaron 113 individuos de 5 especies para la Formación Proveedora. Dentro de las cinco estaciones (A-E) muestreadas se observa que *Skolithos* isp. corresponde con la especie dominante debido a su gran abundancia, alcanzando valores hasta de 27 individuos como ocurre en la Estación D. La especie menos común y/o que puede ser considerada como rara corresponde con *Cruziana* isp., la cual únicamente se encuentra la estación B con dos individuos. La relación de especies mencionadas anteriormente indica una varianza ( $\sigma^2$ ) bastante pronunciada y mayor que la media ( $\mu$ ) en todas las estaciones por lo que sugiere una distribución agregada con un tratamiento estadístico de tipo binomial negativo, a excepción de la estación B donde la media es mayor a la varianza y sugiere una distribución uniforme con un tratamiento estadístico de tipo binomial positivo (Tabla 6).

Estrato	Especie	Cantidad	Media	Varianza	Distribucion	Tratamiento
A	<i>Arenicolites</i> isp.	2				
	<i>Monocraterion</i> isp.	1				
	<i>Skolithos</i> isp.	12	4,5	25,67	Agregada	Binomial negativo
	<i>Thalassinoides</i> isp.	3				
B	<i>Arenicolites</i> isp.	1				
	<i>Cruziana</i> isp.	2				
	<i>Monocraterion</i>	1	1,25	0,25	Uniforme	Binomial positivo
	<i>Skolithos</i> isp.	1				
C	<i>Arenicolites</i> isp.	3				
	<i>Monocraterion</i> isp.	1				
	<i>Skolithos</i> isp.	14	5,25	34,92	Agregada	Binomial negativo
	<i>Thalassinoides</i> isp.	3				
D	<i>Arenicolites</i> isp.	4				
	<i>Monocraterion</i> isp.	1				
	<i>Skolithos</i> isp.	21	7,5	83	Agregada	Binomial negativo
	<i>Thalassinoides</i> isp.	4				
E	<i>Arenicolites</i> isp.	6				
	<i>Monocraterion</i> isp.	3				
	<i>Skolithos</i> isp.	27	9,75	134,25	Agregada	Binomial negativo
	<i>Thalassinoides</i> isp.	3				

Tabla 6. Distribución de especies por estrato en la Formación Proveedora.

## Curva de rarificación

Las curvas de rarificación se consideran como un método ampliamente utilizado, el cual fue desarrollado por Sanders (1968), posteriormente enmendada por Hulbert (1971), desarrolló la técnica de la rarefacción para observar diferencias respecto a la muestra utilizada, es decir, la cantidad de ejemplares con que se contó para realizar el muestreo. La rarefacción asume que todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser capturados en el área de estudio, ya que estos se distribuyen al azar en el ecosistema (Hulbert, 1971; Jiménez-Valverde, 2000). Las curvas para las estaciones A, C, D y E obtienen un valor asintótico hasta el valor acumulado por especies respecto a los individuos, lo que indica que el muestreo se efectuó de manera correcta (Tabla 7). Por otro lado, la estación B difiere de las otras debido a la falta de ejemplares colectados para de esta manera disminuir la desviación estándar; no obstante, no fue posible obtener más ejemplares debido a la disponibilidad y conservación de estos (Figura 45).

Muestra	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1.54	1.9	1.53	1.48	1.49
3	1.89	2.7	1.88	1.79	1.81
4	2.17	3.4	2.16	2.03	2.06
5	2.41	4	2.39	2.24	2.27
6	2.63		2.60	2.42	2.46
7	2.82		2.78	2.58	2.63
8	3.00		2.95	2.73	2.79
9	3.16		3.09	2.86	2.92
10	3.30		3.22	2.97	3.05
11	3.43		3.34	3.08	3.16
12	3.54		3.44	3.17	3.26
13	3.64		3.53	3.25	3.36
14	3.73		3.61	3.33	3.44
15	3.81		3.68	3.40	3.51
16	3.88		3.74	3.46	3.58
17	3.94		3.80	3.51	3.64
18	4		3.85	3.56	3.69
19			3.90	3.60	3.73
20			3.95	3.65	3.77
21			4	3.6	3.81
22				3.72	3.84

23		3.76	3.87
24		3.79	3.89
25		3.83	3.91
26		3.86	3.93
27		3.9	3.95
28		3.93	3.96
29		3.96	3.97
30	4	3.98	
31		3.98	
32		3.99	
33		3.99	
34		3.99	
35		3.99	
36		3.99	
37	4		
38	4		
39	4		

Tabla 7. Datos utilizados para la elaboración de la curva de rarificación para la Formación Proveedora.

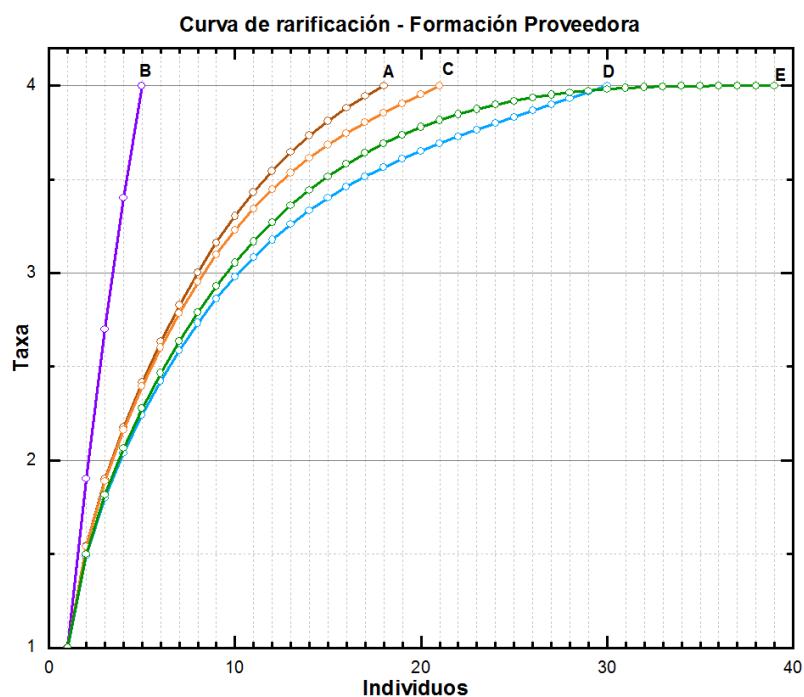


Figura 45. Curva de rarificación de la Fm. Proveedora donde se muestran individuos vs taxa por estación (A-E).

El análisis de ambiente de depósito para la Formación Proveedora denota un alto contenido de bioturbación e icnofósiles que indican un ambiente litoral o de zona costera, intermareal – submareal. En consideración de la gran abundancia de *Skolithos* isp. y *Arenicolites* isp., es posible que la Formación Proveedora corresponda a la icnofacies de *Skolithos* propuesta por Seilacher (1964), quien los atribuye a medios depositacionales de elevada energía hidrodinámica en donde se presentan frecuentemente fenómenos erosivos (Pemberton *et al.*, 1992). La asociación de estos organismos bentónicos-filtradores de baja diversidad y dominada por abundantes estructuras que incluyen tubos verticales indican ambientes arenosos y de línea de costa, barras arenosas o frentes deltaicos.

## FORMACIÓN BUELNA

En la Formación Buelna se colectaron 82 individuos distribuidos en 3 especies. En las cinco estaciones muestreadas destaca la presencia de *Girvanella* sp. con 56 individuos en la Estación C; sin embargo, las especies *Haplophrentis reesei* y *Hyolithes sonora* que se pueden considerar menos dominantes aparecen en todas las estaciones. La relación de especies indica en todos los casos una varianza mayor que la media, sugiriendo una distribución de tipo agregada y con un tratamiento estadístico de tipo binomial negativo (Tabla 8).

Estrato	Especie	Cantidad	Media	Varianza	Distribucion	Tratamiento
A	<i>Hyolithes sonora</i>	4	2,5	4,5	Agregada	Binomial negativo
	<i>Haplophrentis reesei</i>	1				
B	<i>Hyolithes sonora</i>	6	3,5	12,5	Agregada	Binomial negativo
	<i>Haplophrentis reesei</i>	1				
C	<i>Hyolithes sonora</i>	3	20	973	Agregada	Binomial negativo
	<i>Haplophrentis reesei</i>	1				
	<i>Girvanella</i> sp.	56				
D	<i>Hyolithes sonora</i>	3	2,5	0,5	Uniforme	Binomial positivo
	<i>Haplophrentis reesei</i>	2				
E	<i>Hyolithes sonora</i>	4	2,5	4,5	Agregada	Binomial negativo
	<i>Haplophrentis reesei</i>	1				

Tabla 8. Distribución de especies por estrato en la Formación Buelna.

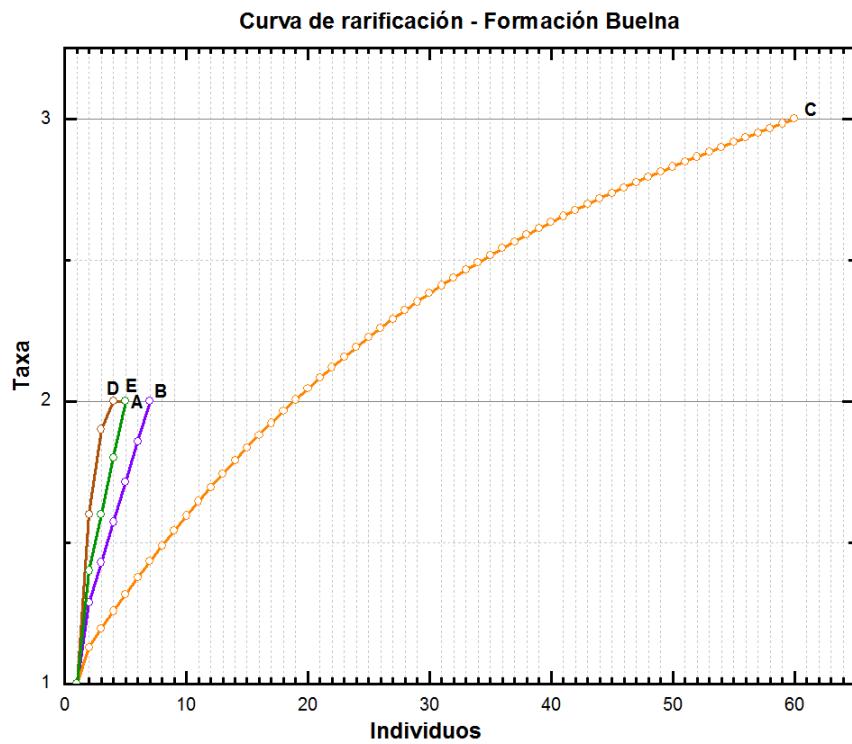
### Curva de rarificación

Para las curvas de rarefacción en las cuales se muestran número de especies vs números de individuos se observan las curvas que no logran alcanzar un valor asintótico. Unicamente la curva para la estación C se mantiene con una tendencia a aumentar debido al mayor número de individuos que posee (Tabla 9 y Figura 46).

Muestra	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1,4	1,29	1,13	1,6	1,4
3	1,6	1,43	1,19	1,9	1,6
4	1,8	1,57	1,26	2	1,8
5	2	1,71	1,32	2	2
6		1,86	1,38		
7		2	1,43		
8			1,49		
9			1,54		
10			1,59		
11			1,64		
12			1,69		
13			1,74		
14			1,79		
15			1,84		
16			1,88		
17			1,92		
18			1,96		
19			2,01		
20			2,04		
21			2,08		
22			2,12		
23			2,16		
24			2,19		
25			2,23		
26			2,26		
27			2,29		
28			2,32		
29			2,35		
30			2,38		
31			2,41		
32			2,44		
33			2,46		

34	2,49
35	2,52
36	2,54
37	2,56
38	2,59
39	2,61
40	2,63
41	2,66
42	2,68
43	2,70
44	2,72
45	2,74
46	2,76
47	2,77
48	2,79
49	2,81
50	2,83
51	2,85
52	2,87
53	2,88
54	2,90
55	2,92
56	2,93
57	2,95
58	2,97
59	2,98
60	3

**Tabla 9.** Datos utilizados para la elaboración de la curva de rarificación para la Formación Buelna.



**Figura 46.** Curva de rarificación de la Fm. Buelna donde se muestran individuos vs taxa por estación (A-E).

Con respecto al análisis de depósito de la Formación Buelna se considera de un ambiente marino somero, particularmente de plataformas carbonatadas tropicales donde predominan los carbonatos con aguas levemente agitadas y en menor proporción aporte de material terrígeno. La gran abundancia de algas oncolíticas sugiere que estos depositos se desarrollaron en intervalos de 10 a 100 metros de profundidad con fauna asociada de trilobites y hiolítidos, organismos suspensívorus-filtradores, que le confieren un ambiente marino de alta energía en condiciones de intermarea a submarea somera no mayor a 100 metros (Flügel, 2010).

### FORMACIÓN CERRO PRIETO

Para la Formación Cerro Prieto se colectaron 15 individuos distribuidos en 2 especies. Debido a la poca presencia de individuos y, como resultado de la falta de ejemplares colectados por disponibilidad y conservación de estos, la secuencia es considerada como una sola estación

(A). Dentro de la Estación A se observa que *Amecephalus arrojensis* es la especie dominante o la más común, mientras que la forma menos común rara corresponde a una especie de Brachiopoda. La varianza resulta ser mayor que la media por lo que sugiere una distribución de tipo agregada y un tratamiento estadístico de tipo binomial negativo (Tabla 10).

Estrato	Especie	Cantidad	Media	Varianza	Distribucion	Tratamiento
A	<i>Amecephalus arrojensis</i>	14				
	Brachiopoda sp. indet.	1	7,5	84,5	Agregada	Binomial negativo

Tabla 10. Distribución de especies por estrato en la Formación Cerro Prieto.

Respecto al ambiente de depósito, la Formación Cerro Prieto es considerada de ambiente de intermareal a plataforma somera, esto con base a la presencia de oolitas que se encuentran relacionadas con aguas marinas altamente agitadas, someras y supersaturadas, en zonas de alta actividad de las mareas. Es posible que la Formación Cerro Prieto fue depositándose en un ambiente somero de alta energía cercano a la línea de costa.

## FORMACIÓN EL GAVILÁN

Para la Formación El Gavilán se tiene un total de 440 individuos distribuidos en 13 especies. En las cinco estaciones muestreadas se observan diferentes especies dominantes, sin embargo, destaca la presencia de *Quadragnostus depressa*, *Pagetia* sp., y *Elrathina antiqua* y *Acrothele* sp. en las estaciones A-D con rangos de 10 a 25 individuos por estación. La relación de especies indica en todos los casos una varianza mayor que la media, sugiriendo una distribución de tipo agregada y con un tratamiento estadístico de tipo binomial negativo (Tabla 11).

Estrato	Especie	Cantidad	Media	Varianza	Distribucion	Tratamiento
A	<i>Pegmatreta rara</i>	12	16,67	63,3	Agregada	Binomial negativo

	<i>Acrothele</i> sp.	18			
	<i>Haplophrentis reesei</i>	3			
	<i>Quadragnostus depressa</i>	25			
	<i>Tomagnostus</i> sp.	12			
	<i>Pagetia</i> sp.	28			
	<i>Oryctocephalus</i> sp.	12			
	<i>Tonkinella valida</i>	16			
	<i>Elrathina antiqua</i>	24			
<hr/>					
	<i>Chancelloria eros</i>	12			
	<i>Linnarssonia ophirensis</i>	4			
	<i>Pegmatreta rara</i>	3			
	<i>Acrothele</i> sp.	21			
	<i>Dictyonina minutipuncta</i>	3			
	<i>Dictyonina ornatella</i>	1			
B	<i>Haplophrentis reesei</i>	1	6,23	37,4	Agregada Binomial negativo
	<i>Quadragnostus depressa</i>	12			
	<i>Tomagnostus</i> sp.	3			
	<i>Pagetia</i> sp.	3			
	<i>Oryctocephalus</i> sp.	1			
	<i>Tonkinella valida</i>	5			
	<i>Elrathina antiqua</i>	12			
<hr/>					
	<i>Chancelloria eros</i>	14			
	<i>Acrothele</i> sp.	3			
	<i>Dictyonina minutipuncta</i>	5			
	<i>Quadragnostus depressa</i>	12			
C	<i>Tomagnostus</i> sp.	1	7,89	32,6	Agregada Binomial negativo
	<i>Pagetia</i> sp.	8			
	<i>Oryctocephalus</i> sp.	3			
	<i>Tonkinella valida</i>	7			
	<i>Elrathina antiqua</i>	18			
<hr/>					
	<i>Chancelloria eros</i>	7			
	<i>Linnarssonia ophirensis</i>	1			
	<i>Pegmatreta rara</i>	1			
	<i>Acrothele</i> sp.	18			
	<i>Dictyonina minutipuncta</i>	2			
	<i>Dictyonina ornatella</i>	1			
D	<i>Haplophrentis reesei</i>	1	7,15	50,0	Agregada Binomial negativo
	<i>Quadragnostus depressa</i>	20			
	<i>Tomagnostus</i> sp.	12			
	<i>Pagetia</i> sp.	8			
	<i>Oryctocephalus</i> sp.	2			
	<i>Tonkinella valida</i>	4			
	<i>Elrathina antiqua</i>	16			
<hr/>					
E	<i>Acrothele</i> sp.	14	9	26	Agregada Binomial negativo

<i>Quadragnostus depressa</i>	12
<i>Oryctocephalus</i> sp.	3
<i>Tonkinella valida</i>	4
<i>Elrathina antiqua</i>	12

Tabla 11. Distribución de especies por estrato en la Formación El Gavilán.

### Curva de rarificación

En las curvas de rarefacción se muestra número de especies vs número de individuos, observándose diferencias respecto a la muestra utilizada (Tabla 12). Las curvas para las estaciones A, C y E alcanzan un valor asintótico mientras que las curvas para las estaciones B y D se mantienen con una tendencia a aumentar, no obstante, de que son las que tienen mayor diversidad y número de individuos, a excepción de la estación A que posee una mayor cantidad de individuos que las demás (Figura 47).

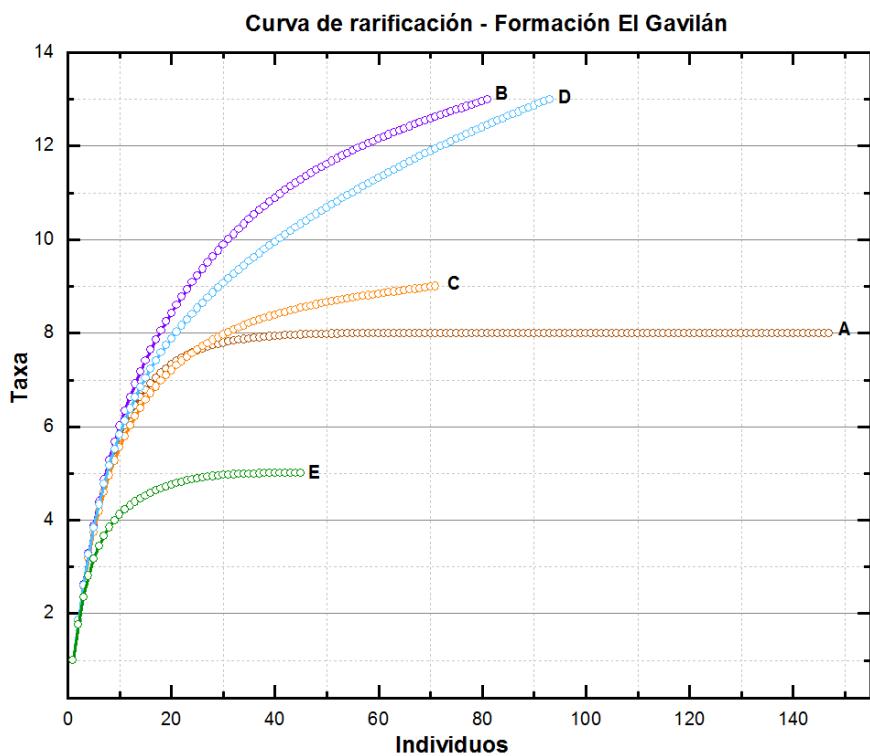
Muestra	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1.86	1.86	1.84	1.86	1.76
3	2.62	2.61	2.57	2.61	2.35
4	3.27	3.28	3.19	3.26	2.80
5	3.84	3.86	3.73	3.83	3.16
6	4.34	4.38	4.19	4.33	3.44
7	4.77	4.85	4.60	4.77	3.66
8	5.15	5.28	4.95	5.16	3.84
9	5.48	5.66	5.26	5.51	3.99
10	5.77	6.01	5.54	5.83	4.11
11	6.03	6.33	5.79	6.12	4.22
12	6.25	6.63	6.01	6.38	4.31
13	6.45	6.91	6.21	6.62	4.39
14	6.63	7.17	6.40	6.84	4.46
15	6.78	7.41	6.56	7.04	4.52
16	6.92	7.64	6.71	7.23	4.57
17	7.04	7.85	6.85	7.41	4.62
18	7.14	8.05	6.98	7.57	4.67
19	7.24	8.24	7.09	7.73	4.71
20	7.32	8.43	7.20	7.88	4.75

21	7.39	8.60	7.30	8.02	4.78
22	7.46	8.77	7.40	8.16	4.81
23	7.52	8.93	7.48	8.29	4.84
24	7.57	9.08	7.57	8.41	4.86
25	7.62	9.23	7.64	8.53	4.88
26	7.66	9.37	7.71	8.64	4.90
27	7.70	9.50	7.78	8.75	4.92
28	7.73	9.63	7.84	8.86	4.93
29	7.76	9.76	7.90	8.96	4.94
30	7.79	9.88	7.96	9.06	4.95
31	7.81	10.00	8.01	9.16	4.96
32	7.83	10.11	8.06	9.26	4.97
33	7.85	10.22	8.11	9.35	4.98
34	7.86	10.32	8.16	9.44	4.98
35	7.88	10.43	8.20	9.53	4.99
36	7.89	10.52	8.24	9.62	4.99
37	7.90	10.62	8.28	9.70	4.99
38	7.91	10.71	8.32	9.78	4.99
39	7.92	10.80	8.35	9.87	4.99
40	7.93	10.89	8.39	9.95	4.99
41	7.94	10.97	8.42	10.02	4.99
42	7.95	11.05	8.45	10.10	4.99
43	7.95	11.13	8.48	10.18	5
44	7.96	11.20	8.51	10.25	5
45	7.96	11.28	8.53	10.32	5
46	7.97	11.35	8.56	10.40	
47	7.97	11.42	8.58	10.47	
48	7.97	11.48	8.61	10.54	
49	7.98	11.55	8.63	10.61	
50	7.98	11.61	8.65	10.68	
51	7.98	11.67	8.67	10.74	
52	7.98	11.73	8.69	10.81	
53	7.98	11.79	8.71	10.88	
54	7.99	11.84	8.73	10.94	
55	7.99	11.90	8.75	11.00	
56	7.99	11.95	8.77	11.07	
57	7.99	12.00	8.78	11.13	
58	7.99	12.05	8.80	11.19	
59	7.99	12.10	8.82	11.25	
60	7.99	12.15	8.83	11.31	
61	7.99	12.20	8.85	11.37	
62	7.99	12.24	8.87	11.43	
63	7.99	12.29	8.88	11.49	

64	7.99	12.33	8.90	11.55
65	7.99	12.37	8.91	11.61
66	7.99	12.42	8.92	11.66
67	7.99	12.46	8.94	11.72
68	7.99	12.50	8.95	11.78
69	7.99	12.54	8.97	11.83
70	7.99	12.58	8.98	11.88
71	7.99	12.62	9	11.94
72	7.99	12.66		11.99
73	7.99	12.70		12.04
74	7.999	12.73		12.10
75	7.99	12.77		12.15
76	7.99	12.81		12.20
77	7.99	12.85		12.25
78	7.99	12.88		12.30
79	7.99	12.92		12.35
80	7.99	12.96		12.40
81	7.99	13		12.45
82	7.99			12.50
83	7.99			12.54
84	7.99			12.59
85	7.99			12.64
86	7.99			12.68
87	7.99			12.73
88	7.99			12.78
89	7.99			12.82
90	7.99			12.86
91	7.99			12.91
92	7.99			12.95
93	7.99			13
94	7.99			
95	8			
96	8			
97	8			
98	8			
99	8			
100	8			
101	8			
102	8			
103	8			
104	8			
105	8			
106	8			

107	8
108	8
109	8
110	8
111	8
112	8
113	8
114	8
115	8
116	8
117	8
118	8
119	8
120	8
121	8
122	8
123	8
124	8
125	8
126	8
127	8
128	8
129	8
130	8
131	8
132	8
133	8
134	8
135	8
136	8
137	8
138	8
139	8
140	8
141	8
142	8
143	8
144	8
145	8
146	8
147	8

**Tabla 12.** Datos utilizados para la elaboración de la curva de rarificación para la Formación El Gávilan.



**Figura 47.** Curva de rarificación de la Fm. El Gavilán donde se muestran individuos vs taxa por estación (A-E).

El análisis de ambiente depósito para la Formación El Gavilán se considera de ambiente de plataforma abierta (intermedia) con base a los abundantes trilobites poliméridos y agnóstidos, estos últimos se consideran pelágicos debio a las facies donde se encuentran, aunque sugieren un cambio de facies hacia ambientes más profundos.

## GRUPOS FUNCIONALES

### Formación Proveedora

#### 1. Consumidores primarios-Descomponedores-infaunales

Suspensívoros -?Annelida-Polychaeta: *Arenicolites* isp. y *Skolithos* isp.

#### 2. Consumidores secundarios-infaunales

Carnívoros -?Annelida-Polychaeta: *Thalassinoides* isp. y *Cruziana* isp.

### Formación Buelna

#### 1. Productores primarios-epifaunales sésiles

Cyanobacteria: *Girvanella* sp.

#### 2. Suspensívoros-epifaunales (vágil)

Lofofóridos: *Hyolithes sonora* y *Haplophrentis reesei*

### Formación Cerro Prieto

#### 1. Suspensívoros-epifaunal: Braquiópodo indeterminado

#### 2. Consumidores primarios: Trilobites (*Amecephalus arrojensis*), alimentador de depósito epifaunal.

### Formación El Gavilán

#### 1. Suspensívoros, epifaunales. Brachiopoda: *Lingulella proveedorensis*, *Acrothele* sp., *Linnarssonia ophirensis*, *Pegmatreta rara*, *Dictyonina minutipuncta* y *Dictyonina ornatella*. Coeloscleritophora (sésil): *Chancelloria eros*. Hiolítidos: *Hyolithes sonora* y *Haplophrentis reesei*.

2. Detritívoros-epifaunales. Trilobita: *Ptychoparella (Elrathina) antiqua*
3. Suspensívoros-nectónicos. Trilobita: *Quadragnostus depressa*, *Pagetia* sp., *Tomagnostus* sp.
4. Carnívoros-nectónicos. Trilobita: *Oryctocephalus reynoldsi*, *Oryctocephalus* sp., *Tonkinella flabelliformis* y *Tonkinella valida*.

## 15. DISCUSIÓN

La Zona de *Ehmaniella* fue definida por Schwimmer (1975) y posteriormente retomada por Robison (1976), sin embargo, en el presente trabajo se utiliza la propuesta de Sundberg (1994), definida como una biozona de conjunto que ocurre sobre la Zona de *Glossopleura* y debajo de la Zona de *Bolaspidella* (Cámbrico medio), dividiéndola en cuatro subzonas, de la base a la cima: *Proehmaniella*, *Elrathiella*, *Ehmaniella* y *Altiocculus*. La Subzona de *Altiocculus* ocurre sobre la Subzona de *Ehmaniella* y corresponde a la parte superior de la Zona de *Ehmaniella*. El límite inferior está definido por la primera aparición de *Altiocculus* mientras que el límite superior está definido por la primera aparición de *Bolaspidella* Resser, 1937, indicando el inicio de la zona del mismo nombre. Las especies comunes incluidas dentro de la Subzona de *Altiocculus* son *A. drumensis*, *A. concavus*, *Dorypyge swasii*, *Quadragnostus depressa* (=*Peronopsis fallax*, *Peronopsis fallax depressa*), *Tonkinella breviceps*, *Tonkinella valida*, *Ptychagnostus gibbus*, *Peronopsis interrestricta*, *Parkaspis* sp. y *Elrathina* sp. (Sundberg, 1994).

La Zona de *Ehmaniella* ha sido reconocida en el estado de Sonora por Vega (1996) en Rancho Sobechi, Mazatlán, con base en los trilobites *Quadragnostus depressa* (=*Peronopsis fallax*), *Tomagnostus* sp., *Tonkinella valida* y *Syspacephalus* sp., siendo asignados a la Subzona de *Altiocculus* por Cuen (2013). Por lo tanto, el presente trabajo constituye el segundo registro de la Zona de *Ehmaniella* para México.

La sucesión mixta caliza – lutita del cerro El Sahuaral constituye una nueva localidad fosilífera para el Cámbrico medio de Sonora central, México. La fauna está dominada por

trilobites del Orden Agnostida y Corynexochida, siendo *Tonkinella valida* un trilobite polímero típico del Cámbrico medio y cosmopolita. *Tonkinella valida* se encuentra restringida a la Subzona de *Altiocculus*. Escleritos de *Chancelloria eros*, *Allonia tintinopsis* y *Archasterella* sp. y braquíópodos linguliformes componen la fauna asociada (Beresi *et al.*, 2019).

Con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis es posible discutir algunos aspectos sobre la estratigrafía y paleontología del Cámbrico del área El Sahuaral, así como áreas adyacentes.

En el área de estudio se reconocieron las formaciones Proveedor, Buelna, Cerro Prieto, El Gavilán y El Tren. El contenido litológico de estas unidades es muy similar al de otras localidades, donde también se han documentado, pero con pequeñas variaciones en su litología y espesor. La Formión Proveedor del área de Caborca posee un espesor que varía de 225 a 260 m, en el área del Chihuarruita, Sonora central, posee un espesor de 225 m, mientras que en el área del Sahuaral se tiene un espesor de 160 m. La Formación Buelna del área de Caborca poseen un espesor de 70 a 100 m, en el área del Chihuarruita tiene un espesor de 74 m y en el área del Sahuaral se ha documentado un espesor de 70 m. La Formación Cerro Prieto en el área de Caborca tiene un espesor de 85 a 125 m, en el área del Chihuarruita poseen un espesor únicamente de 17.03 m, mientras que en el Sahuaral se tiene un espesor de 70 m. La Formación El Gavilán del área de estudio ha sido correlacionada con la Formación Arrojos del área de Caborca por Cuen *et al.* (2016) con un notable cambio de facies desde ambiente marino somero (Fm. Arrojos) a un ambiente de plataforma abierta (Fm. El Gavilán), la Formación Arrojos en el área de Caborca posee un espesor de 160 a 190 m, la Formación El Gavilán en el área del Chihuarruita tiene un espesor de 233.70 m, mientras que en el área del Sahuaral se tiene un espesor de 255 m. Finalmente la Formación El Tren del área de Caborca, posee un espesor de 420 a 490 m, mientras que en el área de estudio el espesor excede los 200 m. En el área del Chihuarruita la Formación El Tren no ha sido reportada.

La litología de las unidades mencionadas anteriormente es muy similar, estando compuestas principalmente por caliza, lutita y arenisca, sin embargo, aunque las unidades son

de edades similares, presenta fósiles de diferentes ambientes. La presencia y abundancia de agnóstidos para los depósitos del Sahuaral, denota una relación biogeográfica con Laurentia e indica facies de plataforma abierta, lo anterior debido a que la presencia de agnóstidos no ha sido documentada en la plataforma interior (Bordonador y Fojo, 2011). Lo anterior es reforzado por la presencia de los géneros *Tomagnostus*, *Quadragnostus* y *Pagetia* asociados por representantes de la familia Oryctocephalidae, como son *Tonkinella* y *Oryctocephalus*. Estos depósitos pueden ser correlacionados con los depósitos del área del Chihuarruita, sin embargo, existen diferencias en cuanto a edades y presencia/ausencia de especies.

La sedimentación, dominada por lutita de color rojo y caliza de color oscuro, así como las faunas de la Formación El Gavilán, sugieren afinidad con otras faunas semejantes, como son las de Spencer Shale (Utah) y la Formación Stephen (Burgess Shale, Columbia Británica), donde han sido reportados los géneros *Bathyuriscus*, *Ehmaniella*, *Ptychoparella* (*Elrathina*), *Kootenia*, *Oryctocephalus*, *Pagetia* y *Peronopsis*, confirmando la identidad paleogeográfica con Norteamérica en un ambiente de plataforma exterior.

Por otra parte, la presencia de abundantes capas de lutita en la Formación El Gavilán de San José de Gracia (El Sahuaral y El Chihuarruita), así como la presencia de trilobites miómeros sugiere un cambio de facies hacia ambientes más profundos, en un ambiente nerítico bentónico, con respecto a la Formación Arrojos del área de Caborca, la cual se caracteriza por un ambiente de intermareal y submareal (Rivera-Carranco, 1988).

## 16. CONCLUSIÓN

Con base a la información obtenida en el presente trabajo es posible establecer aspectos relevantes sobre la estratigrafía, bioestratigrafía, paleogeografía y paleoecología del área del Sahuaral.

Se describen las características litológicas y faunales de las formaciones Proveedor, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán, y se reconoce por primera vez en el área la Formación El Tren. Se describen por primera vez en esta región una especie de braquiópodo, dos especies de hiolítidos y tres especies de trilobites, que corresponden a *Lingulella proveedorensis*, *Hyolithes sonora*, *Haplophrentis reesei*, *Tomagnostus* sp., *Oryctocephalus reynoldsi* y *Tonkinella flabelliformis*; asociación faunística perteneciente al Cámbrico medio.

Las características petrográficas de la Formación Proveedor permitieron definir una sola litofacies, donde fue depositada en un ambiente litoral o de zona costera, de intermarea a submarea, probablemente de la icnofacies de *Skolithos*. En la Formación Buelna se identificaron tres microfacies: caliza arenosa, floatstone con oncoides grandes y wackestone/packstone, mientras que en la Formación Cerro Prieto se reconocieron dos microfacies: packstone y grainstone. Esto define una plataforma carbonatada a mixta tipo rampa en un medio marino abierto con cambios en el nivel del mar, desde una rampa intermedia con aguas agitadas, rampa media con aguas moderadamente agitadas, a una rampa interna con moderada a alta energía. A partir de las asociaciones faunísticas en la Formación El Gavilán, las biofacies indican un paleoambiente de aguas más profundas que corresponden con una plataforma exterior.

Se presenta el primer estudio paleoecológico del Cámbrico en el área del Sahuaral, indicando la distribución espacial de los organismos, así como la riqueza y abundancia de especies, que definen la diversidad dentro de la comunidad y establecen parámetros a considerar sobre el paleoambiente. La Formación Proveedor corresponde a medios depositacionales tales como zonas de litorales y sublitorales donde ocurrieron fenómenos erosivos, los cuales eliminan posibles estructuras biogénicas producidas por organismos bentónicos-filtradores, y que posiblemente, en su mayoría se encontraban confinados en partes

más favorables del hábitat. La Formación Buelna se caracteriza por la presencia de organismos productores primarios-epifaunales y suspensívoros-filtradores que habitaban ambientes marinos someros de condiciones submareales y arrecifales. Para la Formación Cerro Prieto se le confiere un ambiente relacionado con aguas marinas altamente agitadas, someras y saturadas dominado por consumidores primarios-epifaunales y suspensívoros; no obstante, es posible que estos organismos hayan sido desplazados por la alta energía. El contenido biótico de la Formación El Gavilán sugiere un cambio de facies hacia ambientes más profundos y de aguas tranquilas, donde se reconoce una gran variedad de grupos funcionales, dominando organismos suspensívoros y nectónicos.

## 17. REFERENCIAS CITADAS

- Almazán-Vázquez, E., 1989. El Cámbrico-Ordovícico de Arivechi, en la región centrooriental del Estado de Sonora. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 8(1), 58-66.
- Almazán-Vázquez, E., 2002. El Cámbrico Temprano y Medio de San José de Gracia, Sonora Central, México (resumen). *Unión Geofísica Mexicana*, 22.
- Almazán-Vázquez, E., Buitrón-Sánchez, B. E., & Franco-Vega, O., 2006. Formación Pozo Nuevo: una nueva secuencia litoestratigráfica de plataforma del Ordovícico Temprano de la región central de Sonora, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 23(1), 23-38.
- Alpert, S. P., 1975. Planolites and Skolithos from the Upper Precambrian-Lower Cambrian, White-Inyo Mountains, California. *Journal of Paleontology*, 49(3), 508-521.
- Alvarez Jr, M., 1949. Notas sobre el Paleozoico mexicano: Asoc. *Mexicana Geol. Petroleros Bol*, 1(1), 47-56.
- Azizi, A., Vinn, O., El Hariri, K., Hafid, A., & Kouraiss, K., 2017. First description of Skolithos burrows from the Cambrian-Ordovician boundary interval of the Central Anti-Atlas, Morocco. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 66(3).
- Babcock, L. E., & Robison, R. A., 1988. Taxonomy and paleobiology of some Middle Cambrian Scenella (Cnidaria) and hyolithids (Mollusca) from western North America.
- Baldis, B. A. J., & Bordonaro, O. L., 1981. Vinculación entre el Cámbrico del Noroeste de México y la Precordillera Argentina. In *Anais II Congresso Latino-Americano Paleontologia* (Vol. 1, pp. 1-10).
- Bartolini, C., Morales-Montaño, M., Damon, P. E., & Shafiqullah, M., 1993. Tertiary stratigraphy and geochronology (K-Ar) of the San José de Gracia area, central Sonora, Mexico. In *III Simposio de la geología de Sonora y áreas adyacentes: Hermosillo, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología* (pp. 13-15).
- Bartolini, C., Damon, P. E., Shafiqullah, M., & Morales-Montaño, M., 1994. Geochronologic contributions to the Tertiary sedimentaryvolcanic sequences (“Baucarit Formation”) in Sonora. México: *Geofísica Internacional*, 33, 67-77.
- Beresi, M.S., Buitrón, B., Cuen-Romero, F.J., 2019. Escleritomos de *Chancelloria eros* y escleritos del Cámbrico medio (Serie 3, Piso 5) de Sonora Central, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Bengtson, S., & Missarzhevsky, V. V., 1981. Coeloscleritophora—a major group of enigmatic Cambrian metazoans. *US Geological Survey Open-File Report*, 81(743), 19-21.
- Berg-Madsen, V., 1984. The Middle Cambrian of Bornholm, Denmark: A stratigraphical revision of the lower alum shale and associated anthraconites. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 106(4), 357-376.

Buitrón, B. E., Vachard, D., Clausen, S., & Gómez, E. C., 2011. Moluscos del Cámbrico (Hyolithida, Syssoiev, 1957) de San José de Gracia, Sonora, Noroeste de México (resumen). *Reunión Internacional de Malacología*, 175.

Buitrón, B.E. Corona G. N., Cuen-Romero, F., Palafox R. J.J. y Ramírez-Guerrero. G., 2016. Icnofósiles del Cámbrico Inferior de San José de Gracia, Sonora, Revista Paleontología Mexicana, 5 (1), 33-40.

Castro Rodríguez A. & Morfín-Velarde S., 1988. Geología de la Carta de Rayón, con énfasis en el Cerro de Oro, Sonora central: Hermosillo, Universidad de Sonora, Tesis Profesional.

Cirett, G.J., Aguilar, R.F., 1989. *Características geológicas e hidrogeoquímicas del Valle de Ures, Sonora, México: Sonora, México, Universidad de Sonora* (Doctoral dissertation, Tesis de licenciatura).

CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1990, Provincias fisiográficas de México.

Cooper, G.A., and Arellano, A.R.V., 1946. Stratigraphy near Caborca, northwestern Sonora, Mexico: American Association of Petroleum Geologists, v.30, no. 4, p. 606-619.

Cooper, G. A., Arellano, A. R. V., Johnson, J. H., Okulitch, V. J., Stoyanow, A., & Lochman, C., 1952. Cambrian stratigraphy and paleontology near Caborca, northwestern Sonora, Mexico: Smithsonian Misc. *Collections*, 119(1), 184.

Cooper, G.A., Arellano, A.R.V., Johnson, J.H., Okulitch, V.J., Stoyanow, A., Lochman, C., 1956. Geología y Paleontología de la región de Caborca, norponiente de Sonora: Pt. 1<sup>a</sup>, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estados Unidos de América.

Cuen, R.F., Radelli, L., 2007. Un problema estratigráfico en el Cámbrico y Precámbrico de Caborca, Sonora, México. Resúmenes, XXIX Semana Cultural, Universidad de Sonora. P. 06.

Cuen, R. F., Almazán, E., Montijo, A., Minjarez, I., Grijalva, F., Monreal, R., Schennicke, T., Ochoa, A., 2009. Faunas marinas de invertebrados del Cámbrico temprano y medio en la parte central del Estado de Sonora, México. Geos, Unión Geofísica Mexicana. Libro de resúmenes, 29(1):91.

Cuen-Romero, F.J., 2012. Sobre la Estratigrafía y Paleontología del Cámbrico del área de San José de Gracia, Sonora central. Tesis de licenciatura. Universidad de Sonora, Departamento de Geología. Hermosillo, Sonora, México.

Cuen-Romero, F. J., Beresi, M. S., Montijo, A., Buitrón, B. E., Minjárez, I., & Palafox, J. J., 2013. Chancelloria Walcott, 1920 y Reticulosa Reid, 1958 del Cámbrico medio

de San José de Gracia, Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 581-590.

Cuen-Romero, F.J., Valdez-Holguin, J. E., Buitrón, B. E., Monreal, S.R., Sundberg, F., Montijo-González, A., 2016. Cambrian Stratigraphy of San José de Gracia, Sonora, Mexico: El Gavilán Formation, a new lithostratigraphic unit of middle Cambrian open shelf environment, Bol. Soc. Geol. Mex. Vol. 68 No. 3, P. 429-441.

Danzos-Acuña G.H., 2018. Bioestratigrafía del Cámbrico del Cerro El Sahuaral, Sonora, México: Paleoecología y Paleogeografía. Universidad de Sonora. Tesis profesional de Maestría en Ciencias-Geología.

Damon, P. E., Shafiqullah, M., & Clark, K. F., 1983. Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1052-1071.

Dumble E.T., 1900. Notes on the Geology of Sonora, Mexico. American Institute of Mining Engineers, Transactions, p. 122-152.

Dunham, R.J., 1962. Classification of Carbonate Rocks according to Depositional Texture. American Association of Petroleum Geologists, 1, 108-121.

Eells, J. L., 1972. The Geology of the Sierra de la Berruga, Northwestern Sonora, Mexico (Doctoral dissertation, California State University, San Diego).

Engelbretsen, M. J., & Peng, S., 2007. Middle Cambrian (Wulingian) linguliformean brachiopods from the Paibi section, Huaqiao Formation, Hunan Province, South China. *Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists*, (34), 311.

Fatka, O., & Kordule, V., 1992. New fossil sites in the Jince Formation (Middle Cambrian, Bohemia). *Věst. Čes. geol. Úst*, 67(1), 47-60.

Fries Jr, C., 1962. Reseña de la geología del Estado de Sonora, con énfasis en el Paleozoico: Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros, 14, 257-273.

Flügel, E., 2004. Microfacies analysis of carbonate rocks. *Analysis, interpretation and application*. Springer, Berlin.

Folk, R. L., 1962. Spectral subdivision of limestones types, Amer. Assoc. Petr. Geol.

Geyer, G., & Landing, E., 2006. Ediacaran–Cambrian depositional environments and stratigraphy of the western Atlas regions. *Beringeria*, Special Issue, 6, 47-112.

González-León, C., 1986. Estratigrafía del Paleozoico de la Sierra del Tule, noreste de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 6, no. 2, p. 117-135.

INEGI, 2008. Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México, 31 p.

Jell, P. A., 1975. The abathochroal eye of *Pagetia*, a new type of trilobite eye. *Fossils and Strata*, 4, 33-43.

Jell, P.A. & Hughes, N.C. 1997. Himalayan Cambrian trilobites. Special Papers in Palaeontology 58, 1-113.

Jiménez-Valverde, A., 2000. Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar los inventarios biológicos. *Rev Iber Aracnol*, 8, 151-161.

Kennedy, W. J., 1967. Burrows and surface traces from the Lower Chalk of southern England. *Bull. Br. Mus. Nat. Hist. (Geol.)*, 15, 125-167.

Knaust, D., 2017. Atlas of Trace Fossils in Well Core, Appearance, Taxonomy and Interpretation.

Lochman, C., 1948. New Cambrian trilobite genera from northwest Sonora, Mexico. *Journal of Paleontology*, 22(4), 451-464.

Longoria, J. F., & Pérez, V. A., 1979. Bosquejo geológico de los Cerros Chino y Rajón, cuadrángulo Pitiquito-La Primavera (NW de Sonora): Universidad de Sonora. *Boletín Departamento de Geología*, 1(2), 9-44.

Mc Dowell, F. W., Roldán, Q. J., Amaya, M. R., & González, C. M. (1994). The Tarahumara Formation a neglected component of the Laramide magmatic arc in Sonora: GEOS. *Boletín de la Unión Geofísica Mexicana, Epoca II*, 12(5), 76.

McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., & Amaya-Martínez, R., 1997. Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 109(10), 1349-1360.

McMenamin, M.A., 1987. Lower Cambrian trilobites, zonation and correlation of the Puerto Blanco Formation, Sonora, México. *Journal of Paleontology* 61(4):738-749.

Miller, K. B., 2014. The Fossil Record of the Cambrian “Explosion”: Resolving the Tree of Life1. *Perspectives on Science and Christian Faith*, 66(2), 67-83.

Montiel, R. M., y Flores, J. L., 2009. Distribución de la Formación Tarahumara y sus relaciones con la mineralización. XXVIII Convención Minera Internacional.

Moysiuk, J., Smith, M. R., & Caron, J. B., 2017. Hyoliths are Palaeozoic lophophorates. *Nature*, 541(7637), 394.

Nardin, E., Almazán-Vásquez, E., & Buitrón-Sánchez, B. E., 2009. First report of *Gogia* (Eocrinoidea, Echinodermata) from the Early-Middle Cambrian of Sonora (Mexico), with biostratigraphical and palaeoecological comments. *Geobios*, 42(2), 233-242.

Öpik, A. A., 1956b. Cambrian geology of the Northern Territory. *Ibid.*, 25-54.

- Paz-Moreno, F. A., Demant, A., Cocheme, J. J., Dostal, J., & Montigny, R., 2003. The Quaternary Moctezuma volcanic field: a tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, México. Special paper-Geological Society of America, (374), 439-455.
- Peel, J. S., 2018. An epiphytacean-Girvanella (Cyanobacteria) symbiosis from the Cambrian (Series 3; Drumian) of North Greenland (Laurentia). *Bulletin of Geosciences*, 93(3), 327-336.
- Quintana, J. R., 1981. Evolucion tectonica del estado de Sonora. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 5(2), 178-185.
- Quintana, J. R., & Noriega, F. J. G., 1998. An overview of the Cenozoic tectonic and magmatic evolution of Sonora, northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 4.
- Reed, F. R. C., 1910. The Cambrian fossils of Spiti. Superintendent government printing, India.
- Carranco, E. R., 1987. Condiciones paleoambientales de depósito de las formaciones cámbricas del área de Caborca Sonora. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 7(1), 22-27.
- Rodríguez-Castañeda J. L., 1996, Late Jurassic and Mid-Tertiary Brittle-Ductile Deformation in Opodepe region, Sonora, Mexico, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(1), 1-9.
- Servicio Geológico Mexicano, 2011, Carta Geológico-Minera y Geoquímica Carbó H12-D21 escala 1: 50 000, Estado de Sonora.
- Shergold, J. H., Laurie, J. R., & Sun, X., 1990. Classification and Review of the Trilobite Order, Agnostida Salter, 1864: An Australian Perspective.
- Stewart, J.H., McMenamin, M.A., MoralesRamírez, J.M., 1984, Upper Proterozoic and Cambrian Rocks in the Caborca Region, Sonora, Mexico – *Physical stratigraphy, biostratigraphy, paleocurrent studies, and regional relations: US Geological Survey Professional Paper*, 1309, 36.
- Stewart, J. H., Amaya-Martínez, R., & Palmer, A. R., 2002. Neoproterozoic and Cambrian strata of Sonora, Mexico: Rodinian supercontinent to Laurentian Cordilleran margin. *Special Papers-Geological Society of America*, 5-48.
- Stoyanow, A., 1942. Paleozoic paleogeography of Arizona. *Bulletin of the Geological Society of America*, 53(9), 1255-1282.
- Sundberg, F.A., 1994. Corynexochida and Prychopariida (Trilobita, Arthropoda) of the Ehmaniella Biozone (Middle Cambrian), Utah and Nevada. Contributions in Science. Num. 446. Pp. 137.

Walcott, C.D. 1920. Cambrian geology and Paleontology IV: 06, Middle Cambrian Spongiae. *Smithsonian Miscellaneous Collections* 67:261-364

Webster, M., 2011. Trilobite biostratigraphy and sequence stratigraphy of the upper Dyeran (traditional Laurentian ‘Lower Cambrian’) in the southern Great Basin, USA. *Museum of Northern Arizona Bulletin*, 67, 121-154.

Weidner, T., & Nielsen, A. T., 2016. Tomagnostus brantevikensis n. sp. (Trilobita) from the middle Cambrian of Scania, Sweden. *Geological Society of Denmark. Bulletin*, 64, 111-116.

Wentang, Z., Liwen, X., Yinhuan, L., & Xiansong, M., 1995. Cambrian stratigraphy and trilobites from Henan.

Whittington, H. B., 1998. Blaker, M.R & Peel, J.S., 1997. Lower Cambrian trilobites from North Greenland. *Meddelelser om Grønland*, Geoscience no. 35, 145 pp. Copenhagen: The Commission for Scientific Research in Greenland. Price DKK 325.00 (plus postage); hard covers. ISBN 87 90369 13 0; ISSN 0106-1046.-. *Geological Magazine*, 135(2), 287-300.

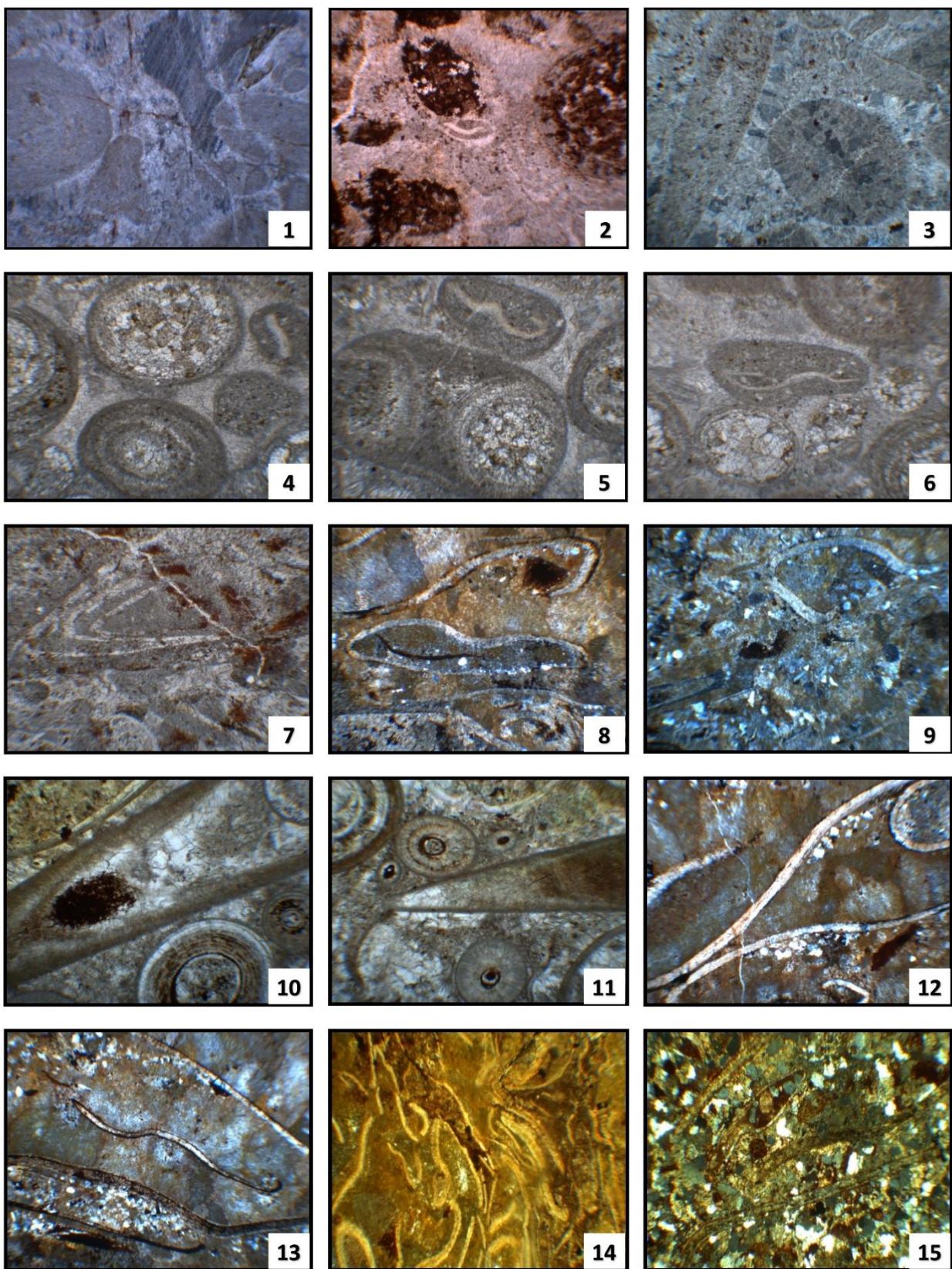
Wilson, J. L., 1975. The lower carboniferous Waulsortian facies. In *Carbonate Facies in Geologic History* (pp. 148-168). Springer, New York, NY.

Young, G. A., & Ludvigsen, R., 1989. *Mid-Cambrian trilobites from the lowest part of the Cow Head Group*, western Newfoundland. Energy, Mines and Resources Canada, Geological Survey of Canada.

Zell, M.G., & Rowell, A. J., 1988. Brachiopods of the Holm Dal Formation (late Middle Cambrian), central North Greenland. Stratigraphy and Palaeontology of the Holm Dal Formation (late Middle Cambrian), central North Greenland. *Meddelelser om Grønland*, Geoscience, 20, 119-144.

Zhang, X., & Shu, D., 2014. Causes and consequences of the Cambrian explosion. *Science China Earth Sciences*, 57(5), 930-942.

## **18. LÁMINAS**



**LAMINA 1.** 1.) Intraclastos, fragmentos de equinodermos y estilolitas, en una matriz de microesparita.; 2.-Oolitas llenas de óxidos y oolita con un centro de trilobites, en una matriz de micrita.; 3.- Intraclastos, oolitas micritizadas y en la parte superior oolita con trilobite (centro), en un cemento de esparita.; 4.- Oolitas superficiales y micritizadas, reemplazadas por esparita en un cemento de esparita.; 5.- Oolitas unidas por micrita y oolita con centro de trilobites en un cemento de esparita.; 6.- Oolitas normales , superficiales llenas de esparita y con centro de un trilobite, en un cemento de esparita.; 7.- Hiolítido con bordes recristalizados y equinodermos en un matriz de micrita.; 8.- Fragmentos de trilobites recristalizados y equinodermo en una matriz de micrita.; 9.- Trilobites recristalizados con aporte terrígeno.; 10.- *Salterella* en un cemento de esparita.; 11.- *Salterella* y cortes de trilobites en un cemento de esparita.; 12.- Fragmentos de trilobites con aporte terrígeno en una matriz de micrita.; 13.- Trilobites con aporte terrígeno en una matriz de micrita.; 14.- Trilobites en una matriz de micrita.; 15.- Caliza arenosa con trilobites.

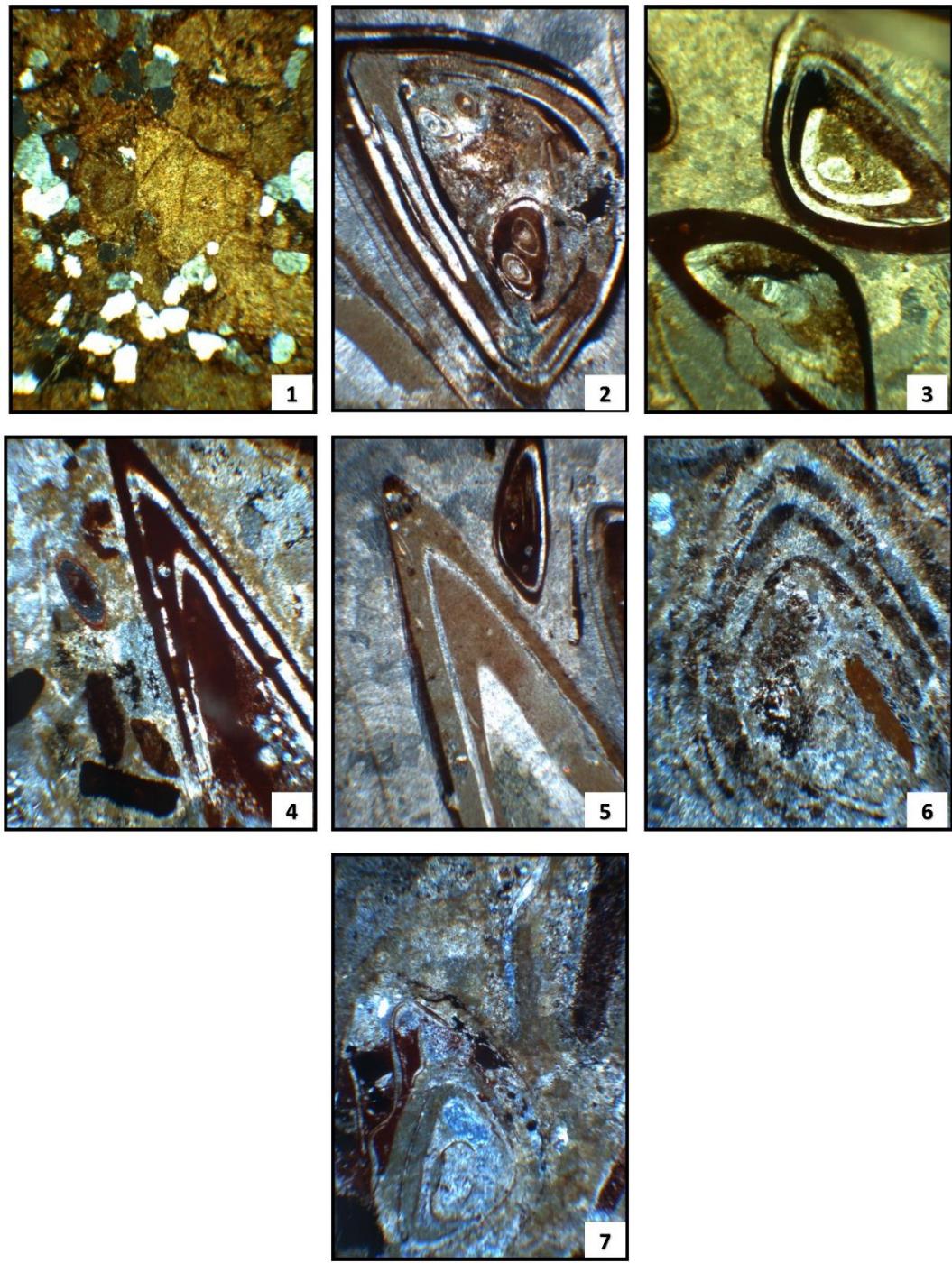


LÁMINA 2. 1.- Caliza arenosa.; 2 y 3.- Hiolítidos mostrando varias capas en un cemento de esparita.; 4 y 5.- Cortes de hiolítidos en un cemento de esparita.; 6.- Hiolítido mostrando capas internas bien preservadas.; 7.- Hiolítido y cortes de trilobites.