



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS

POSGRADO EN BIOCENCIAS

PALEOECOLOGÍA DE LAS COMUNIDADES MARINAS DEL CÁMBRICO DEL ÁREA EL SAHUARAL, SONORA, MÉXICO: PALEOAMBIENTE, PALEOBIOGEOGRAFÍA Y BIOESTRATIGRAFÍA

TESIS

que para obtener el grado de:

DOCTOR EN BIOCENCIAS

presenta:

HÉCTOR ARTURO NORIEGA RUIZ

Hermosillo, Sonora, México

26 de agosto de 2022

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Hermosillo, Sonora a 07 de septiembre del 2022.

Asunto: Cesión de derechos

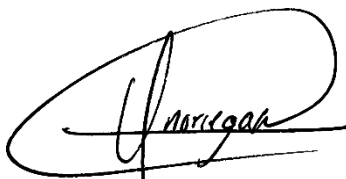
**UNIVERSIDAD DE SONORA
P R E S E N T E.**

Por este conducto hago constar que soy autor y titular de la obra denominada **Paleoecología de las comunidades marinas del Cámbrico del área El Sahuaral, Sonora, México: Paleoambiente, Paleobiogeografía y Bioestratigrafía**, en los sucesivo LA OBRA, realizada como trabajo terminal con el propósito de obtener el Grado de **Doctor**, en virtud de lo cual autorizo a la Universidad de Sonora (UNISON) para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución, distribución pública, distribución electrónica y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios de la institución y se integren a los repositorios de la universidad, estatales, regionales, nacionales e internacionales.

La UNISON se compromete a respetar en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente.

De la misma manera, manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general cualquier parte de LA OBRA son de mi entera responsabilidad, por lo que deslindo a la UNISON por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual y/o cualquier responsabilidad relacionada con la OBRA que cometa el suscrito frente a terceros.

ATENTAMENTE



Héctor Arturo Noriega Ruiz

Hermosillo, Sonora, México

Septiembre, 2022.

PALEOECOLOGÍA DE LAS COMUNIDADES MARINAS DEL CÁMBRICO DEL ÁREA EL
SAHUARAL, SONORA, MÉXICO: PALEOAMBIENTE, PALEOBIOGEOGRAFÍA Y
BIOESTRATIGRAFÍA

TESIS

que para obtener el grado de:

DOCTOR EN BIOCENCIAS

presenta:

HÉCTOR ARTURO NORIEGA RUIZ

Hermosillo, Sonora, México

Agosto del 2022

APROBACIÓN

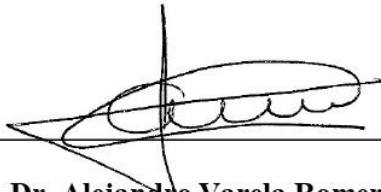
Los miembros del Comité designado para revisar la tesis titulada **Paleoecología de las comunidades marinas del Cámbrico del área El Sahuaral, Sonora, México: Paleoambiente, Paleobiogeografía y Bioestratigrafía** presentada por **Héctor Arturo Noriega Ruiz**, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Doctorado en Biociencias.



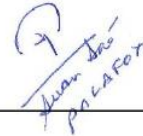
Dr. Francisco Javier Cuen Romero
Director y Presidente



Dr. Luis Fernando Enríquez Ocaña
Co-Director



Dr. Alejandro Varela Romero
Sinodal interno y Secretario



Dr. Juan José Palafox Reyes
Sinodal interno



Dr. Javier Ortega Hernández
Sinodal externo

DEDICATORIA

A mis padres, Héctor y Claudia, por su amor único e incondicional. Gracias por amarme y apoyarme en todo momento, ustedes con su educación, sus sacrificios y consejos han hecho posible que mis sueños se vuelvan una realidad. Ustedes son mi perfecto ejemplo a seguir. Por siempre, mi corazón está con ustedes.

A mi gran amigo, el Dr. Francisco Cuen, quien ha sido un pilar fundamental para mi formación como académico y persona. Gracias por todo su apoyo incondicional, su paciencia, sus consejos, su determinación y esfuerzo, por ser mi mayor admiración y ejemplo en la paleontología. A Griselda Guerrero por su cariño, su apoyo, y permitirme ser parte de la familia.

Al M.C. José Alfredo Ochoa Granillo, quien desde un inicio no dudó en apoyarme y seguirme motivando a cumplir mis metas. A la M.C. Alejandra Montijo y al M.C. Ismael Minjárez por su apoyo y motivación en todo momento, gracias por los consejos.

Al Dr. José Eduardo Valdez Holguín, por creer en mí y apoyarme.

A mi familia, quien siempre me ha apoyado.

A todos mis maestros, amigos, compañeros, gracias por cada momento, consejo y enseñanza.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, y en especial al Posgrado en Biociencias, por brindarme la oportunidad de ser parte del Programa de Doctorado, por su compromiso y dedicación. Al CONACYT por el apoyo de beca para estos estudios.

Agradezco enormemente a mis directores de tesis, el Dr. Francisco Javier Cuen Romero, por su dedicación, esfuerzo y apoyo en todo momento, y el Dr. Luis Fernando Enríquez Ocaña por su dedicación, disponibilidad, amabilidad y conocimientos. Gracias por creer en mí y por su ayuda trascendental. A los miembros de mi comité de tesis, Dr. Juan José Palafox Reyes, Dr. Alejandro Varela Romero, y Dr. Javier Ortega Hernández, por su interés, apoyo y confianza para que este proyecto pudiera concretarse. Gracias por su esfuerzo, disponibilidad y enseñanzas en todo momento.

Al Dr. Marco Antonio López Torres, coordinador del Posgrado en Biociencias, por su dedicación, apoyo y disponibilidad. A la M.C. Dolores Vásquez del Castillo por su paciencia, amabilidad, disponibilidad, apoyo y sus consejos en toda mi estancia en el Posgrado. A la Dra. Nohemí Gámez, por su motivación, esfuerzo y confianza en toda mi estancia.

Agradezco a mis maestros del DICTUS: Dra. Ángela Corina Hayano, Dr. Enrique De la Ree, Dr. José Romo León, Dr. Luis Enrique Gutiérrez Millán, Dr. Alf Enrique Meling, Dra. Maribel Ovando y Dra. Mayra Lizett González.

A los maestros del Departamento de Geología: Dr. Rogelio Monreal Saavedra, Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega, Dr. Guadalupe Espinoza Maldonado, M.C. Margarita de la O Villanueva, M.C. Grisel Alejandra Gutiérrez, M.C. Alba Lucina Martínez, y M.C. Iván Rosario Espinoza Encinas.

RESUMEN

Durante el Cámbrico ocurrió una compleja interacción de procesos abióticos y bióticos, los cuales condujeron a una rápida cladogénesis, y al establecimiento de los ecosistemas marinos modernos constituidos por organismos con esqueletos biomineralizados. El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la paleoecología de las comunidades marinas de una sucesión sedimentaria marina de Cámbrico en el área El Sahuaral, Sonora central.

La Formación Proveedora consiste en una secuencia detrítica con una asociación bentónica infaunal de baja diversidad (5) y equitatividad de especies, la cual es dominada por fósiles traza posiblemente de anélidos, lo que sugiere ambientes arenosos y costeros.

La Formación Buelna está constituida de una secuencia carbonatada compuesta principalmente caliza arenosa y caliza fosilífera con intercalaciones de lutita. La unidad presenta una baja riqueza de especies (5), dominada por comunidades epibentónicas (*Girvanella*), considerados como constructores de arrecifes autótrofos del Cámbrico.

La Formación Cerro Prieto consiste en una secuencia de caliza oolítica con una baja diversidad (2) y equitatividad de especies, representada por la dominancia de consumidores primarios (detrítivoros) en aguas marinas altamente agitadas, someras y saturadas.

La Formación El Gavilán está compuesta por una secuencia de lutita con horizontes de caliza fosilífera, y una gran variedad de grupos funcionales, dominado por organismos detrítivoros-epifaunales y los carnívoros nectobentónicos. El contenido biótico presenta una alta riqueza (21) y equitatividad de especies, y sugiere un cambio de facies hacia un ambiente más profundo de aguas tranquilas.

Los análisis permiten establecer una estrecha correlación con los depósitos de Norteamérica, particularmente California, Nevada, Utah, y Columbia Británica, así como Sur de China y Argentina. Durante el Cámbrico, estos depósitos se situaban en el ecuador, lo que favoreció al desarrollo de gremios y la preservación de estos organismos en las rocas debido a las altas tasas de sedimentación llevadas a cabo en plataformas carbonatadas.

Palabras clave: Cámbrico, Bioestratigrafía, Paleoambiente, Paleocomunidad, Sonora.

ABSTRACT

During the Cambrian, a complex interaction of abiotic and biotic processes occurred, which led to rapid cladogenesis, and the establishment of modern marine ecosystems made up of organisms with biomineralized skeletons. The objective of this work is to characterize the paleoecology of the marine communities of a Cambrian marine sedimentary succession in the El Sahuaral area, central Sonora.

The Proveedora Formation consists of a detrital sequence with an infaunal benthic association of low diversity (5) and equitable species, which is dominated by trace fossils, possibly of annelids, suggesting sandy and coastal environments.

The Buelna Formation is made up of a carbonate sequence composed mainly of sandy limestone and fossiliferous limestone with intercalations of shale. The unit has a low species richness (5), dominated by epibenthic communities (*Girvanella*), considered as Cambrian autotrophic reef builders.

The Cerro Prieto Formation consists of an oolitic limestone sequence with low diversity (2) and evenness of species, represented by the dominance of primary consumers (deposit feeders) in highly agitated, shallow and saturated marine waters.

The El Gavilán Formation is composed of a shale sequence with fossiliferous limestone horizons, and a great variety of functional groups, dominated by deposit feeders-epifaunal organisms and nectobenthic carnivores. The biotic content presents a high richness (21) and evenness of species and suggests a change of facies towards a deeper environment of calm waters.

The analysis allows a close correlation to be established with deposits from North America, particularly California, Nevada, Utah, and British Columbia, as well as South China and Argentina. During the Cambrian, these deposits were located on the equator, which favored the development of guilds and the preservation of these organisms in the rocks due to the high rates of sedimentation carried out on carbonate platforms.

Key words: Cambrian, Biostratigraphy, Paleoenvironment, Paleocommunity, Sonora.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
I. ANTECEDENTES.....	7
II. HIPÓTESIS.....	10
III. OBJETIVOS.....	11
a) Objetivo general.....	11
b) Objetivos particulares.....	11
IV. ARTÍCULOS PUBLICADOS.....	12
4.1. Artículos en revistas científicas indexadas.....	13
4.1.1. Cambrian stratigraphy (Series 2 to Miaolingian) of the El Sahuaral area in central Sonora, Mexico: Biostratigraphic implications. DOI:10.1016/j.jsames.2020.102797.....	13
4.1.2. Cambrian (Series 2 to Miaolingian) platform facies from central Sonora, Mexico and the regional correlation. DOI: 10.1016/j.palwor.2021.03.002.....	14
4.1.3. Quantitative paleoecology of Cambrian (Series 2-Miaolingian) communities from central Sonora, Mexico. DOI: 10.1016/j.palwor.2021.12.003.....	15
4.2. Artículos en revista arbitrada.....	16
4.2.1. Paleozoico inferior de Sonora, México: 120 años de investigación paleontológica.....	16
4.2.2. <i>Euagnostus interstrictus</i> (White, 1874) (Trilobita: Agnostida) del Cámbrico medio (Miaolingiano-Wuliuano) del cerro El Sahuaral, Sonora central, México. .	17
4.2.3. Bioestratigrafía del Cámbrico en México.....	18
4.3. Artículos publicados en revistas de divulgación-difusión.....	19
4.3.1. Métodos cuantitativos en paleoecología de comunidades. DOI: 10.36790/epistemus.v14i29.138.....	19
4.3.2. A new locality of trilobites in Sonora: El Sahuaral area.....	20
V. DISCUSIONES.....	21
VI. CONCLUSIONES.....	27
VII. RECOMENDACIONES.....	29
VIII. LITERATURA CITADA.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Artículo publicado en la revista Journal of South America Earth Sciences (2020).	13
Figura 2. Artículo 1 publicado en la revista Palaeoworld (2022).....	14
Figura 3. Artículo 2 publicado en la revista Palaeoworld (2022).....	15
Figura 4. Artículo 1 publicado en la revista Paleontología Mexicana (2020).	16
Figura 5. Artículo 2 publicado en la revista Paleontología Mexicana (2020).	17
Figura 6. Artículo 3 publicado en la revista Paleontología Mexicana (2022).	18
Figura 7. Artículo publicado en la revista EPISTEMUS (2021).	19
Figura 8. Artículo publicado en la revista The Trilobites Papers 25 (2022).	20

INTRODUCCIÓN

La Era Paleozoica comprende algunos de los eventos más importantes en la historia de la vida en la Tierra, en particular la Radiación Evolutiva del Cámbrico, caracterizada por ser un evento evolutivo sin precedente en la historia de la biosfera (Wills *et al.*, 1994; Seilacher, 1996; Briggs, 2015). La Radiación Evolutiva del Cámbrico representa la transición de los ecosistemas dominados por las comunidades microbianas a los ecosistemas marinos modernos (Landing *et al.*, 2018), donde los organismos procariontes evolucionan a organismos eucariontes. Se ha sugerido que la eucariogénesis, la transición de procariota a eucariota fue impulsada por el origen de mecanismos genéticos complejos, los cuales incluyen singamia, cariogamia y meiosis (Doglioni *et al.*, 2016). Por otro lado, el aumento de O₂ se prolongó por 2.4 Ga y fue posiblemente tóxico para la biota arcaica, esto en sinergia con otras tensiones ambientales llevaron al desarrollo de características como el sistema de endomembranas y la adquisición de la mitocondria (Gross y Bhattacharya, 2010; Doglioni *et al.*, 2016).

Durante el Cámbrico temprano ocurrió una rápida diversificación animal que implica la división y posterior divergencia de poblaciones (cladogénesis), además, se desarrolló el proceso de especiación en el que una especie ancestral se divide en una especie hija (Lincoln *et al.*, 1995; Budd *et al.*, 2001). Este evento es denominado como evolución explosiva del Cámbrico (Seilacher, 1956), explosión o radiación del Cámbrico (Brasier y Hewitt, 1979), y big bang de la evolución (Nash, 1995); sin embargo, el término “explosión” es mayormente aceptado debido a las marcadas diferencias con respecto radiaciones adaptativas en los periodos geológicos posteriores (Zhan, 2018; Zhang y Shu, 2021).

Desde el punto de vista filogenético, los metazoos actuales se agrupan en 38 grupos biológicos a nivel de phylum, con 6 phyla de metazoos basales parafiléticos y 32 phyla de bilaterales monofiléticos. Durante la Explosión Cámbrica se originaron 26 de los 38 phyla de metazoos que se conocen actualmente como poríferos, braquiópodos, moluscos, artrópodos, equinodermos, entre otros de afinidades inciertas (Zhang *et al.*, 2017). Según las afinidades filogenéticas, los phyla bilaterales se clasifican en bilaterales basales (3 phyla), protostomados (23 phyla, incluidos 8 phyla de ecdisozoos, 14 phyla de lofotrocozoos y Chaetognatha) y deuterostomados (6 phyla) (Nielsen, 2012; Zhang y Shu, 2014). Algunos autores proponen que la evolución de los metazoos se debe a una serie de cambios dinámicos

y globales en las condiciones redox y el suministro de nutrientes, los cuales permitieron eventos de renovación que sostuvieron múltiples radiaciones de metazoos (Dong *et al.*, 2019; Bowyer *et al.*, 2021).

Para determinar la causa principal de la Explosión Cámbrica han existido diversas hipótesis que se postulan como procesos independientes, sin embargo, las hipótesis con respecto a la Explosión Cámbrica se han agrupado en tres categorías principales: desarrollo/genética, ecológica y abiótica/ambiental, complementado con hipótesis geoquímicas (Marshall, 2006; Smith y Harper, 2013; Zhang y Shu, 2014; Briggs 2015; Sperling y Stockey, 2018). En estos estudios se ha demostrado que la Explosión Cámbrica no es un evento único ni un proceso puramente biológico, sino un evento evolutivo gradual de gran magnitud que se manifestó en aspectos relacionados con la explosión de planos corporales animales, el aumento del tamaño del cuerpo, la revolución de sustrato, aumento de la complejidad del ecosistema, perturbaciones ambientales, entre otros (Zhang y Shu, 2021). La explosión de planos corporales bilaterales tuvo lugar en los primeros 20 Ma del Cámbrico (Erwin y Valentine 2013; Zhang y Shu 2014; Mángano y Buatois 2020).

Por lo general, la interpretación mayormente aceptada comprende que durante el Cámbrico ocurrió una compleja interacción de procesos abióticos y bióticos, los cuales condujeron a una rápida cladogénesis, y el establecimiento de los ecosistemas marinos modernos constituidos por organismos con esqueletos biomineralizados (Schiffbauer *et al.*, 2016; Zhang y Shu, 2021). Los ecosistemas marinos del Cámbrico fueron dominados por organismos con un exoesqueleto biomineralizado en su mayoría y con mayor complejidad morfológica; la concentración de calcio suficientemente disuelta en los océanos facilitó la eclosión de los animales acorazados (Dickson, 2002). Además, esto permitió el aumento de las interacciones entre organismos, constituyendo la diferenciación de nichos ecológicos y el desarrollo de estructuras bióticas complejas (Seilacher, 1996).

Los primeros fósiles de trazas sugieren fuertemente la presencia de bilaterales vermiformes hace aproximadamente 560 Ma, durante el Ediacárico tardío, sin embargo, una gran explosión de planos corporales bilaterales tuvo lugar en los primeros 20 Ma del Cámbrico (Erwin y Valentine 2013; Zhang y Shu 2014; Mángano y Buatois 2020). Desde el punto de vista ecológico, los metazoos dominaron los océanos al menos en 100 Ma posteriores desde su aparición en el Criogénico (~720–635 Ma) (Zhang y Shu, 2021). Durante el Cámbrico surgió una revolución ecológica que conduciría a la formación de

ecosistemas dominados por metazoos, considerando que la Explosión Cámbrica prevaleció ~40 Ma (Zhang y Shu, 2021)

La mayor evidencia de fósiles de metazoos basales se encuentra dentro de los primeros tres pisos del Cámbrico (Zhang y Shu, 2014). La adición de nuevas clases refleja el patrón de nueva adición de phylum, comenzando en el Fortuniano, elevándose al Piso 3 del Cámbrico (Zhang y Shu, 2014; Zhang *et al.*, 2017). Durante el Piso 3 del Cámbrico aparecieron 20 phyla vivas y 6 phyla extintas, entre los 18 phyla vivos restantes, 9 phyla se agregan continuamente al registro fósil en los últimos períodos geológicos y 9 phyla no se conocen en el registro fósil (Bambach *et al.*, 2007). La estructura fundamental de las redes alimentarias marinas de metazoos parece haber sido establecida durante el Piso 3 del Cámbrico, como la estructura de la biota de Chengjiang (Zhang y Shu, 2021).

Se ha sugerido que el resto de los phyla aparecen en los períodos posteriores al Cámbrico, o se encuentran ausentes en el registro fósil, carecen de partes del cuerpo biomineralizadas, por lo tanto, tienen poco o nulo potencial de conservación (Zhuravlev y Wood, 2018). Por lo tanto, es muy probable que estos phyla aparecieran en el Cámbrico temprano, aunque por el momento no se han encontrado en fósiles de *Lagerstätten* excepcionalmente conservados (Zhang y Shu, 2014; Zhuravlev y Wood, 2018). Es posible considerar la preservación excepcional como la preservación de estructuras no mineralizadas, incluida plantas) y de esqueletos articulados de condiciones hidrográficas, sedimentológicas y diagenéticas tempranas extraordinarias (Seilacher *et al.*, 1985). Ventanas tafonómicas notablemente similares producen biotas bastante diferentes, lo que nuevamente manifiesta el potencial de la Explosión Cámbrica (Bottjer *et al.*, 2019). La importancia de la Explosión Cámbrica radica en el éxito ecológico de los linajes de metazoos, representando la mayor innovación evolutiva, aquella en la que se establecieron todos los planes estructurales de la vida actual.

La columna bioestratigráfica para el Cámbrico está basada en rangos de trilobites (Lochman-Balk y Wilson, 1958; Webster, 2011). Actualmente, dentro de la Clase Trilobita Walch, 1771, se reconocen once grupos con categoría de orden, destacando la presencia de los Redlichiida Richter, 1932 y Agnostida Salter, 1864 (considerados como formas basales), así como Corynexochida Kobayashi, 1935 y Ptychopariida Swinnerton, 1915. La alta resolución de las zonas bioestratigráficas basada en trilobites proporcionan una herramienta

valiosa para reconstruir la paleogeografía durante el Cámbrico (Webster, 2011; Webster y Bohach, 2014).

Lo trilobites del Orden Agnostida indican una notable diversidad evolutiva principalmente, una amplia distribución geográfica y corto rango estratigráfico durante el Cámbrico medio y tardío, por lo cual, son considerados como principales indicadores bioestratigráficos (Peng *et al.* in Gradstein *et al.*, 2012). La estrategia ecológica y modo de vida de los trilobites agnóstidos ha sido debatido por algunos autores (Robison, 1972; Müller y Walossek, 1987; Conway Morris y Rushton, 1988), los cuales los consideran como formas pelágicas o planctónicas. En el Cámbrico, estos organismos estaban restringidos a ambientes de plataforma externa, viviendo en aguas oceánicas o en aguas neríticas asociadas al mar abierto (Robison, 1972). Además, se argumenta que su amplia distribución se debe por un estadio larvario prolongado y su estrecha dependencia de facies indica que el modo de vida adulto estaba relacionado con ambientes profundos (Schovsbo, 2000). Sin embargo, es posible que la correlación sea cuestionable debido al fuerte provincialismo y la presencia de faunas endémicas de trilobites polímeros (Shergold, 1997). La Familia Oryctocephalidae Beecher, 1897 es considerada de importancia en correlación internacional. El acmé de su distribución y variaciones morfológicas se presentó en el Cámbrico medio y coincide con la última etapa de los trilobites redlicoideos. La proliferación de la Familia Oryctocephalidae fue seguida por un marcado declive, reflejando una biozona en numerosas partes del mundo (Shergold, 1969).

En México, los estudios del Cámbrico sedimentario han incrementado significativamente en las últimas décadas, principalmente en la región central y este del estado de Sonora, destacando la presencia de sucesiones estratigráficas continuas de facies marinas del Cámbrico inferior-medio (Almazán-Vázquez *et al.*, 2006; Nardín *et al.*, 2009; Cuen *et al.*, 2013; Cuen-Romero *et al.*, 2018; 2019a; 2019b). Dentro de la distribución de trilobites agnóstidos y poliméridos se han documentado la presencia de al menos 86 especies distribuidas en 61 géneros para el Cámbrico, con asociaciones bióticas tales como cianobacterias, esponjas silíceas, arqueociatos, braquiópodos, hiolítidos y equinodermos en las áreas de Caborca, Cananea, Mazatán y Arivechi y San José de Gracia (Cuen-Romero *et al.*, 2018). Sin embargo, existe únicamente un trabajo de investigación basado en el análisis de paleoecológico en rocas cámbricas de México (Cuen-Romero *et al.*, 2019a), determinando comunidades bentónicas con diversos grupos funcionales y gremios bien

establecidos. Con base a las reconstrucciones paleoecológicas, se reconocieron condiciones paleoambientales de las distintas unidades litoestratigráficas en el área de estudio.

Actualmente, los estudios ecológicos a largo plazo son relevantes para evaluar la variabilidad relacionada a los sistemas biológicos e investigar fenómenos ecológicos que ocurren lentamente o en escalas de tiempo prolongadas, sin embargo, la paleoecología proporciona información sobre la historia biótica y el medio ambiente dentro de un contexto ecológico en escalas temporales relevantes para los ecólogos modernos (Foster *et al.*, 1990). El uso de la paleoecología es considerado como herramienta fundamental para comprender la existencia de diversos recursos naturales y conocer la respuesta de los ecosistemas del planeta ante el episodio actual del cambio ambiental global (Bottjer, 2016). A nivel mundial, los estudios de paleoecología del Cámbrico se han incrementado en los últimos años, enfocándose principalmente en el estudio de comunidades (Bambach *et al.*, 2007; Caron y Jackson, 2008; Dunne *et al.*, 2008; Bush *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2020). Con base en la identificación de diversos grupos de organismos, las investigaciones pertinentes determinan y caracterizan la dinámica ecológica de los ecosistemas marinos del Cámbrico. Para el Cámbrico se ha establecido 24 modos de vida, demostrando un cambio importante en la estructura ecológica bentónica (revolución agronómica) (Bambach *et al.*, 2007; Mángano y Buatois 2014).

Se han documentado comunidades marinas del Cámbrico medio en el miembro de la Cantera Walcott de la Formación Stephen, Columbia Británica, determinando la composición y estructura de la comunidad del Gran Cama de Filópodos (Greater Phyllopod Bed – Burgess Shale), lo cual sugiere factores ambientales y ecológicos que controlaban la estructura de la comunidad, así como interacciones entre especies (Caron y Jackson, 2008). En años recientes, se han estudiado los depósitos de la plataforma Yangtze, sur de China, donde se analizó y estableció la estructura de comunidades de la biota Fandiana del Cámbrico temprano, dominada por organismos vágiles bentónicos, por ello, fue posible identificar una estructura trófica multinivel, así como establecer y afinar las consideraciones paleobiogeográficas de la región (Du *et al.*, 2020). Se han realizado numerosas investigaciones de forma independiente sobre la radiación evolutiva inicial, sin embargo, son escasos los estudios que comprenden la dinámica ecológica, y los factores abióticos y bióticos que la caracterizaron.

En el estado de Sonora, las rocas del Cámbrico del área El Sahuaral han sido recientemente estudiadas (Beresi *et al.*, 2019; Noriega-Ruiz *et al.*, 2020; Buitrón-Sánchez *et al.*, 2021; Noriega-Ruiz *et al.*, 2022), en donde se documenta una abundante biota fósil representada por diversos grupos de invertebrados. El objetivo del presente trabajo de investigación es caracterizar la paleoecología de los ecosistemas marinos del Cámbrico en el área El Sahuaral y realizar una comparación con ecosistemas marinos similares del cratón de Norteamérica. Para establecer la paleoecología es necesario determinar los factores bióticos y abióticos que registran las rocas, por lo tanto, se considera estudiar el paleoambiente de depósito, distribución de especies y bioestratigrafía del área. Los índices paleoecológicos proporcionan información con relación a la distribución espacial de organismos bentónicos, incluyendo la riqueza y abundancia de especies. Estos parámetros definen la diversidad dentro de las comunidades, compuestas por grupos funcionales diversos y gremios bien establecidos.

I. ANTECEDENTES

En las últimas décadas, el estudio de las rocas cámbricas en el estado de Sonora ha sido un tema de investigación importante debido a la valiosa exposición de los afloramientos cámbricos y la presencia de fósiles relativamente bien conservados (Almazán-Vázquez, 2002; Nardin *et al.*, 2009; Cuen *et al.*, 2013; Cuen-Romero *et al.*, 2018; 2020; 2022; Beresi *et al.*, 2019; 2021; Noriega-Ruiz *et al.*, 2020; 2022; Sundberg y Cuen, 2021).

Cooper *et al.* (1952), realizaron estudios estratigráficos detallados en las localidades de los cerros Proveedora, Cañedo, Prieto, Difuntos, Buelna, Lista Blanca y Arrojos, además de otras localidades adicionales donde afloran rocas cámbricas en la zona de Caborca. En este trabajo se establecen formalmente las siguientes unidades litoestratigráficas, en orden cronoestratigráfico: para el Cámbrico inferior se consideran las formaciones Puerto Blanco, Proveedora, Buelna. Por otro lado, para el Cámbrico medio se consideran las formaciones Cerro Prieto, Arrojos y El Tren. Además, esta investigación presenta las primeras descripciones sistemáticas del contenido biótico del Cámbrico temprano y Cámbrico medio en el área, incluyendo cianobacterias, arqueociatos, braquiópodos y trilobites. Lochman *in* Cooper *et al.* (1952), describió 32 géneros y 45 especies de trilobites y los correlacionó con otros depósitos de América del Norte.

Cirett y Aguilar (1989) estudiaron la estratigrafía de los depósitos de la región, particularmente un análisis centrado en las características hidrológicas del acuífero. Sin embargo, en este trabajo se documenta por primera vez una secuencia cámbrica expuesta en el área de San José de Gracia, identificando las formaciones Proveedora, Buelna y Cerro Prieto para el Cámbrico. Informalmente, estas unidades están incluidas dentro del Grupo San José.

Cuen *et al.* (2013) describieron sistemáticamente escleritos de *Chancelloria eros*, *Diagoniella* sp., *Allonia?* sp. y asociaciones de espículas de hexactinélidos presentes en los afloramientos del Cámbrico medio del área de San José de Gracia. La presencia de chancellóridos y protoesponjas hexactinélidas se encuentran en asociación biótica con abundantes trilobites como *Peronopsis bonnerensis*, *Oryctocephalites walcotti*, *Elrathina antiqua* y *Ogygopsis typicalis*. El contenido biótico sugiere que estas rocas fueron depositadas en mares cálidos y poco profundos durante el Cámbrico.

Cuen-Romero *et al.* (2016), identificaron una sucesión estratigráfica que se divide en cuatro formaciones (en orden ascendente): Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán. Esta sección cámbrica expuesta en el área de San José de Gracia es similar a la sección originalmente establecida al norte del área de Caborca por Cooper *et al.* (1952) que incluye las formaciones Proveedora, Buelna y Cerro Prieto. Por otro lado, la Formación El Gavilán se propone como una nueva unidad litoestratigráfica formal, debido a que refleja diferencias litológicas sustanciales con un cambio de facies hacia ambientes externos, en comparación con otras rocas del Cámbrico medio expuestas en otras localidades del estado, como la Formación Arrojos del área de Caborca.

Cuen-Romero *et al.* (2018) asignaron las posiciones cronoestratigráficas a los estratos cámbricos de Sonora, utilizando la división propuesta por la Comisión Internacional de Estratigrafía (Webster, 2011; Cohen *et al.*, 2013). Con base en el análisis bioestratigráfico, y las zonas bioestratigráficas propuestas por Webster (2011) y Webster y Bohach (2014), se realizó por primera vez una correlación detallada de los depósitos cámbricos de Sonora.

Cuen-Romero *et al.* (2019a), describen las características paleoecológicas de las comunidades marinas que se dieron en afloramientos cámbricos en la región central de Sonora, así como las condiciones paleoambientales en las que se depositaron. Este trabajo consiste en el primer estudio sobre la paleoecología de rocas cámbricas en México; la importancia de este trabajo radica en proporcionar las bases para posteriores estudios paleoecológicos de manera cuantitativa.

Cuen-Romero *et al.* (2022), realizaron el primer estudio de asociaciones de microfacies para el Cámbrico en México, describiendo microfacies silicilásticas y carbonatadas, así como la determinación de biofacies a partir de trilobites en el cerro El Chihuarruita, San José de Gracia. Los paleoambientes se desarrollaron desde una plataforma interior a una plataforma exterior hacia mares más profundos. Las rocas de la plataforma cámbrica muestran sutiles cambios de facies de oeste a este en todo Sonora (Page *et al.*, 2012; Cuen-Romero *et al.*, 2022). Estas características son similares a otros depósitos en el oeste de América del Norte y Argentina.

Los primeros reportes cámbricos del área de El Sahuaral fueron realizados por Stewart y Poole (2002) quienes mencionan la presencia de rocas cámbricas y la ocurrencia de

trilobites del género *Peronopsis*, *Bathyriscus* y *Oryctocephalus*. Sin embargo, en este reporte no se establecen consideraciones sobre la bioestratigrafía y paleoambiente del área.

Beresi *et al.* (2019) describieron de manera sistemática fragmentos de escleritomos de *Chancelloria eros*, asociados a escleritos aislados de *Allonia tintinopsis*, y *Archiasterella* sp., distribuidos en la Formación El Gavilán. Este trabajo corresponde al primer reporte formal del área de El Sahuaral, estableciendo consideraciones bioestratigráficas y paleogeográficas para estos depósitos.

Noriega-Ruiz *et al.* (2020), realizaron estudios detallados sobre la estratigrafía y bioestratigrafía del área de El Sahuaral. Este trabajo describe una secuencia constituida por rocas sedimentarias de facies marinas y abundante contenido biótico del Cámbrico inferior-Cámbrico medio. Además, se identifican y describen (en orden ascendente) cinco unidades litoestratigráficas previamente documentadas: Provedora, Buelna, Cerro Prieto, El Gavilán y El Tren.

Buitrón-Sánchez *et al.* (2021) reportan y describen sistemáticamente por primera vez la presencia del género *Ubaghsicystis* en México. Esta identificación se basó en la colección de placas aisladas y articuladas distribuidas en la Formación El Gavilán del área de El Sahuaral, las cuales están asociadas a una comunidad marina bentónica típica del Cámbrico medio. Los resultados contribuyen al conocimiento de la distribución paleogeográfica global de los eocrinoideos durante el Cámbrico.

Noriega-Ruiz *et al.* (2022), realizaron un estudio paleoecológico cuantitativo de las comunidades marinas cámbricas que afloran en el cerro El Sahuaral, Sonora central, en el que determinaron consideraciones sobre el paleoambiente y los diferentes grupos funcionales distribuidos en cada una de las unidades litoestratigráficas del área (Noriega - Ruiz *et al.*, 2020).

II. HIPÓTESIS

Las comunidades del Cámbrico del área El Sahuaral se desarrollaron en un ambiente marino bentónico con características paleoecológicas determinadas por el paleoambiente, al ser compuestas por grupos funcionales diversos y gremios bien establecidos, será posible diferenciar la estructura de la comunidad con faunas dominantes, subordinadas y raras.

III. OBJETIVOS

a) **Objetivo general**

Caracterizar la paleoecología de los ecosistemas marinos del Cámbrico en el área El Sahuaral, Sonora central; establecer afinidades con otros depósitos en Sonora y Norteamérica.

b) **Objetivos particulares**

1. Analizar y describir la bioestratigrafía del Cámbrico del área de estudio.
2. Identificar el paleoambiente de depósito y las características abióticas de las diversas comunidades a estudiar.
3. Conocer la distribución de la biota y establecer afinidades intra e interespecíficas con otras formas del Cámbrico de Sonora y Norteamérica.
4. Comparar la dinámica de los ecosistemas marinos del Cámbrico de diversas localidades de Sonora.

IV. ARTÍCULOS PUBLICADOS

La presente tesis doctoral intitulada “Paleoecología de las comunidades marinas del Cámbrico del área El Sahuaral, Sonora, México: Paleoambiente, Paleogeografía y Bioestratigrafía” corresponde a un compendio de publicaciones, el cual incluye:

- a) Tres artículos publicados en revistas científicas indexadas.
- b) Tres artículos en revista arbitrada.
- c) Dos artículos de difusión-divulgación

Cabe mencionar que los derechos de autor de cada publicación pertenecen a su respectiva revista (derechos reservados y/o autor), por lo que a continuación únicamente se presenta la caratula y el DOI de cada una de ellas.

4.1. Artículos en revistas científicas indexadas

4.1.1. Cambrian stratigraphy (Series 2 to Miaolingian) of the El Sahuaral area in central Sonora, Mexico: Biostratigraphic implications. DOI:10.1016/j.jsames.2020.102797

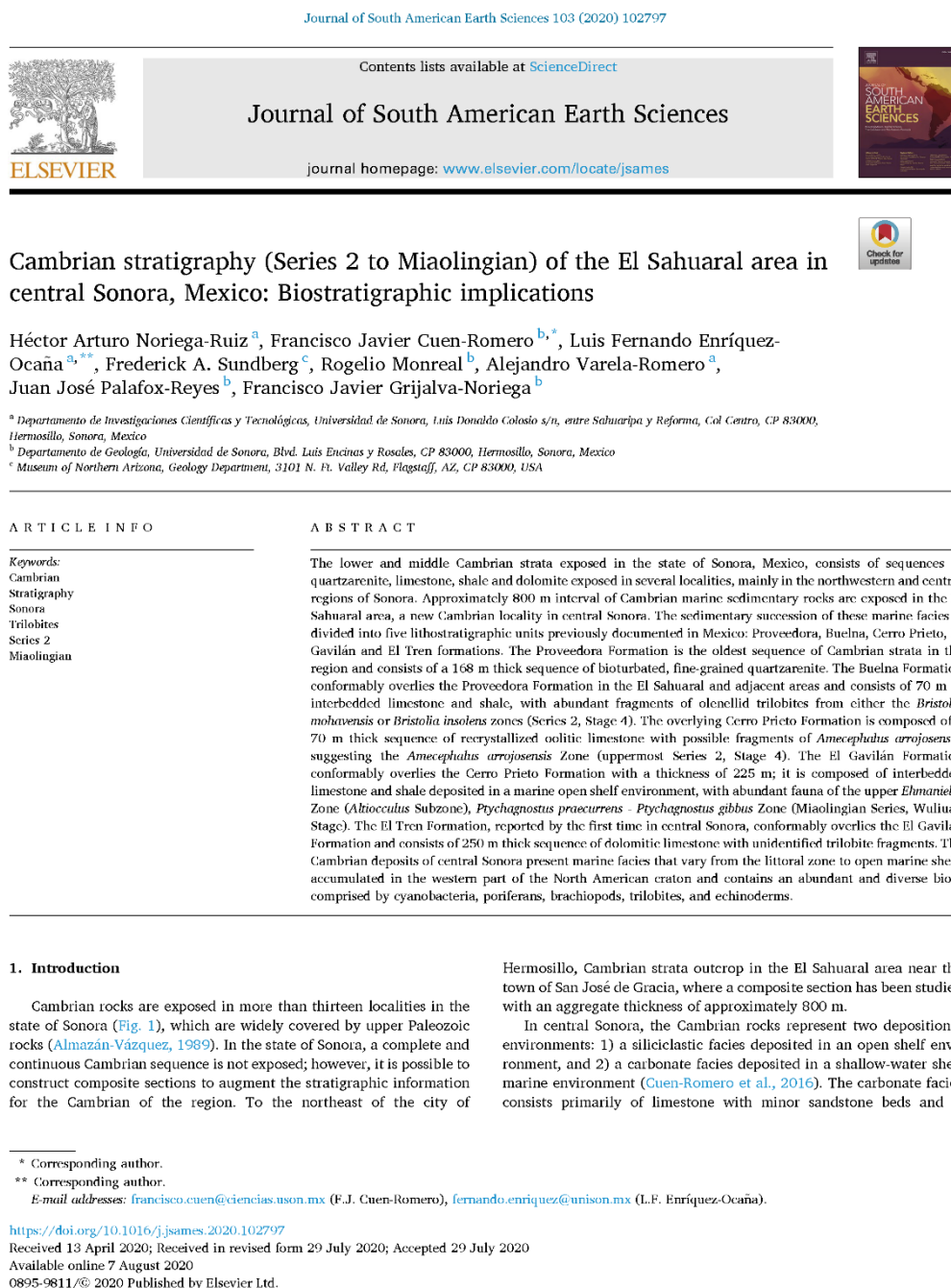


Figura 1. Artículo publicado en la revista *Journal of South America Earth Sciences* (2020).

4.1.2. Cambrian (Series 2 to Miaolingian) platform facies from central Sonora, Mexico and the regional correlation. DOI: 10.1016/j.palwor.2021.03.002



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Palaeoworld 31 (2022) 41–57

Palaeoworld

www.elsevier.com/locate/palwor

Cambrian (Series 2 to Miaolingian) platform facies from central Sonora, Mexico and the regional correlation

Francisco Javier Cuen-Romero^{a,*}, Alejandra Montijo-González^a, Rogelio Monreal^a
Frederick A. Sundberg^b, Guadalupe Espinoza-Maldonado^a
Francisco Javier Grijalva-Noriega^a, Héctor Arturo Noriega-Ruiz^a, Ismael Minjárez-Sosa^a
José Alfredo Ochoa-Granillo^a

^a Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Boulevard Luis Encinas y Rosales, 83000, Hermosillo, Sonora, Mexico

^b Museum of Northern Arizona, Geology Department, 3101 North Fort Valley Road, Flagstaff, Arizona, 86001, USA

Received 5 December 2020; received in revised form 2 February 2021; accepted 18 March 2021

Available online 30 March 2021

Abstract

This study provides new insights about depositional paleoenvironments through siliciclastic microfacies, carbonate microfacies, and biofacies analysis from sedimentary formations of the lower and middle Cambrian (Stage 4–Wuliuan), exposed in central Sonora, northern Mexico. Results of the petrographic analysis of 48 samples revealed the following lithologies: quartzarenite, oncolytic rudstone, grainstone-packstone, wackestone, mudstone, and to a lesser extent sandy limestone. Two siliciclastic microfacies were identified: (A) quartzarenite with cross-bedded and horizontal stratification deposited in an intertidal and supratidal environment; and (B) massive quartzarenite with *Skolithos* ichnofacies deposited in subtidal and intertidal environments. Four carbonate microfacies were identified: microfacies 1 is a sandy limestone with trilobite fragments; microfacies 2 is a grainstone with intraclasts, salterellids, hyolithids, trilobites, and echinoderm plates; microfacies 3 is an oncolytic rudstone consisting of microbes and abundant echinoderm plates; and microfacies 4 is a packstone-grainstone with abundant ooids, trilobite fragments, and echinoderm plates. Two biofacies were identified: Agnostid-polymeroid biofacies with predominance of the trilobites *Pentagnostus*, *Bathyriscus*, *Oryctocephalites*, and *Ehrathina*; and *Pagetia* biofacies with abundant trilobites of the genera *Pentagnostus*, *Pagetia* and *Ehrathina*. It is concluded by the sedimentation model that changes in sea level is the most important parameter in determining the siliciclastic microfacies, carbonate microfacies and biofacies; as well as the depositional environments that vary from the coastline (subtidal to supratidal) to shallow-water open circulation marine platform with low and high energy waters. The Cambrian deposits of northern Mexico are correlated with the deposits of California and Nevada (USA), as well as to the Precordillera (Argentina), where the species in common show a strong affinity.

© 2021 Elsevier B.V. and Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS.

Keywords: Cambrian; siliciclastic; carbonate microfacies; biofacies; Mexico

1. Introduction

Lower Paleozoic rocks in Mexico are scarce and of limited exposures in the states of Baja California, Sonora,

Chihuahua, Tamaulipas, and Oaxaca (López-Ramos, 1969; Buitrón, 1992; Cuen-Romero et al., 2018, 2020). There are a few Cambrian outcrops with a relatively well-preserved fossil biota, mostly in Sonora where the outcrops are scattered and typically covered by thick Mesozoic sediments (Buitrón, 1992).

Studies carried out during the second part of the last century in the Caborca area, northwest Sonora, led to

* Corresponding author.
E-mail addresses: francisco.cuen@ciencias.uson.mx (F.J. Cuen-Romero), rogelio.monreal@unison.mx (R. Monreal).

<https://doi.org/10.1016/j.palwor.2021.03.002>

1871-174X/© 2021 Elsevier B.V. and Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS.

Figura 2. Artículo 1 publicado en la revista *Palaeoworld* (2022).

4.1.3. Quantitative paleoecology of Cambrian (Series 2–Miaolingian) communities from central Sonora, Mexico. DOI: 10.1016/j.palwor.2021.12.003



Quantitative paleoecology of Cambrian (Series 2–Miaolingian) communities from central Sonora, Mexico

Héctor Arturo Noriega-Ruiz^a, Francisco Javier Cuen-Romero^{b,*}
Luis Fernando Enríquez-Ocaña^a, Rogelio Monreal^b, Elizabeth Chacón-Baca^c
Juan José Palafox-Reyes^b, Francisco Javier Grijalva-Noriega^b

^a Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Luis Donaldo Colosio sn, entre Sahuaripa y Reforma, Col Centro, CP. 83000, Hermosillo, Sonora, Mexico

^b Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales, CP. 83000, Hermosillo, Sonora, Mexico

^c Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera a Cerro Prieto Km. 8, Linares, Nuevo León, México 67700, Mexico

Received 20 August 2021; received in revised form 16 December 2021; accepted 20 December 2021

Abstract

This work presents a paleoecological approach to study benthic communities preserved in Cambrian strata exposed at the Sahuaral locality in central Sonora, northwestern Mexico. Based on species richness and abundance, this work analyzed 627 individuals corresponding to 33 species from five distinctive Cambrian formations: the lowermost Provedora Formation characterized by bioturbation horizons that record the occurrence of a benthic-infaunal biota from coastal shallow seas, followed by the Buclna Formation which contains reef deposits dominated by autotrophic epibenthic communities. The Cerro Prieto Formation was deposited in a high-energy shallow marine environment, dominated by primary consumers-epifaunal and suspensions feeders. The uppermost unit, the El Gavilán Formation, is an intercalation of shale and fossiliferous limestone characterized by the fossil remains of suspension feeders, detritus feeders and nekto-benthic organisms of low energy deep water environments. The paleobiota consist of ichnofossils, microbial oncolites, chancellorids, brachiopods, hyolithids, and trilobites in a sequence of increasing diversity and complexity. Paleoecological indices (Simpson Dominance, Shannon-Weaver Index, Evenness Index, and Total Richness) were determined and compared in the study area. In addition, the effective number of species and the true diversities were obtained, which are similar between each station distributed in each formation. However, it is possible that the high degree of dominance is a factor to indicate an inequality between the true diversity and the species richness identified. These results provide new analytical and paleoecological criteria for better understanding depositional environments and fossil associations where the spatial distribution of benthic organisms, richness and abundance provide a valued window to Cambrian biotas. The structure of the marine community of the El Sahuaral area has a great affinity with other Cambrian communities, such as those from the Stephen Formation (Burgess Shale, British Columbia) and the Chengjiang biota of the Yangtze Shelf deposits in South China.

© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Cambrian; paleoecology; community diversity; Sonora; Mexico

1. Introduction

Long-term ecological studies assess the variability of biological systems to track ecological processes that occur slowly or at the geological time scale (Foster et al., 1990).

* Corresponding author.

E-mail addresses: francisco.cuen@ciencias.uson.mx (F.J. Cuen-Romero), fernando.enriquez@unison.mx (L.F. Enríquez-Ocaña).

<https://doi.org/10.1016/j.palwor.2021.12.003>

1871-174X/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

Please cite this article as: H. A. Noriega-Ruiz, F. J. Cuen-Romero, L. F. Enríquez-Ocaña et al., Quantitative paleoecology of Cambrian (Series 2–Miaolingian) communities from central Sonora, Mexico, *Palaeoworld*, <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2021.12.003>

Figura 3. Artículo 2 publicado en la revista *Palaeoworld* (2022).

4.2. Artículos en revista arbitrada

4.2.1. Paleozoico inferior de Sonora, México: 120 años de investigación paleontológica.



PALEONTOLOGÍA MEXICANA
VOLUMEN 9, NÚM. 1, 2020, P. 1 – 15



El Paleozoico inferior de Sonora, México: 120 años de investigación paleontológica

Cuen-Romero, Francisco Javier^{a,*}; Reyes-Montoya, Dulce Raquel^b;
Noriega-Ruiz, Héctor Arturo^b

^a Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales, CP. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

^b Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Luis Donaldo Colosio s/n, entre Sahuaripa y Reforma, Col Centro, CP. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

* francisco.cuen@ciencias.uson.mx

Resumen

Los estudios del Paleozoico inferior de México se inician en 1900 por Edwin Theodore Dumble (1852–1927), quien identificó estratos del Ordovícico por primera vez en Sonora. Actualmente, transcurridos ~120 años de estos primeros estudios en el país, se cuenta con una amplia bibliografía sobre estratigrafía y paleontología. En el presente trabajo se elabora una recapitulación de los principales trabajos del Cámbrico, Ordovícico y Silúrico de Sonora. El Cámbrico se encuentra distribuido de manera uniforme en la parte central y norte del estado. El Ordovícico se localiza en un cinturón principalmente hacia la parte central y sur del estado, y el Silúrico aflora en dos localidades de manera aislada. La biota del Paleozoico inferior de México está constituida por cianobacterias, poríferos, arqueociatos, braquiópodos, moluscos, artrópodos y equinodermos como formas predominantes.

Palabras clave: Cámbrico, México, Ordovícico, Paleozoico, Silúrico, Sonora.

Abstract

The studies on the lower Paleozoic rocks of Mexico began in 1900 by Edwin Theodore Dumble (1852–1927), who first identified Ordovician in Sonora. Currently, after ~120 years of these first studies in the country, there is a dense stratigraphic and paleontological bibliography. In this work, a summary of the main works of the Cambrian, Ordovician, and Silurian of Sonora is compiled. The Cambrian is evenly distributed in the central and northern parts of the state. The Ordovician is located in a belt mainly towards the central and southern part of the state and the Silurian outcrops are found only in two isolated locations. The lower Paleozoic biota of Mexico consists of cyanobacteria, poriferans, archaeocyathids, brachiopods, mollusks, arthropods, and echinoderms, as predominant forms.

Keywords: Cambrian, Mexico, Ordovician, Paleozoic, Silurian, Sonora.

1. Introducción

Las rocas sedimentarias del Paleozoico inferior de México se encuentran en los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Tamaulipas y Oaxaca (López Ramos, 1969; Buitrón y Sandoval, 1989; Buitrón, 1992; Cuen-Romero *et al.*, 2018). En México existen escasos afloramientos del Cámbrico, Ordovícico y Silúrico, los cuales se distribuyen

principalmente en el estado de Sonora, con una biota fósil relativamente bien preservada. De manera general estos afloramientos se encuentran pobremente distribuidos en el estado, debido a que fueron en su mayoría cubiertos por una potente secuencia de sedimentos del Mesozoico (Buitrón, 1992), siendo el Sistema Silúrico el menos conocido desde el punto de vista estratigráfico y paleontológico. Estos afloramientos han sido ampliamente estudiados desde

Figura 4. Artículo 1 publicado en la revista *Paleontología Mexicana* (2020).

4.2.2. *Euagnostus interstrictus* (White, 1874) (Trilobita: Agnostida) del Cámbrico medio (Miaolingiano-Wuliuano) del cerro El Sahuaral, Sonora central, México.



***Euagnostus interstrictus* (White, 1874) (Trilobita: Agnostida) del Cámbrico medio (Miaolingiano-Wuliuano) del cerro El Sahuaral, Sonora central, México**

Cuen-Romero Francisco, Javier^{a,*}, Noriega-Ruiz, Héctor A.^b, Buitrón-Sánchez, Blanca E.^c

^aDepartamento de Geología, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales, CP. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

^bDepartamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Luis Donaldo Colosio s/n, entre Sahuaripa y Reforma, Col Centro, CP. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

^cDepartamento de Paleontología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, CDMX, 04510, México.

* francisco.cuen@ciencias.uson.mx

Resumen

Se describe por primera vez para México el trilobite agnóstico *Euagnostus interstrictus* (White), recolectado en capas del Cámbrico de la Formación El Gavilán (Miaolingiano, Wuliuano) que se localiza en el cerro El Sahuaral, parte central del estado de Sonora. En la localidad aflora una secuencia sedimentaria del Paleozoico inferior representada por las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán, con una litología predominante de cuarzoarenita, caliza y lutita. Esta secuencia está caracterizada por una abundante y diversa biota fósil, la cual consiste en icnofósiles, algas oncolíticas, esponjas, hiolíticos, braquiópodos y trilobites. Las rocas cámbricas del área de Sonora central se depositaron como parte de una potente secuencia de sedimentos del margen occidental del cratón de Laurentia en un ambiente de plataforma exterior. Se confirma la distribución cosmopolita de *Euagnostus interstrictus*, ya que se encuentra ampliamente distribuida en localidades como el norte de Australia (Territorio del Norte y Queensland), Europa (Dinamarca), Estados Unidos de América (Utah y Nevada) y México (Sonora).

Palabras clave: Cámbrico, *Euagnostus*, México, Sonora, Trilobite.

Abstract

We describe, for the first time in Mexico, the agnostid trilobite *Euagnostus interstrictus* (White), collected from Cambrian strata of the El Gavilán Formation (Miaolingian, Wuliuan) which is located in the El Sahuaral hill, on the central part of the state of Sonora. A lower Paleozoic sedimentary sequence is exposed in the study site, represented by the Proveedora, Buelna, Cerro Prieto, and El Gavilán formations, with a predominant lithology of quartz-arenite, limestone and shale. This sequence is characterized by an abundant and diverse fossil biota, consisting of ichnofossils, oncolytic algae, sponges, hyolithids, brachiopods, and trilobites. The Cambrian rocks from the central Sonora area were deposited as part of a thick sedimentary sequence from the western margin of the Laurentia craton in an outer shelf environment. The cosmopolitan distribution of *Euagnostus interstrictus* is confirmed, as it is widely distributed in locations such as northern Australia (Northern Territory and Queensland), Europe (Denmark), United States of America (Utah and Nevada) and Mexico (Sonora).

Keywords: Cambrian, *Euagnostus*, Mexico, Sonora, Trilobite.

Figura 5. Artículo 2 publicado en la revista *Paleontología Mexicana* (2020).

4.2.3. Bioestratigrafía del Cámbrico en México.



PALEONTOLOGÍA MEXICANA
ISSN:2007-5189
VOLUMEN 11, NÚM. 1, 2022, P. 35 – 40



Bioestratigrafía del Cámbrico en México

Cambrian Biostratigraphy in Mexico

Cuen-Romero, Francisco Javier^{a,*}; Noriega-Ruiz, Héctor Arturo^a; Monreal, Rogelio^a; Palafox-Reyes, Juan José^a; Ochoa-Granillo, José Alfredo^a, Montijo-González, Alejandra^a

^aDepartamento de Geología, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales, CP. 83000, Hermosillo, Sonora, México. <https://orcid.org/0000-0001-8061-5600>; <https://orcid.org/0000-0002-6411-2832>; <https://orcid.org/0000-0001-5718-7660>

*francisco.cuen@ciencias.uson.mx.

Resumen

El Cámbrico en México aflora únicamente en los estados de Sonora y Oaxaca, como secuencias aisladas y esporádicas, aunque con una biota fósil relativamente bien conservada. Estudios recientes en bioestratigrafía de trilobites del Cámbrico de México, demuestran que la columna bioestratigráfica para este sistema en el estado de Sonora está bien representada, principalmente desde el Terreneuviano hasta el Furongiano temprano, comprendiendo el intervalo pre-trilobite, y Zona de *Fritzaspis* hasta la Zona de *Elvinia*. En el estado de Oaxaca se conoce únicamente la Zona de *Saukia* (Furongiano). Por lo anterior el Cámbrico tardío (Furongiano), corresponde a la parte menos conocida del Cámbrico en México.

Palabras clave: Cámbrico, México, Oaxaca, Sonora, Trilobites.

Abstract

The Cambrian in Mexico crops out only in the states of Sonora and Oaxaca, as isolated and sporadic sequences, but with a relatively well-preserved fossil biota. Recent studies in trilobite biostratigraphy of the Cambrian of Mexico show that the biostratigraphic column for this system in the state of Sonora is well represented, mainly from the Terreneuvian to the early Furongian, and comprising the pre-trilobite interval, and Fritzaspis Zone to the Elvinia Zone. In the state of Oaxaca only the Saukia Zone (Furongian) is known. This indicates that the late Cambrian (Furongian) corresponds to the least known part of the Cambrian in Mexico.

Keywords: Cambrian, Mexico, Oaxaca, Sonora, Trilobites.

Cómo citar / How to cite: Cuen-Romero, F.J., Noriega-Ruiz, H.A., Monreal, R., Palafox-Reyes, J.J., Ochoa-Granillo, J.A., Montijo-González, A. (2022). *Bioestratigrafía del Cámbrico en México*. *Paleontología Mexicana* 11(1), 35–40.

Manuscrito recibido: Junio 6, 2022.

Manuscrito corregido: Junio 8, 2022.

Manuscrito aceptado: Junio 9, 2022.



Figura 6. Artículo 3 publicado en la revista *Paleontología Mexicana* (2022).

4.3. Artículos publicados en revistas de divulgación-difusión

4.3.1. Métodos cuantitativos en paleoecología de comunidades. DOI: 10.36790/epistemus.v14i29.138

DESDE LA ACADEMIA

MÉTODOS CUANTITATIVOS EN PALEOECOLOGÍA DE COMUNIDADES

Quantitative methods in community paleoecology

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Francisco Javier Cuen Romero ¹
Héctor Arturo Noriega Ruiz ²
Elizabeth Chacón Baca ³
Rogelio Monreal ⁴
Reyna Amanda Castillo Gámez ⁵

Recibido: 15/03/2021
Aceptado: 02/08/2021
Publicado: 13/08/2021
DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v14i29.138>

Autor de Correspondencia:
Francisco Javier Cuen Romero
Correo: francisco.cuen@ciencias.uson.mx

Resumen

En este trabajo se describen los métodos cuantitativos más comunes empleados para la caracterización de paleocomunidades, estableciendo una guía breve y simple que incluye los principales índices utilizados en paleoecología. La secuencia combina atributos que incluye los siguientes pasos: 1) estimar patrones espaciales, 2) coleccionar, identificar y cuantificar el material paleontológico, 3) determinar la diversidad de especies mediante índices ecológicos, métodos de rarefacción, así como coeficientes de similitud y diferenciación composicional. Esto conlleva finalmente a poder reconocer atributos como el número y abundancia relativa de las especies, la naturaleza de sus interacciones y la estructura física de las comunidades. El conocimiento de los cambios ecológicos que han ocurrido en el pasado geológico contribuye no sólo a mejorar el entendimiento y manejo de los ecosistemas actuales, sino a fundamentar predicciones documentadas sobre las posibilidades futuras de cambio en uno o varios parámetros.

Palabras clave: paleoecología, paleocomunidades, índices ecológicos.

Abstract

This work describes the most common quantitative methods for characterization of paleocommunities and proposes a brief and simple guide that includes the main indicators used in paleoecology. The sequence combines the following steps: 1) estimating spatial patterns, 2) collecting, identifying, and quantifying paleontological material, 3) determining species diversity through ecological indicators, rarefaction methods, as well as compositional, similarity, and differentiation coefficients. This stepwise progression finally results in the recognition of attributes such as number and relative abundance of species, the nature of their interactions and the physical structure of communities. The knowledge of past ecological changes not only improves our understanding and management of current ecosystems, but also helps to predict and elaborate educated guesses about possible future changes in one or several parameters.

Keywords: paleoecology, paleocommunities, ecological indices.

¹ Doctor, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo electrónico: francisco.cuen@ciencias.uson.mx

² Candidato a doctor, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo electrónico: hector.noriega93@gmail.com

³ Doctora, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México, Correo electrónico: cienciafct@gmail.com

⁴ Doctor, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo electrónico: rogeilo.monreal@unison.mx

⁵ Doctora, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo electrónico: reyna.castillo@unison.mx

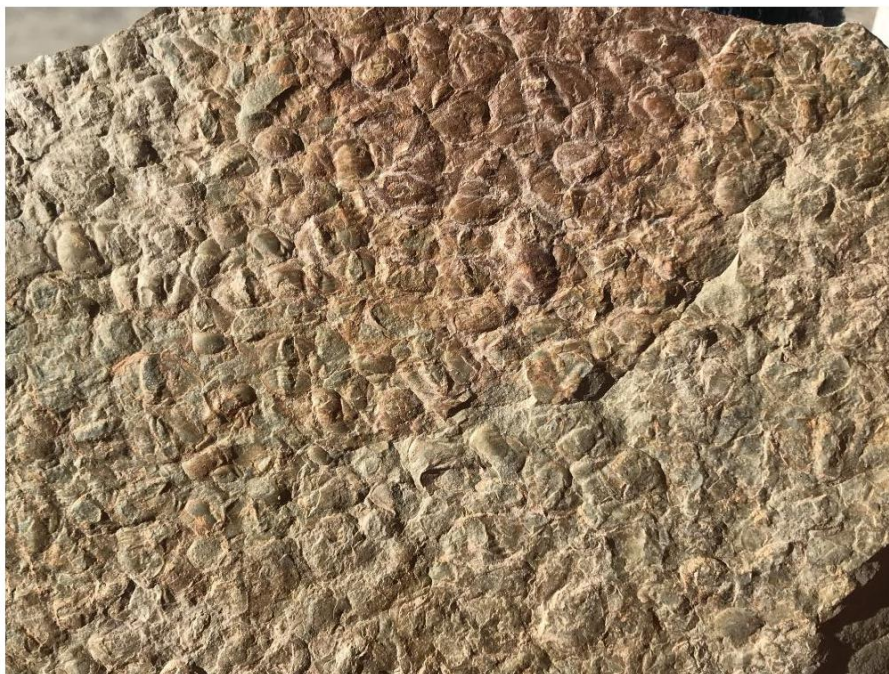
52



EPISTEMUS: www.epistemus.uson.mx

Figura 7. Artículo publicado en la revista *EPISTEMUS* (2021).

4.3.2. A new locality of trilobites in Sonora: El Sahuaral area.



Glossopleura producta cranidia and pygidia from the Ophir Formation in the Oquirrh Mountains of Tooele Co., Utah. Photo by John Foster.

A new locality of trilobites in Sonora: El Sahuaral area

By Héctor A. Noriega-Ruiz, Francisco J. Cuen-Romero*, Rogelio Monreal, Francisco J. Noriega-Grijalva, Juan J. Palafox-Reyes. Departamento de Geología, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales SN, Col. Centro. Hermosillo, Sonora, Mexico. CP. 83000.

* Corresponding author: francisco.cuen@ciencias.uson.mx

In Mexico, Cambrian studies have increased significantly in recent years, mainly those focused on the central and eastern region of the state of Sonora, highlighting the presence of stratigraphic sequences of marine facies from the

lower to middle Cambrian (Cuen-Romero et al., 2018; 2019; Noriega-Ruiz et al., 2020; 2021).

In the El Sahuaral hill, located in the central part of the state of Sonora, Cambrian rocks, Series 2 – Miaolingian, are exposed, and have been assigned to the Proveedora, Buelna, Cerro Prieto, El Gavilán and El Tren formations (Noriega-Ruiz et al., 2020), and have been correlated with the Cambrian rocks of the Caborca area described by Cooper et al. (1952).

Stratigraphy of the El Sahuaral area

The Proveedora Formation is made up, from base to the top, by a fine- to coarse-grained quartz sandstone, white in color with red oxidation stains. The unit, 216 m thick, outcrops massively on the top of El Sahuaral hill as thick fractured beds. The lower contact is not observed, while the upper contact is concordant with the Buelna Formation. This unit has abun-

Figura 8. Artículo publicado en la revista *The Trilobites Papers* 25 (2022).

V. DISCUSIONES

Los estudios estratigráficos determinaron que las secuencias sedimentarias del Cámbrico en Sonora presentan similitud litológica entre ellas. Sin embargo, el análisis bioestratigráfico y el contenido biótico presentan diferencias sustanciales, particularmente con trilobites y fauna asociada del Cámbrico medio. Además, fue posible identificar la distribución de dos principales ambientes deposicionales en Sonora: a) depósitos correspondientes a una plataforma marina somera, los cuales se distribuyen en la región noroeste y norte de Sonora, en las áreas de Caborca (Cooper *et al.*, 1952; Rivera-Carranco, 1988) y Cananea (González-León, 1986; Sundberg y Cuen-Romero, 2021); b) depósitos correspondientes a una plataforma marina exterior, los cuales se distribuyen en la región central y este de Sonora, en las áreas de San José de Gracia (Cuen-Romero *et al.*, 2016; Noriega-Ruiz *et al.*, 2020), Mazatán (Vega-Granillo, 1996) y Arivechi (Cuen-Romero *et al.*, 2019b). En los depósitos de plataforma marina somera (Caborca y Cananea) no se ha documentado la presencia de trilobites agnóstidos, por otro lado, esta fauna es bastante abundante en los depósitos de plataforma exterior. Esta distribución se ajusta al esquema bioestratigráfico propuesto por Robison (1976) para la Gran Cuenca, suroeste de Estados Unidos, el cual contiene un conjunto distinguible de zonas para cada una de las principales biofacies con base en trilobites del Cámbrico medio. Robison (1976) establece tres asociaciones coetáneas para los trilobites reconocidos dentro de la Gran Cuenca, uno de los conjuntos se define como una biofacies de plataforma restringida poco profunda con abundantes poliméridos; los otros dos conjuntos se definen como biofacies de plataforma abierta (exterior) poco profunda basada en la abundancia de trilobites agnóstidos y poliméridos. La mayoría de los trilobites poliméridos son considerados bentónicos o nectobéntonicos, mientras que los agnóstidos probablemente eran pelágicos lo cuales se sugiere que mantuvieron un modo de vida distinto al de la mayoría de los trilobites al alimentarse de pequeñas partículas pelágicas (Robison, 1972).

La litología y la fauna de trilobites del Cámbrico medio de la Formación El Gavilán en la región central de Sonora indican ambientes similares a la Formación Spence Shale (Utah, E.U.A.), la Formación Stephen (Columbia Británica, Canadá) y la Precordillera Argentina (San Juan, Argentina). La fauna de trilobites de estos depósitos está representada por los géneros *Ptychagnostus*, *Ehmaniella*, *Elrathiella*, *Elrathina*, *Kootenia*,

Oryctocephalites y *Bathyriscus* (Robison, 1982; Fletcher y Collins, 2003; Bordonaro *et al.*, 2008), lo cual confirma la afinidad paleogeográfica con la deposición en un ambiente de plataforma abierta del cratón norteamericano. Actualmente se ha documentado la Formación El Gavilán en los cerros El Chihuarruita y El Sahuaral, manteniendo similitudes como en composición litológica, faunística y similar paleoambiente (plataforma exterior), sin embargo, las posiciones bioestratigráficas indican diferencias significativas. La Formación El Gavilán del cerro El Chihuarruita es asignada a la Subzona de *Albertella highlandensis*, Zona de *Mexicella mexicana*, y a la Zona de *Ptychagnostus praecurrens* (Cuen-Romero *et al.*, 2016); en contraste, la Formación El Gavilán en el cerro El Sahuaral es asignada a la Subzona *Altiocculus*, Zona de *Ehmaniella*, y *Ptychagnostus gibbus* (Noriega-Ruiz *et al.*, 2020), lo que corresponde a un rango variable de biozonas.

Además, otra diferencia con respecto a estas dos áreas corresponde a la presencia de la Formación El Tren en el cerro El Sahuaral, la cual no aflora en el cerro El Chihuarruita (Noriega-Ruiz *et al.*, 2020). Esta unidad identificada en el cerro El Sahuaral no presentó fósiles índices, únicamente se reconocieron fragmentos de trilobites en secciones delgadas. La Formación El Tren en el cerro El Sahuaral es litológicamente muy similar a las rocas de la Formación El Tren del área de Caborca reconocida por Cooper *et al.* (1952), aunque el contenido biótico presenta diferencias sustanciales con respecto a la edad de ambas áreas. Lo anterior se sustenta desde el punto de vista bioestratigráfico, ya que en el área de Caborca la Formación El Tren comprende un rango de biozonas desde la parte superior de la Zona de *Glossopleura walcotti*, posiblemente hasta la Subzona de *Proehmaniella*, parte inferior de la Zona de *Ehmaniella*, mientras que en el área de El Sahuaral por su posición estratigráfica comprende biozonas iguales o mayores a la parte superior de la Zona de *Ehmaniella*.

Por otro lado, se reconocieron las condiciones de los paleoambientes cámbricos en la región central de Sonora. El análisis petrográfico y de facies llevado a cabo en las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán, en el cerro El Chihuarruita, San José de Gracia, indica que los ambientes de depósito varían desde la línea de costa hasta el medio de circulación abierta de aguas someras hasta la plataforma marina abierta, registrándose un aumento del nivel del mar evidenciado por la presencia de trilobites agnóstidos en los estratos de la Formación El Gavilán. Lo anterior señala que las unidades cámbricas del centro de Sonora registren estos cambios eustáticos.

En general, el Cámbrico es considerado como un periodo cálido con niveles del mar relativamente altos debido a un estado climático de invernadero, lo que ocasionó la formación de extensos mares epicontinentales, y por lo tanto, una gran variedad de respuestas en los ecosistemas (Smith y Harper, 2013; Babcock *et al.*, 2015). Se han documentado los niveles eustáticos del mar del Cámbrico temprano, calculando niveles que rondan los 0 m en el nivel medio, es decir, el nivel del mar (global) era ligeramente inferior al actual (Peng *et al.* in Gradstein *et al.*, 2012). Sin embargo, durante el Cámbrico tardío el nivel del mar aumentó aproximadamente 200 m (Haq y Schutter, 2008; Peng *et al.*, 2012). El Cámbrico estuvo marcado por breves episodios de cambios, debido a las diferentes etapas de los ciclos de regresión y transgresión, lo que condujo a gradientes ambientales temporales en las costas del continente y, por lo tanto, facies distintivas y específicas en el tiempo (Brasier, 1982; Babcock *et al.*, 2015). Además, esto se argumenta con base en la evidencia de secuencias sedimentarias compuestas de caliza y lutita que se depositaron en ambientes marinos someros (Peng *et al.*, 2012). También la presencia de contenido biótico, particularmente los trilobites agnóstidos, los cuales han sido considerados como indicadores del aumento eustático a pequeña escala del nivel del mar (Babcock *et al.*, 2007).

Por otro lado, se ha sugerido una relación entre la historia eustática del nivel del mar y la curva isotópica de carbono del Cámbrico. Aún no se dispone de información eustática a gran escala para todo el sistema, aunque existen interpretaciones que sugieren una estrecha correspondencia en el momento del cambio del nivel del mar, además de los cambios en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ (Babcock *et al.*, 2007). Se ha sugerido que la base del Drumiano presenta cambios significativos con respecto a faunas de trilobites poliméridos y de conodontos, además se caracteriza por una Excursión Negativa de Carbono conocida como Excursión DICE (Peng *et al.*, 2012; Cuen-Romero *et al.*, 2019b). La base del Piso Drumiano, que se encuentra en la fase inferior de un ascenso eustático, está asociada con el final de la excursión DICE (Babcock *et al.*, 2007). La base del Piso Paibiano también se encuentra en la parte inferior de un ascenso eustático y está asociada con el inicio de la excursión SPICE (Excursión de Isótopos de Carbono Positivos de Steptoeano) (Peng *et al.*, 2004).

Con base en el análisis del contenido biótico de las comunidades del Cámbrico temprano y medio del área de estudio, se calculó la abundancia y riqueza de especies, en cada una de las unidades litoestratigráficas estudiadas. Lo anterior incluye cinco icnoespecies distribuidas en cinco icnogéneros (18%), una especie de cianobacteria (9%),

una especie de cancellórido (5%), dos especies de hiolítidos distribuidas en dos géneros (5%), cinco especies de braquiópodos distribuidas en tres géneros (16%), y siete especies de trilobites distribuidas en siete géneros (47%). Registrando una riqueza de 21 especies, distribuidas en 650 individuos. Una vez obtenido el análisis bioestratigráfico y la identificación taxonómica, así como de ambientes de depósito, se determinaron índices ecológicos como dominancia, riqueza y equitatividad de especies.

Los gremios de las formaciones Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán establecieron interacciones ecológicas complejas, utilizando recursos similares y compitiendo por ellos. Se reconocen las principales categorías de hábitats de vida, estas incluyen: infaunal, epifaunal; sésiles o vagiles, nectobentónicos y pelágicos. Para las categorías tróficas: suspensión, depósito, cazador y/o carroñero y pastoreo. Finalmente, también se incluyen los productores primarios epibentónicos. Asimismo, se incluyen las subcategorías consumidores primarios, consumidores primarios epibentónicos, consumidores secundarios, carnívoros y descomponedores.

La abundancia de trazas fósiles de la Formación Proveedora permitió diferenciar dos grupos funcionales: consumidores primarios-descomponedores infaunales correspondientes a alimentadores en suspensión, y consumidores secundarios interpretados como posibles carnívoros. La distribución de los gremios muestra que *Skolithos* isp. ocupa más del 66% del ecoespacio muestreado, mientras que *Cruziana* isp. corresponde a un subordinado. Existen interpretaciones de que *Cruziana* es el resultado de hábitos depredadores, carroñeros y detritívoros, ya que son estructuras superficiales dejadas por la actividad vital de los trilobites (Fortey y Owens, 1999). La presencia de estos organismos y la asociación litológica en la Formación Proveedora representan ambientes deposicionales como áreas costeras y sub-costeras donde ocurrieron fenómenos erosivos, que eliminan posibles estructuras biogénicas producidas por organismos filtradores bentónicos, y que posiblemente, la mayoría de ellos se encontraban confinados en partes más favorables del hábitat (Vossler y Pemberton, 1988; Droser, 1991; Bromley, 1996).

La Formación Buelna muestra un cambio de biota y litológico respecto a la Formación Proveedora, principalmente debido a la presencia de algas oncolíticas e hiolítidos en una sucesión mixta de calizas y lutitas. La Formación Buelna comprende dos grupos funcionales: productores primarios-epifaunales correspondientes a fotoautótrofos epifaunales estacionarios, y consumidores primarios se interpretan como suspensiones-filtrantes y

epifaunales-vagiles. El predominio de las estructuras microbianas confiere una mayor afinidad a las aguas claras, y por lo tanto, estos organismos habitaban ambientes marinos poco profundos de condiciones submareales y arrecifales; estas cianobacterias son consideradas como los principales constructores de arrecifes autótrofos del Cámbrico (Markello y Read, 1982). El género *Girvanella* comprende de cianobacterias tubulares calcificadas con envoltura (Riding, 1975), y es común en depósitos del Paleozoico inferior de Laurentia, particularmente del Cámbrico (Cooper *et al.*, 1952; Pfeil y Read, 1980; Markello y Read, 1982). Tales cianobacterias han sido previamente descritas en el área de El Chihuarruita, Sonora central (Beraldi-Campesi *et al.*, 2018).

La Formación Cerro Prieto está formada por caliza dolomítica oolítica parcialmente recristalizada. Además, se distingue un solo grupo funcional: consumidores primarios que incluyen alimentadores de depósitos epifaunales, alimentadores en suspensión y herbívoros; tales organismos corresponden al dominio de una especie de trilobites (*Amecephalus arrosensis*) y una especie de braquiópodo indeterminada. El ambiente de depósito de la Formación Cerro Prieto está relacionado con aguas marinas altamente agitadas, poco profundas y saturadas, dominadas por consumidores primarios-epifaunales; sin embargo, es posible que estos organismos hayan sido desplazados por corrientes de alta energía, como lo demuestra la mala conservación y reelaboración de los especímenes.

El contenido biótico de la Formación El Gavilán sugiere un cambio de facies hacia ambientes más profundos y aguas tranquilas, donde se reconoce una gran variedad de grupos funcionales, dominando los organismos en suspensión y nectobentónicos. Para la Formación El Gavilán se reconocen dos grupos funcionales: el primer grupo comprende los consumidores primarios epifaunales correspondientes a los alimentadores en suspensión-sésiles, y los alimentadores en suspensión y herbívoros, representados por braquiópodos y hiolítidos. El segundo grupo se compone de consumidores primarios y secundarios, que incluyen alimentadores en suspensión, alimentadores de depósitos y carnívoros nectobentónicos. La ocurrencia y abundancia de trilobites agnóstidos en esta unidad es evidente, y su ecología sigue siendo controvertida. Por su estructura y tamaño, es posible interpretar a estos organismos como semiplanctónicos o vivos, debido a que los agnóstidos, en general, tienen un amplio rango de distribución (Lochman *in* Cooper *et al.*, 1952; Robison, 1972). De manera similar, los agnóstidos se han asociado con pequeños detritívoros

bentónicos, como crustáceos y de otros hábitos alimenticios, como los artrópodos marinos actuales que se alimentan de forma oportunista (Rex, 1981; Moysiuk y Caron, 2019).

La estructura de una comunidad corresponde a un término ecológico para indicar que organismos se encuentran en un ambiente determinado, sus cantidades y la manera en que se relacionan. En particular, la estructura de las comunidades marinas del área El Sahuaral denota una mayor afinidad con otras comunidades del Cámbrico, como la biota descrita en la Formación Stephen (Burgess Shale, Columbia Británica) y la biota de Chengjiang de los sedimentos de la plataforma Yangtze en el sur de China (Caron y Jackson, 2008; Du *et al.*, 2020).

Por otro lado, la paleoecología es una ciencia histórica que debe basarse en datos empíricos de los fósiles y las rocas sedimentarias que las envuelven para hacer inferencias sobre las condiciones pasadas (Brett, 2008). Los enfoques experimentales y la medición directa de parámetros ambientales, que son componentes críticos de la ecología moderna, son generalmente imposibles en paleoecología. Además, la distorsión y la pérdida de información durante la fosilización significa que los conjuntos y distribuciones de fósiles rara vez son congruentes con las comunidades vivas (Foster *et al.*, 1990; Brett, 2008; Bennington *et al.*, 2009). Por otro lado, uno de los objetivos de los estudios paleoecológicos es conocer el número de especies presentes, distribuidas en un hábitat particular, una provincia o un intervalo de tiempo geológico, lo que supone una simple cuestión de contar especies. Sin embargo, esto se complica debido a que la cantidad de especies aumenta con la cantidad de individuos que se cuentan, convirtiéndose en un problema al comparar la diversidad (riqueza) de diferentes muestras y que tales muestras contienen diferentes números de individuos contados (Sanders, 1968). Un enfoque común es usar rarefacción para submuestrear todas las muestras y calcular su riqueza en el mismo número de individuos (Sanders, 1968; Hulbert, 1971).

El método de rarefacción se podría considerar como solución nuevamente; no obstante, se complica por la uniformidad, es decir, cómo disminuye la abundancia de las especies más abundantes a las menos abundantes (Alroy, 2010). Cuando la uniformidad es alta, todas las especies mantienen abundancias relativamente similares, y cuando la uniformidad es baja, la abundancia de especies difiere mucho. El problema de la rarefacción es que las curvas de rarefacción pueden cruzarse cuando dos muestras difieren en su uniformidad y, por lo tanto, la riqueza relativa de las muestras cambiará a diferentes niveles de muestreo.

VI. CONCLUSIONES

El análisis bioestratigráfico realizado en el área de El Sahuaral, Sonora central, determinó biozonas y características sobre el paleoambiente de las cinco unidades litoestratigráficas identificadas. La Formación Provedora corresponde a una secuencia de cuarzoarenita con abundantes icnofósiles. La Formación Buelna está compuesta de caliza arenosa y fosilífera con intercalaciones de lutita, con abundantes restos de cianobacterias y fragmentos de trilobites correspondientes a la Zona de *Bristolia mohavensis* o *Bristolia insolens*. La Formación Cerro Prieto está representada por una secuencia de caliza oolítica masiva con abundantes fragmentos de *Amecephalus arrojensis*, lo que asigna la Zona de *Amecephalus arrojensis*. La Formación El Gavilán consiste de potentes capas de lutita con intercalación caliza fosilífera, representada por abundante fauna de la parte superior de Zona de *Ehmaniella* y la Zona de *Ptychagnostus praecurrens* - *Ptychagnostus gibbus*. La Formación El Tren está compuesta de caliza dolomítica con fragmentos de trilobites, asignado tentativamente a la Zona de *Bolaspidella*. Las rocas del área de El Sahuaral están correlacionadas con las unidades cámbricas del área de El Chihuarruita (San José de Gracia), Mazatán y Caborca en Sonora, México, y con afloramientos expuestos en el área de la Nopah Range y San Bernardino Mountains, depósitos de la parte suroeste de Estados Unidos.

Con base a la colecta de 48 muestras de rocas carbonatadas y detríticas en el cerro El Chihuarruita, San José de Gracia, se realizó un análisis petrográfico y de microfacies a detalle para clasificar las rocas cámbricas de la región central de Sonora con base al arreglo textural y el contenido aloquímico. Las facies detríticas indican que: la Formación Provedora fue depositada en una zona costera de intermarea a submarea durante el Cámbrico temprano. Las facies calcáreas sugieren que la Formación Buelna se desarrolló en una sucesión de ambiente de plataforma abierta lagunar a plataforma restringida, la Formación Cerro Prieto es considerada de un ambiente intermareal a plataforma retrabajada, la Formación El Gavilán fue depositada en un ambiente de plataforma exterior. Finalmente, la Formación El Tren un ambiente marino donde el efecto del reflujó de aguas de magnesio sobresaturadas provocó la dolomitización de carbonatos de calcio.

Se realizó el primer estudio paleoecológico de las comunidades cámbricas distribuidas en las formaciones Provedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán en el área de El Sahuaral. Una vez obtenido el análisis bioestratigráfico y la identificación taxonómica, así como de

ambientes de depósito, se determinaron índices ecológicos como dominancia, riqueza y equitatividad de especies. La Formación Provedora se caracteriza por la presencia de organismos bentónicos-infaunales 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-epibentónicos. 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, detritívoros y nectobentónicos de ambientes profundos de baja energía.

VII. RECOMENDACIONES

Uno de los inconvenientes con el método de rarefacción es que comprende de un muestreo justo, es decir, contar todas las muestras con el mismo número de individuos, lo cual resulta limitado. Un enfoque alternativo es contar individuos hasta que se haya muestreado un nivel dado de la distribución de abundancia relativa, por ejemplo, el muestreo podría continuar hasta que la abundancia relativa combinada de las especies muestreadas sea igual a algún valor específico. En efecto, esto significa que las muestras con baja uniformidad deberán contarse a un mayor número de individuos para lograr la misma cobertura de abundancia relativa. Recientemente ha sido utilizado el método *Shareholder Quorum Subsampling* (SQS) también llamado "rarefacción basada en la cobertura" de John Alroy para realizar este ajuste en el muestreo.

Existen otros enfoques y técnicas que se pueden aplicar para el análisis de rocas sedimentarias con contenido fosilífero; como difracción de rayos X, disolución de residuos insolubles, el análisis de isótopos estables de carbono y oxígeno, y los algoritmos estadísticos. La difracción de rayos X (XRD) es una técnica frecuentemente utilizada para la identificación cualitativa de minerales en muestras de roca. De manera general, esta técnica proporciona información sobre la proporción relativa de una fase mineral dentro de una muestra, lo que permite determinar con mayor precisión las composiciones litológicas, por ejemplo, las proporciones de calcita-dolomita en material de grano fino. El uso de XRD es de suma importancia debido a que consiste en un método no destructivo. Además, un estudio quimioestratigráfico como la implementación de isótopos de N, C, y O permite obtener información a detalle del pH, productividad, concentración de nutrientes y circulación de masas de agua en el área de estudio. Esto requiere una colecta de muestras con un mayor control estratigráfico y con ciertas medidas para evitar contaminarlas. El análisis de isótopos ha sido ampliamente aplicable al estudio de las ciencias de la Tierra.

VIII. LITERATURA CITADA

- Almazán-Vázquez, E. 2002. El Cámbrico Temprano y Medio de San José de Gracia, Sonora Central, México. 333 p. En: GEOS Unión Geofísica Mexicana. Libro de resúmenes 22.
- Almazán-Vázquez, E., B. E. Buitrón-Sánchez, y O. Franco-Vega. 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.
- Alroy, J. 2010. Fair sampling of taxonomic richness and unbiased estimation of origination and extinction rates. *The Paleontological Society Papers* 16:55-80.
- Babcock, L. E., R. A. Robison, M. N. Rees, S. Peng, y M. R. Saltzman. 2007. The global boundary stratotype section and point (GSSP) of the Drumian Stage (Cambrian) in the Drum Mountains, Utah, USA. *Episodes* 30(2):84-94.
- Babcock, L. E., S. C. Peng, C. E. Brett, M. Y. Zhu, P. Ahlberg, M. Bevis, y R. A. Robison. 2015. Global climate, sea level cycles, and biotic events in the Cambrian Period. *Palaeoworld* 24(1-2):5-15.
- Bambach R. K., A. M. Bush, y D. H. Erwin. 2007. Autecology and the filling of ecospace: key metazoan radiations. *Palaeontology* 50:1-22
- Beecher, C. E. 1897. Outline of a natural classification of the trilobites. *American Journal of Science, Series 4*, 3:89–106; 181-207.
- Bennington, J. B., W. A. Dimichele, C. Badgley, R. K. Bambach, P. M. Barrett, A. K. Behrensmeyer, R. Bobe, R. J. Burnham, E. B. Daeschler, J. V. Dam, J. T. Eronen, D. H., Erwin, S. Finnegan, S. M. Holland, G. Hunt, D. Jablonski, S. T. Jackson, B. F. Jacobs, S. M. Kidwell, P. L. Koch, M. J. Kowalewski, C.C. Labandeira, C. V. Looy, S. K. Lyons, P. M. Novack-Gottshall, R. Potts, P. D. Roopnarine, C. A. E. Strömberg, H. D. Sues, P. J. Wagner, P. Wilf, y S. L. Wing. 2009. Critical issues of scale in paleoecology. *Palaios* 24(1):1-4.
- Beraldi-Campesi, H. B., F. J. Cuen-Romero, B. E. Buitrón-Sánchez. 2018. Cambrian oncolites from San José de Gracia, Sonora, Mexico. *Paleontología Mexicana* 7(1):23-56.
- Beresi, M. S. 2021. Porifera and Chancelloriidae of the Cambrian of Sonora, Mexico: A review. *Journal of South American Earth Sciences* 111:103428.
- Beresi, M. S., B. Buitrón-Sánchez, F. J. Cuen-Romero, y J. J. Palafox. 2019. Escleritomos de *Chancelloria eros* y escleritos del Cámbrico medio (Serie 3, Piso 5) de Sonora central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 36(1):54-63.
- Bordonaro, O. L., A. L. Banching, B. R. Pratt, y M. M. Raviolo. 2008. Trilobite-based biostratigraphic model (biofacies and biozonation) for the Middle Cambrian carbonate platform of the Argentina Precordillera. *Geologica Acta* 6(2):115-129.
- Bottjer, D. J. 2016. *Paleoecology: Past, Present and Future*. John Wiley & Sons. Wiley-Blackwell, West Sussex, United Kingdom.

- Bottjer, D. J., Z. Yin, F. Zhao, y M. Zhu. 2019. Comparative taphonomy and phylogenetic signal of phosphatized Weng'an and Kuanchuanpu Biotas. *Precambrian Research* 349: 105408.
- Bowyer, F. T., A. Y. Zhuravlev, R. Wood, G. A. Shields, Y. Zhou, A. Curtis, S. W. Poulton, D. J. Condon, C. Yang, y M. Zhu. 2021. Calibrating the temporal and spatial dynamics of the Ediacaran-Cambrian radiation of animals. *Earth-Science Reviews* 225:103913.
- Brasier, M. D., y R. A. Hewitt. 1979. Environmental setting of fossiliferous rocks from the uppermost Proterozoic—Lower Cambrian of central England. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 27:35-57.
- Brasier, M. D. 1982. Sea-level changes, facies changes and the Late Precambrian—Early Cambrian evolutionary explosion. *Precambrian Research* 17(2):105-123.
- Brett C. E. 2008. Paleocology. In: Access Science. New York, NY: McGraw-Hill companies.
- Briggs, D. E. 2015. The Cambrian Explosion. *Current Biology* 25(19):R864-R868.
- Bromley, R. G., 1996. Trace Fossils: Biology, Taphonomy, and Applications (2nd Edition). Chapman & Hall, London.
- Budd, G. E., N. J. Butterfield, y S. Jensen. 2001. Crustaceans and the "Cambrian explosion". *Science* 294(5549):2047-2047.
- Buitrón-Sánchez, B. E., F. J. Cuen-Romero, M. S. Beresi, y R. Monreal. 2021. First record of *Ubaghsicystis* (Eocrinoidea-Echinodermata) from the Cambrian (Miaolingian, Wuliuan) of Sonora, Mexico: Biostratigraphical and paleoecological considerations. *Revista de Biología Tropical* 69(S1):51-65.
- Bush, A. M., R. K. Bambach, R. K., y D. H. Erwin. 2011. Ecospace utilization during the Ediacaran radiation and the Cambrian eco-explosion. 111-133 p. En: Laflamme, M., Schiffbauer J. D., Dornbos, S. Q. (eds.), *Quantifying the Evolution of Early Life, Topics in Geobiology* 36, Springer. Dordrecht, Holanda.
- Caron, J. B., y D. A. Jackson. 2008. Paleocology of the greater phyllopod bed community, Burgess Shale. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 258(3):222-256.
- Cirett, G. J., y R. F. Aguilar. 1989. Características geológicas e hidrogeoquímicas del Valle de Ures, Sonora, México. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora. Departamento de Geología. Hermosillo, Sonora, México.
- Cohen, K. M., S. C. Finney, P. L. Gibbard, y J. X. Fan. 2013. The ICS international chronostratigraphic chart. *Episodes Journal of International Geoscience* 36(3):199-204.
- Conway Morris, S., y A. W. A. Rushton. 1988. Precambrian to Tremadoc biotas in the Caledonides. *Geological Society Special Publication* 38:93-109.
- Cooper, G. A., A. R. V. Arellano, J. H. Johnson, V. J. Okulitch, A. Stoyanow, y C. Lochman. 1952. Cambrian Stratigraphy and Paleontology near Caborca, Northwestern Sonora, México. *Smithsonian Miscellaneous Collections* 119(1):1-184.
- Cuen, R. F., M. S. Beresi, A. Montijo, B. E. Buitrón, I. Minjárez, M. De la O, y J. J. Palafox. 2013. *Chancelloriia* 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., J. E. Valdez-Holguín, B. E. Buitrón, R. Monreal, F. Sundberg, A. Montijo-González, y I. Minjarez-Sosa. 2016. Cambrian Stratigraphy of San José de Gracia, Sonora, Mexico: El Gavilán Formation, a new lithostratigraphic unit of middle Cambrian open shelf environment. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 68(3):429-441.
- Cuen-Romero, F. J., J. E. Valdez-Holguín, B. E. Buitrón-Sánchez, R. Monreal, L. F. Enríquez-Ocaña, E. Aguirre-Hinojosa, J. A. Ochoa-Granillo, y J. J. Palafox-Reyes. 2018. Trilobite-based biostratigraphy (Arthropoda-Trilobita) and related faunas of the Cambrian from Sonora, Mexico. Journal of South American Earth Sciences 83:227-236.
- Cuen-Romero, F. J., J. E. Valdez-Holguín, B. E. Buitrón-Sánchez, R. Monreal, L. F. Enríquez-Ocaña, E. A. Hinojosa, J. A. Ochoa-Granillo, F. J. Grijalva-Noriega, y J. J. Palafox Reyes. 2019a. Paleocology of Cambrian communities of central Sonora, Mexico: Paleoenvironmental and biostratigraphic considerations. Journal of South American Earth Sciences 92:631-645.
- Cuen-Romero, F. J., M. S. Beresi, J. J. Palafox-Reyes, y A. Montijo-González. 2019b. *Ptychagnostus atavus* (Tullberg, 1880) (Trilobita:Agnostida) del Cámbrico medio (Miaolingiano-Drumiano) de Arivechi, Sonora, México: Significado bioestratigráfico. Paleontología Mexicana 8(2):97-108.
- Cuen-Romero, F. J., D. R. Reyes-Montoya, y H. A. Noriega-Ruiz. 2020. El Paleozoico inferior de Sonora, México: 120 años de investigación paleontológica. Paleontología Mexicana 9(1):1-15.
- Cuen-Romero, F. J., A. Montijo-González, R. Monreal, F. A. Sundberg, G. Espinoza-Maldonado, F. J. Grijalva-Noriega, H. A. Noriega-Ruiz, I. Minjárez-Sosa, y J. A. Ochoa-Granillo. 2022. Cambrian (Series 2 to Miaolingian) platform facies from central Sonora, Mexico and the regional correlation. Palaeoworld 31(1):41-57.
- Dickson, J. A. D. 2002. Fossil echinoderms as monitor of the Mg/Ca ratio of Phanerozoic oceans. Science 298(5596):1222-1224.
- Dogliani, C., J. Pignatti, y M. Coleman, M. 2016. Why did life develop on the surface of the Earth in the Cambrian?. Geoscience Frontiers 7(6):865-873.
- Dong, B., X. Long, J. Li, X. Yang, B. Zhao, y J. Luo. 2019. Mo isotopic variations of a Cambrian sedimentary profile in the Huangling area, South China: Evidence for redox environment corresponding to the Cambrian Explosion. Gondwana Research 69:45-55.
- Droser, M. L. 1991. Ichnofabric of the Paleozoic *Skolithos* ichnofacies and the nature and distribution of *Skolithos* piperock. Palaios 6:316-325.
- Du, K. S., J. Ortega-Hernández, J. Yang, X. Y. Yang, Q. H. Guo, W. Li, J. He, K. Li, J. Du, J. Hou, y X. G. Zhang. 2020. A new early Cambrian Konservat-Lagerstätte expands the occurrence of Burgess Shale-type deposits on the Yangtze Platform. Earth-Science Reviews 211:103409.

- Dunne, J. A., R. J. Williams, N. D. Martinez, R. A. Wood, y D. H. Erwin. 2008. Compilation and network analyses of Cambrian food webs. *PLoS biology* 6(4):e102.
- Erwin, D. H., y J. W. Valentine. 2013. *The Cambrian explosion: the construction of animal biodiversity*. Roberts and Company Greenwood Village, Colorado, Estados Unidos de América.
- Fletcher, T.P., y D. H. Collins. 2003. The Burgess Shale and associated Cambrian formations west of the Fossil Gully Fault Zone on Mount Stephen, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* 40(12):1823-1838.
- Fortey, R. A., y R. M. Owens. 1999. Feeding habits in trilobites. *Palaeontology* 42(3):429-465.
- Foster, D. R., P. K. Schoonmaker, y S. T. A. Pickett. 1990. Insights from paleoecology to community ecology. *Trends in Ecology & Evolution* 5(4):119-122.
- González-León, C. M. 1986. Estratigrafía del Paleozoico de la Sierra del Tule, noreste de Sonora. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 6(2):117-135.
- Gross, J., y D. Bhattacharya. 2010. Uniting sex and eukaryote origins in an emerging oxygenic world. *Biology Direct* 5(1):1-20.
- Haq, B. U., y S. R. Schutter. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322(5898):64-68.
- Hong, H. U. A., C. A. I. Yaoping, M. I. N. Xiao, C. H. A. I. Shu, D. A. I. Qiaokun, y C. U. I. Zaihang. 2020. Ecological diversity in the terminal Ediacaran Gaojiashan biota. *Earth Science Frontiers* 27(6):28-46.
- Hurlbert, S. H. 1971. The nonconcept of species diversity: a critique and alternative parameters. *Ecology* 52(4):577-586.
- Kobayashi, T. 1935. The Cambro-Ordovician formations and faunas of South Chosen. *Paleontology*, pt. III. Cambrian Faunas of South Chosen with special study on the Cambrian trilobite genera and families. *Journal Faculty of Science Imperial University of Tokyo* 4:49-344.
- Landing, E., J. B. Antcliff, G. Geyer, A. Kouchinsky, S. S. Bowser, y A. Andreas. 2018. Early evolution of colonial animals (Ediacaran Evolutionary Radiation-Cambrian Evolutionary Radiation-Great Ordovician Biodiversification Interval). *Earth-Science Reviews*, 178:105-135.
- Lincoln, R. J., G. A. Boxshall, y P. F. Clark, P. F. 1995. *Diccionario de ecología, evolución y taxonomía*. Fondo de cultura económica, México.
- Lochman, C. 1952. Trilobites. 60-109 p. En: Cooper, G.A., Arellano, A.R.V., Johnson, J. H., Okulitch, V. J., Stoyanow, A., y Lochman, C. (eds.), *Cambrian Stratigraphy and Paleontology near Caborca, Northwestern Sonora, México*. Smithsonian Miscellaneous Collections. Washington, D.C.
- Lochman-Balk, C., y J. L. Wilson. 1958. Cambrian biostratigraphy in North America. *Journal of Paleontology* 32(2):312-350.
- Mángano, M. G., y L. A. Buatois, L. A. 2014. Decoupling of body-plan diversification and ecological structuring during the Ediacaran-Cambrian transition: evolutionary and

geobiological feedbacks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281:20140038.

- Mángano, M. G., L. A. Buatois, L. A. 2020. The rise and early evolution of animals: where do we stand from a trace-fossil perspective?. *Interface Focus* 10(4):20190103.
- Markello, J. R., y J. F. Read. 1982. Upper Cambrian intrashelf basin, Nolichucky Formation, southwest Virginia Appalachians. *AAPG Bulletin* 66 (7):860-878.
- Marshall, C. R. 2006. Explaining the Cambrian “explosion” of animals. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34:355-384.
- Moysiuk, J., y J. B. Caron. 2019. Burgess Shale fossils shed light on the agnostid problem. *Proceedings of the Royal Society B* 286(1894):20182314.
- Müller, K.J., y D. Walossek. 1987. Morphology, ontogeny and life habit of *Agnostus pisiformis* from the Upper Cambrian of Sweden. *Fossils and Strata* 19:1-123.
- Nardin, E., E. Almazán-Vázquez, y B. E. Buitrón-Sánchez. 2009. First report of *Gogia* (Eocrinoidea – Echinodermata) from the Early–Middle Cambrian of Sonora (México), with biostratigraphical and palaeoecological comments. *Geobios* 42(2):233-242.
- Nash, J. M. 1995. When life exploded. *Time*, 146(23):66-74.
- Nielsen C. 2012. *Animal Evolution: Interrelationships of the Living Phyla*. 3rd edition. Oxford University Press. New York, Estados Unidos de América.
- Noriega-Ruiz, H.A., F. J. Cuen-Romero, L. F. Enríquez-Ocaña, F. A. Sundberg, R. Monreal, A. Varela-Romero, J. J. Palafox-Reyes, y F. J. Grijalva-Noriega. 2020. Cambrian stratigraphy (Series 2 to Miaolingian) of the El Sahuaral area in central Sonora, Mexico: Biostratigraphic implications. *Journal of South American Earth Sciences* 103:102797.
- Noriega-Ruiz, H. A., F. J. Cuen-Romero, L. F. Enríquez-Ocaña, R. Monreal, E. Chacón-Baca, J. J. Palafox-Reyes, y F. J. Grijalva-Noriega. 2022. Quantitative paleoecology of Cambrian (Series 2–Miaolingian) communities from central Sonora, Mexico. *Palaeoworld*.doi:10.1016/j.palwor.2021.12.003
- Page, W.R., A. G. Harris, y J. E. Repetski. 2012. The Cambrian-Ordovician Rocks of Sonora, Mexico, and Southern Arizona, Southwestern Margin of North America (Laurentia). *The Great Carbonate Bank: The geology and economic resources of the Cambrian-Ordovician Sauk megasequence of Laurentia: AAPG Memoir* 98, 897–908.
- Peng, S., L. E. Babcock, y R. A. Cooper. 2012. The Cambrian Period. 437-488 p. En: Gradstein, F., Ogg, J. G., Schnitz, y M., Ogg, G. (eds.), *The Geologic Time Scale*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Peng, S.C., L. E. Babcock, R. A. Robison, H. L. Lin, M. N. Rees, y M. R. Saltzman. 2004. Global Standard Stratotype-section and Point (GSSP) of the Furongian Series and Paibian Stage (Cambrian). *Lethaia* 37:365-379.
- Pfeil, R.W., y J. F. Read. 1980. Cambrian carbonate platform margin facies, Shady Dolomite, southwestern Virginia, USA. *Journal of Sedimentary Petrology* 50(1):91-116.

- Rex, M. A. 1981. Community structure in the deep-sea benthos. *Annual Review of Ecology and Systematics* 12:331-353.
- Richter, R. 1932. Crustacea (Paläontologie). 840-864 p. En: Dittler, R., Joos, G., Korschelt, E., Linek, G., Oltmanns, F. y Schaum, K. (eds.), *Handwörterbuch der Naturwissenschaften*. Gustav Fischer, Jena.
- Riding, R. 1975. *Girvanella* and other algae as depth indicators. *Lethaia* 8:173-179.
- Rivera-Carranco, E. 1988. Condiciones paleoambientales de depósito de las formaciones cámbricas del área de Caborca Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 7(1):22-27.
- Robison, R. A. 1972. Mode of life of agnostid trilobites. 33–40 p. En: *Conference Papers and Proceedings of 24th International Geological Congress, Montreal, Canada, Section 7 (Paleontology)*.
- Robison, R. A. 1976. Middle Cambrian Trilobite Biostratigraphy of the Great Basin: *Geology Studies*. Brigham Young University 23(2):93-109.
- Robison, R. A. 1982. Some Middle Cambrian agnostoid trilobites from western North America. *Journal of Paleontology* 56:132-160.
- Salter, J. W. 1864. A monograph of the British trilobites from the Cambrian, Silurian and Devonian formations. *Monographs of the Palaeontographical Society of London* 37(175):215-224.
- Sanders, H. L. 1968. Marine benthic diversity: a comparative study. *The American Naturalist* 102(925):243-282.
- Schiffbauer, J. D., J. W. Huntley, G. R. O’Neil, S. A. Darroch, M. Laflamme, y Y. Cai. 2016. The latest Ediacaran wormworld fauna: setting the ecological stage for the Cambrian explosion. *GSA Today* 26(11):4-11.
- Schovsbo, N. H. 2000. Environmental fluctuations in the *Olenus* Zone (Upper Cambrian), southern Scandinavia: A geochemical approach. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 47:53-61.
- Seilacher, A. 1956. Der Beginn des Kambriums als biologische Wende. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologische, Abhandlungen* 103:155–180.
- Seilacher, A., W. E. Reif, y F. Westphal. 1985. Sedimentological, ecological and temporal patterns of fossil *Lagerstätten*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 311(1148):5-24.
- Seilacher, A. 1996. Explosive evolution in the Precambrian/Cambrian transition. 65-78 p. En: *Evolución: aspectos interdisciplinarios*. Cuadernos Interdisciplinarios 6.
- Shergold, J. H., 1969. Oryctocephalidae (Trilobita: Middle Cambrian) of Australia. *Bulletins of the Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics Australia* 104:1-66.
- Shergold, J. H. 1997. Explanatory notes for the Cambrian Correlation Chart. In *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part O. Arthropoda 1 Revised, Trilobita* 1:303-311.
- Smith, M. P., y D. A. Harper. 2013. Causes of the Cambrian explosion. *Science*, 341(6152):1355-1356.

- Sperling, E. A., y R. G. Stockey. 2018. The temporal and environmental context of early animal evolution: Considering all the ingredients of an “explosion”. *Integrative and Comparative Biology* 58(4):605-622.
- Stewart, J. H., y F. G. Poole. 2002. Inventory of Neoproterozoic and Paleozoic Strata in Sonora, Mexico. United States Geological Survey Open-File Report 02-97:1-50.
- Sundberg, F. A., y F. J. Cuen-Romero. 2021. Trilobites from the *Crepicephalus* Zone (upper Guzhangian Stage, Miaolingian Series, Cambrian) from northern Sonora, Mexico, and its correlation to Arizona and Texas, USA. *Journal of South American Earth Sciences* 108:103185.
- Swinnerton, H. H. 1915. II.—Suggestions for a revised classification of trilobites. *Geological Magazine* 2(11):487-496.
- Vega-Granillo, R. 1996. Geología de la Sierra de Mazatán. *Boletín del Departamento de Geología. Universidad de Sonora* 13(1):89-102.
- Vossler, S. M., y S. G. Pemberton. 1988. *Skolithos* in the Upper Cretaceous Cardium Formation: An ichnofossil example of opportunistic ecology. *Lethaia* 21(4):351-362.
- Walch, J. E. I. 1771. Die Naturgeschichte der Versteinerungen zur Erläuterung der Knorr'schen Sammlung von Merkwürdigkeiten der Natur: Dritter Theil, 1–85.
- Webster, M., y L. L. Bohach. 2014. Systematic revision of the trilobite genera *Laudonia* and *Lochmanolenellus* (Olenelloidea) from the lower Dyeran (Cambrian Series 2) of western Laurentia. *Zootaxa* 3824(1):1-66.
- Webster, M. 2011. Trilobite biostratigraphy and sequence stratigraphy of the upper Dyeran (Traditional Laurentian “lower Cambrian”) in the southern Great Basin, U.S.A. 121–154 p. En: Hollingsworth, J. S., Sundberg, F. A. y Foster, J. R. (eds.), *Cambrian Stratigraphy and Paleontology of Northern and Southern Nevada. Western Nevada and Eastern California*. Museum of Northern Arizona, Arizona, USA.
- Wills, M. A., D. E. Briggs, y R. A. Fortey. 1994. Disparity as an evolutionary index: a comparison of Cambrian and Recent arthropods. *Paleobiology* 20(2):93-130.
- Zhan, R. B. 2018. Evolution of Early Paleozoic marine faunas. 116–143 p. En: *Life evolution and environments*. Rong, J. Y., Yuan, X. L., Zhan, R. B., y T. Deng, T. (eds), Hefei: China University of Science and Technology.
- Zhang, X., P. Ahlberg, L. E. Babcock, D. K. Choi, G. Geyer, R. Gozalo, S. Hollingsworth, G. Li, E. B. Naimark, T. Pegel, M. Steiner, T. Wotte, y Z. Zhang. 2017. Challenges in defining the base of Cambrian Series 2 and Stage 3. *Earth-Science Reviews* 172:124-139.
- Zhang, X., y D. Shu. 2014. Causes and consequences of the Cambrian explosion. *Science China Earth Sciences* 57(5):930-942.
- Zhang, X., y D. Shu. 2021. Current understanding on the Cambrian Explosion: questions and answers. *PalZ* 95:641-660.
- Zhuravlev, A. Y., y R. A. Wood. 2018. The two phases of the Cambrian Explosion. *Scientific Reports* 8(1):1-10.