

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

LITOFACIES, MICROFACIES, BIOTA Y
PALEOAMBIENTE SEDIMENTARIO DEL
CÁMBRICO INFERIOR-MEDIO DE UNA
SECCIÓN MARINA EN SAN JOSÉ DE GRACIA,
SONORA, MÉXICO

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
GEÓLOGO

PRESENTA:
KARELI ACOSTA GRIJALVA



HERMOSILLO, SONORA, ENERO DEL 2019

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

ÍNDICE

Resumen

I.1. Objetivo General	7
I.2. Objetivos Específicos.....	7
II.- Generalidades	7
II.1.- Antecedentes y trabajos previos.....	7
II.3.Clima	12
II.4. Vegetación.....	14
II.5. Fisiografía	15
II.6. Localización y vías de acceso	16
II.6.1. Vías de acceso.	17
III.- Marco geológico	18
III.1. Marco geológico regional.....	18
III.1.1 Paleozoico	18
III.1.2 Mesozoico	18
III.1.3 Cenozoico	19
III.1.5 Rocas intrusivas.....	20
III.2 Geología local	22
III.2.1 Formación Proveedora (LCamP)	22
III.2.2 Formación Buelna (LCamB).....	23
III.2.3 Formación Cerro Prieto (McaCP).....	23
III.2.4 Formación El Gavilán (McamG)	24
III.2.5. Neógeno (Mioceno)	25
III.2.6. Cuaternario (Qoal)	25
IV.- Petrología	29
V.-Análisis de Litofacies, Microfacies y Biofacies	37
V.2. Litofacies	43
V.2.1.1 Litofacies A.	43
V.3. Microfacies.....	46
Interpretación.....	58
V.4.1 Formación Gavilán	59
VI. Paleogeografía.....	61
VII. Conclusiones y recomendaciones.....	62

VIII. Bibliografía	64
---------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- INEGI, 2016. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas Escala 1: 1 000 000, serie I.	13
Figura 2.- INEGI, 2016. Conjunto de Datos Vectoriales del Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, serie V.	14
Figura 3.- Provincias Fisiográficas de Sonora. Modificado de CONABIO (2012).	15
Figura 4.- Localización del área de estudio.	16
Figura 5.- Vías de acceso al área de estudio, situada al sureste del poblado San José de Gracia Sonora.	17
Figura 6.- Mapa geológico regional, modificado de SGM (2002).	21
Figura 7.-Perfil esquemático de la sección realizada en el Cerro El Chihuarruita, en dirección NW – SE, modificada de Cuen (2013).	26
Figura 8.- Mapa geológico local, modificado de Cuen (2016).	27
Figura 9.- Columna estratigráfica de la sección realizada, modificada de Cuen (2016).	28
Figura 10.- A) Los granos de cuarzo presentan bordes de óxidos de hierro que enfatizan las formas de los mismo LN; B) Se observan cementos de calcita y cuarzo syntaxial sobre los granos de cuarzo. Los bordes de los granos están muy bien definidos por la presencia de óxidos de hierro NC. 10X.	29
Figura 11.- A) Cuarzo monocristalino, cementante syntaxial de sílice y de óxidos de hierro NC 10x. B) Cemento pelicular que rodea a los granos de cuarzo y minerales opacos (pirita), LN 10x.	30
Figura 12.- A) Corresponde a una caliza arenosa con cemento de óxido de hierro y calcita (Ca) 10x NC. B) Caliza arenosa con fragmentos de trilobites (Fg), óxidos de Fe (Ox), aporte detrítico (Qz) en un cemento de calcita recristalizada 10x NC.	31
Figura 13.- A) Grainstone con hiolítidos (FgH) y fragmentos de trilobites (Fg T) 10x NC. B) Grainstone con cortes de trilobites recristalizados, equinodermos (E) y óxidos de hierro (Ox) 10x NC.	32
Figura 14.- Oncolito hematizado, tomada microscopio petrológico Leica 8x.	32
Figura 15.- Oomicrita, Se observa oolíticas superficiales y normales, rellenos de micrita y cristales de cuarzo, en una matriz de micrita y menor proporción cemento de esparita, se observan estilolitas. NC 10x.	33
Figura 16.- A) Cemento de microseparita con abundantes oolitas micritizadas, cortes de equinodermos y pellets. B) cemento de microseparita, cortes de oolitas, algunas reemplazadas por cuarzo, agregados de granos, pseudopelets, cortes de trilobites y presencia de estilolitas. NC 10x.	34
Figura 17.- Wackstone, se presenta con una tonalidad café amarilloso, con vetillas rellenas de óxido de hierro, en la parte central se observa una espícula de esponja. NC 4X.	35
Figura 18.- Lutita calcárea – mudstone, se observa aporte terrígeno y óxido de hierro NC 4X.	35
Figura 19.- Lutita con horizonte de óxido de hierro y vetilla de calcita.	36
Figura 20.-Microfacies Estándares (SMF) de Wilson (1975).	38
Figura 21.-Modelo propuesto por Flügel (2004) para los tipos de microfacies de rampa RMF.	38
Figura 22.-Fotografías de la biofacies A, donde en la foto 1 y 2 se observa estratificación cruzada, fotos 3 y 4, estratificación laminar y fotos 5 y 6 Láminas delgadas de cuarzoarenita, con cementante de óxido de hierro, y cortes de trilobites, tomadas LN y NC.	44
Figura 23.-Fotografías de la biofacies B, 1) <i>Thalassinoide</i> isp, 2) <i>Monocraterion</i> isp., 3) <i>Skolithos</i> isp., 4) <i>Diplocraterion</i> isp., 5 y 6) Láminas delgadas de cuarzoarenita, con cementante syntaxial y pelicular, tomadas LN y NC.	45

Figura 24.- 1, 2,3 y 4) Imágenes correspondientes a caliza arenosa con cemento de óxido de hierro y calcita (lente de 10x NC), 5 y 6) caliza arenosa con fragmentos de trilobites, óxidos de Fe, aporte detrítico (cuarzo) en un cemento de calcita recristalizada (lente de 10x NC).....	47
Figura 25.-1, 2) Cortes de trilobites en una matriz de micrita (lente de 4x, NC), 3) cortes de trilobites con un cementante de esparita (lente de 4x, NC), 4) cortes de trilobites y hyolites altamente desgastados en una matriz de micrita (lente de 4x, NC), 5) granos de cuarzo encima de un corte de <i>Hyolithes</i> erosionado (lente de 4x, NC), 6, 7) fragmentos de roca y cortes esqueléticos muy erosionados (lente de 4x, NC), 8, 9) cortes de <i>Hyolithes</i> y trilobites con un cementante de esparita (lente de 4x, NC), 10, 11, y 12) cortes de <i>Salterella</i> y trilobites con aporte de esparita (lente 4x, NC), 13, 14 y 15) cortes de equinodermos en una matriz de micrita con aporte terrígeno, (lente de 4x, NC).....	49
Figura 26.- 1) Cortes de equinodermos y trilobites, aporte terrígeno de formas aglutinadas (lente de 4x, NC), 2) cortes de equinodermos (identificados como <i>Gogia</i>) en una matriz de micrita. 3) caliza arenosa (lente de 4x, NC), 4, 5, y 6) cortes de oncolitos en una matriz de micrita, aporte de óxidos (lente de 4x, NC).	51
Figura 27.-A. oolitas micritizadas y superficiales; B. oolitas normales y micritizadas; C. oolitas superficiales y reemplazadas por sílice y estilolitas; D. oolitas superficiales, micritizadas y reemplazadas por sílice; E. oolitas micritizadas y recristalizadas por calcita; F. oolitas recristalizadas por calcita, placas de equinodermos; G. oolitas micritizadas, superficiales, recristalizadas por calcita; H. Oolitas micritizadas con óxidos de hierro; I. pisolito, oolitas superficiales y normales; J. oolitas normales y superficiales, equinodermos; K. oolitas reemplazadas por óxidos de hierro; L. oolitas rellenas de óxidos de hierro; M. oolitas rellenas de detritos de cuarzo; N. Oolitas rellenas de óxidos de hierro; Ñ. oolitas con óxidos de hierro.	55
Figura 28.- Se muestran imágenes de secciones delgadas de la Formación Buelna, presentan cortes oolíticos, equinodermos y otros fragmentos esqueléticos en una matriz de micrita con poco cementante esparítico, (lente de 4x, NC).	56
Figura 29.- Imágenes de láminas delgadas, Formación Buelna, cortes oolíticos, equinodermos y fragmentos esqueléticos en un cementante de esparita con aporte de óxidos (lente de 4x, NC).....	57
Figura 30.- Localización de las facies utilizando los modelos de Flügel y Wilson (2004).....	58
Figura 31.- A <i>Bathyriscus</i> , B <i>Oryctocephalus</i> sp., C <i>Pagetia rugosa</i>	59
Figura 32.- 1 y 2) corte de trilobites (<i>Pagetia rugosa</i>).....	60
Figura 33.- Interpretación de ambientes de biofacies	60
Figura 34.- Afloramientos cámbricos actuales en el estado de Sonora. Tomado de Cuen 2013.	61
Figura 35.- Mapa Paleogeográfico en el Cámbrico inferior (510M.a).....	61

RESUMEN

En la sección litológica del cerro El Chihuarruita en San José de Gracia, Sonora, afloran rocas clásticas y carbonatadas del Cámbrico inferior y medio. Se analizaron 47 secciones delgadas que corresponden principalmente a cuarzoarenita, rudstone oncolítico, grainstone-packstone y grainstone en menor proporción así como caliza arenosa.

Se determinaron dos litofacies para la Formación Proveedora, cinco microfacies para las formaciones Buelna y Cerro Prieto, y tres biofacies para la Formación El Gavilán. Litofacies 1: cuarzoarenita con estratificación cruzada y laminar depositada en un ambiente de intermarea y supramarea. Litofacies 2: cuarzoarenita masiva con abundantes icnofósiles representativos de la icnofacies de *Skolithos*, de ambiente inframarea e intermarea. Microfacies 1 (MF1): caliza arenosa con presencia de fragmentos de trilobites y aporte terrígeno (cuarzo monocristalino y policristalino). Microfacies 2 (FM2): grainstone con intraclastos constituida por algas oncolíticas, agmatos, hiolítidos, trilobites, equinodermos, intraclastos y fragmentos de roca. Microfacies 3 (FM3): grainstone bioesparítico con oncoides. Se compone de algas oncolíticas con abundante presencia de equinodermos. Microfacies 4 (MF4): wackestone y packstone con ooides, constituida por abundantes ooides y fragmentos de trilobites y placas de equinodermos en una matriz de micrita. Microfacies 5 (MF5): grainstone de oolitas, compuesta por oolitas con equinodermos en un cementante de esparita. Biofacies 1 (Dolichometopidae-*Bathyriscus*): constituida por wackestone y packstone, predominando los géneros *Bathyriscus*, *Ogygopsis*, *Elrathina* y *Pentagnostus*. Biofacies 2 (Oryctocephalidae-*Oryctocephalus*-*Oryctocephalites*): mudstone, con abundante presencia de los géneros *Pentagnostus*, *Oryctocephalus*, *Oryctocephalites* y *Elrathina*. Biofacies 3 (Eodiscidae-*Pagetia*): mudstone y lutita, con la presencia de los géneros *Pagetia*, *Pentagnostus* y *Ogygopsis*.

El modelo de sedimentación obtenido sugiere cambios en el nivel del mar, variando desde plataforma interior (intermarea a supramarea) migrando a facies lagunares de circulación abierta, arrecife de margen de plataforma, plataforma de alta energía y finalmente plataforma exterior de baja energía.

I.- Introducción

I.1. Objetivo General

El objetivo general es realizar un estudio petrográfico de litofacies, microfacies y biofacies en una secuencia estratigráfica del Cámbrico inferior-medio, expuesta en el Cerro el Chihuarruita, San José de Gracia, Sonora.

I.2. Objetivos Específicos

- ❖ Clasificar petrográficamente las muestras recolectadas, según las clasificaciones: textural de Dunhan (1962), Composicional de Folk (1962) y para rocas mixtas Vatan (1967), Pettijohn *et. al.* (1973).
- ❖ Realizar un análisis litofacies y de biofacies de las muestras recolectadas para determinar su ambiente de depósito.
- ❖ Relacionar las microfacies analizadas para la Formación Buelna y Cerro Prieto con el modelo propuesto por Wilson (1975) y Flügel (2004) para rocas carbonatas.

II.- Generalidades

II.1.- Antecedentes y trabajos previos

Los sedimentos del Paleozoico inferior (Cámbrico) en México han sido ampliamente estudiados, sin embargo, existe poca bibliografía, referente al Cámbrico, debido a que los afloramientos son esporádicos y aislados, localizados principalmente en la parte norte del país, en el estado de Sonora.

La presencia de rocas cámbricas en el estado de Sonora, México, es conocida desde mediados del siglo pasado (Lochman, 1948; Álvarez, 1949; Cooper *et al.*, 1952; 1956), y estas han sido objeto de numerosos estudios estratigráficos, paleontológicos y en menor proporción sedimentológicos. Las rocas cámbricas son diversas en litología y se encuentran en diferentes localidades, siendo generalmente afloramientos esporádicos y aislados, pero con fauna en buen estado de conservación.

Las rocas cámbricas del noroeste de Sonora fueron identificadas desde 1941, en los municipios de Altar, Magdalena y Arizpe, asignadas entonces a las formaciones Caborca, Arrojos, y Cananea, por los geólogos Isauro G. Gómez y Lorenzo Torres Izabal (Lochman, 1948; Álvarez, 1949; Cooper *et al.*; McMEnamin, 1987).

Cooper & Arellano, 1946 recolectaron fósiles de *Olenellus* sp. y *Girvanella* sp. en la cima de Cerro Prieto al sur de Caborca (Álvarez, 1949). En ese mismo año empieza a incrementarse el interés por las rocas del Cámbrico en el estado, como lo demuestran las primeras publicaciones realizadas por Cooper & Arellano (1946) quienes realizan los primeros estudios en el área de Caborca.

Cooper *et al.*, (1952) realizan un estudio detallado de la estratigrafía de las rocas cámbricas de Caborca, estableciendo las siguientes unidades para el Cámbrico inferior: Formación Puerto Blanco, Formación Proveedora, Formación Buelna y Formación Cerro Prieto; para el Cámbrico medio consideran la Formación Arrojos y la Formación El Tren (Cooper *et al.*, 1952; 1956).

González-León (1986), describe en el área de la sierra del Tule, municipio de Cananea, Sonora, una secuencia de rocas sedimentarias del Cámbrico medio y superior (Dresbachiano); constituida principalmente por arenisca, caliza y capas de lodolita, limolita y arenisca de grano muy fino.

Rivera-Carranco (1988a; 1988b), realizó trabajos en el área de Caborca, analizando las características litológicas de las formaciones cámbricas con el fin de tener claro las condiciones paleoambientales del depósito. Sus datos señalan que la mayor parte de estas formaciones representa medios de aguas someras y tranquilas de carácter lagunar, además de existir depósitos de intermareas y submareas.

En el área de Arivechi, este de Sonora, Almazán-Vázquez (1989), reporta afloramientos sedimentarios del Cámbrico medio y superior, constituidos por lutita, arenisca, caliza oolítica y caliza oncolítica, distribuidos en las formaciones La Sata, El Mogallón, La Huerta y Milpillitas.

Cirett & Aguilar (1989), reportan por primera vez una secuencia del Cámbrico expuesta en el área de San José de Gracia, quienes estudiaron la estratigrafía de las rocas de la región, identificando para el Cámbrico las formaciones Proveedora, Buelna, y Cerro Prieto, estas unidades las incluyen dentro del Grupo San José. Posteriormente Maytorena-Silva (1990) estudia las implicaciones tectónicas de estas rocas.

Bartolini *et al.* (2001), realizaron un estudio estratigráfico y geocronológico (K-Ar) en rocas del terciario en San José de Gracia, donde también afloran rocas cámbricas, definiendo secuencias volcanoclásticas que sobreyacen discordantemente a las secuencias cámbricas. Dichas secuencias están constituidas por conglomerados terciarios y rocas volcánicas como un conjunto de mesas orientadas norte-sur y bloques inclinados.

Stewart *et al.* (2002), realizaron un estudio detallado de la estratigrafía de la secuencias neoproterozoicas y cámbricas dividiéndolas en cuatro asociaciones: 1) secuencia neoproterozoica ubicadas al noreste de Hermosillo, representada por los Grupos Las Víboras y El Águila considerados como parte del supercontinente Rodania., 2) secuencia compuesta por El Grupo Cerro Las Bolas ubicado en Sahuaripa., 3) en la porción norte-noreste estratos neoproterozoicos y cámbricos que fueron depositados a lo largo del margen continental de Laurentia, y 4) hacia el sureste, la cubierta de cratón del cámbrico medio y superior dentro del miogeosinclinal cordillerano.

En el área de San José de Gracia, aflora una secuencia de rocas sedimentarias compuesta por cuarcita, arenisca, lutita y calizas de edad del Cámbrico inferior y medio, donde se han reportados varios trabajos que a continuación se mencionan:

Buitrón *et al.* (2004), mencionan la presencia del eocrinoide *Gogia spiralis* Robison, 1965, y los trilobites índice *Bristolia* sp. cf. *B. bristolensis* y *Peronopsis* sp. cf. *P. bonnerensis*.

Nardin *et al.* (2009), publican el primer informe de *Gogia* (Eocrinoidea, Echinodermata) del Cambriano temprano medio de Sonora (México), con comentarios bioestratigráficos y paleoecológicos.

Cuen (2012), realiza un estudio detallado de la estratigrafía y paleontología de estas rocas cámbricas y las establece como secciones de referencia al Cámbrico del área de Caborca, identificando las formaciones Provedora, Buelna, Cerro Prieto y Arrojos, pero con un cambio de facies hacia ambientes más externos. El mismo autor realiza una reevaluación del material fósil e identifica la presencia de *Ogygopsis* sp., *Pagetia* sp., *Lingulella* sp. y escleritos de *Chancelloria* sp., además de la presencia de *Salterella* sp.

Cuen *et al.* (2012), hablan de la presencia de la Zona de *Albertella* en la Formación Arrojos debido a la abundancia de *Oryctocephalus* sp., *Ogygopsis typicalis*, *Elrathina antiqua*, *Bathyriscus* sp. *Peronopsis bonnerensis* y *Pagetia resseri*.

Cuen (2013), en su trabajo de tesis asigna a la Formación Buelna a la Zona de *Bristolia mohavensis* *Bristolia insolens*, confiriéndoles una edad Serie 2, Piso 4 (Cámbrico inferior tradicional). Las rocas de la Formación El Gavilán las coloca en la Zona de *Mexicella mexicana*, Subzona de *Albertella highlandensis* o *Ptychagnostus praecurrens* para plataforma abierta, con una edad del Cámbrico Serie 3, Piso 5.

Cuen *et al.* (2013), reportan la presencia de *Chancelloria eros* y *Diagoniella* sp., en la Formación El Gavilán, confirmando la existencia de abundantes invertebrados marinos en esta unidad.

Acuña (2015), en su tesis de licenciatura reporta para las formaciones Buelna y El Gavilán la presencia de braquiópodos en su mayoría inarticulados y en menor proporción articulados.

Cuen *et al.* (2016), en el trabajo Estratigrafía del Cámbrico de San José de Gracia, Sonora, México: Formación El Gavilán, una nueva unidad litoestratigráfica de ambiente de plataforma abierta del Cámbrico medio, propone formalmente a la Formación El Gavilán.

Buitrón *et al.* (2017), reporta por primera vez dos especies de hiolítidos para la región de San José de Gracia, *Hyolithes* cf. *H. sonora* Lochman, 1952, que fue descrita para el Cámbrico de Caborca en la región noroeste del estado de Sonora, y *Haplophrentis reesei* Babcock y Robison, 1988, por primera vez para México, la cual fue referida antes para el Cámbrico medio de la región norte de Utah, Estados Unidos de Norteamérica.

Cuen (2017), en su trabajo de doctorado hace un estudio de la Paleoecología de los ecosistemas marinos del Cámbrico de Sonora, México: comparación con los ecosistemas marinos del Holoceno.

Buitrón *et al.* (2017), reporta blastoideos de la especie *Gogia granulosa* Robison, 1965, y *Gogia* sp., y otros fósiles de invertebrados con valor estratigráfico, provenientes de una poderosa secuencia sedimentaria marina compuesta de caliza, pizarra y arenisca del

Cámbrico inferior medio, que se encuentra en San José de Gracia, municipio de Ures, región central del estado de Sonora, México.

II.2. Metodología

Para la elaboración del presente trabajo se llevaron diferentes etapas de desarrollo, las cuales se describen a continuación:

➤ *Recopilación bibliográfica:*

Consistió en la recopilación de información bibliográfica e investigaciones llevadas a cabo a nivel regional y en el área de estudio, la consulta se realizó en libros de textos, tesis y en revistas nacionales e internacionales de gran importancia para la realización del presente trabajo.

➤ *Visitas al área de estudio:*

Esta etapa consistió en varias visitas al área de estudio, donde se realizó muestreo de rocas, toma de datos como: rumbo y echado, estructura; se elaboró una sección litológica detallada basada en cambios litológicos y fósiles, así como también fotografías de los afloramientos.

➤ *Elaboración de láminas delgadas*

Se seleccionaron los mejores ejemplares de las muestras colectadas para la elaboración de láminas delgadas llevadas a cabo en el laboratorio de laminación del Departamento de Geología (UNISON), Hermosillo, Sonora., posteriormente se hizo el análisis petrográfico utilizando el microscopio Leica (DM EP) y software (LAS V4.4), para el análisis petrológico el microscopio Leica (EZ 4 HD) y software (LAS EZ).

➤ *Análisis petrográfico y litológico:*

Para el análisis petrográfico y litológico de las muestras pertenecientes a las Formaciones Provedora, Buelna, Cerro Prieto y Gavilán, se recurrió a las clasificaciones propuestas por los siguientes autores: para rocas mixtas se utilizó la clasificación de Vatan (1967) para rocas carbonatadas se utilizó la clasificación composicional de Folk (1972) y textural de Dunham (1962); complementando con la propuesta de Emby y Klovan (1972).

Para rocas detríticas se utilizó la clasificación de Wentworth (1922) para el tamaño de grano, y para el contenido de cuarzo, feldespato y fragmento de rocas de Petijhon (1973).

Por medio del análisis petrográfico y litológico se determinaron los componentes y características texturales de las rocas por medio de 47 láminas delgadas. Para el conteo de los componentes alquímicos en las rocas carbonatadas se utilizaron los términos propuestos por Longoria y Monreal (1991): presencia, traza (0-5 individuos), raro (6-10 individuos), escaso (11-16 individuos), frecuente (17-25 individuos) y abundante (más de 25 individuos). El registro de estos datos fue tabulado en archivos Excel (Tablas) y el registro fotográfico se muestra en el anexo.

➤ *Integración de datos:*

Se realizó la integración de datos en tablas, esquemas, perfil de la sección y columna estratigráfica de la misma, con el procesamiento de los datos obtenidos anteriores se realizó una interpretación para las diferentes microfacies, facies y biofacies, para obtener conclusiones y resultados.

II.3.Clima

El 46.69% de la superficie del estado presenta clima muy seco, el 27.51% clima semiseco, el 20.22% clima seco y el 5.58% clima subhúmedo.

En términos generales los climas predominantes en el estado de Sonora, por extensión territorial, son: semicálido muy seco (34.17%), cálido muy seco (12.52%), templado semiseco (12.52%), semicálido semiseco (11.8%), semicálido seco (11.45%), cálido seco (7%), templado subhúmedo (3.89%), cálido semiseco (3.19%), templado seco (1.77%), semicálido subhúmedo (1.45%) y cálido subhúmedo (0.24%). Fuente Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal INAFED, (2016).

El Clima del área de estudio se caracteriza por ser tipo calido muy seco con base a la clasificación INEGI (2008). La temperatura media anual varía de 18 - 22 °, con una temperatura máxima anual de 39° C en los meses de junio y julio. En el mes de enero se presentan las temperaturas más bajas con promedio mínimo de 5°. La precipitación media anual es de 400 milímetros y los meses más lluviosos son julio y agosto. (Figura 1).

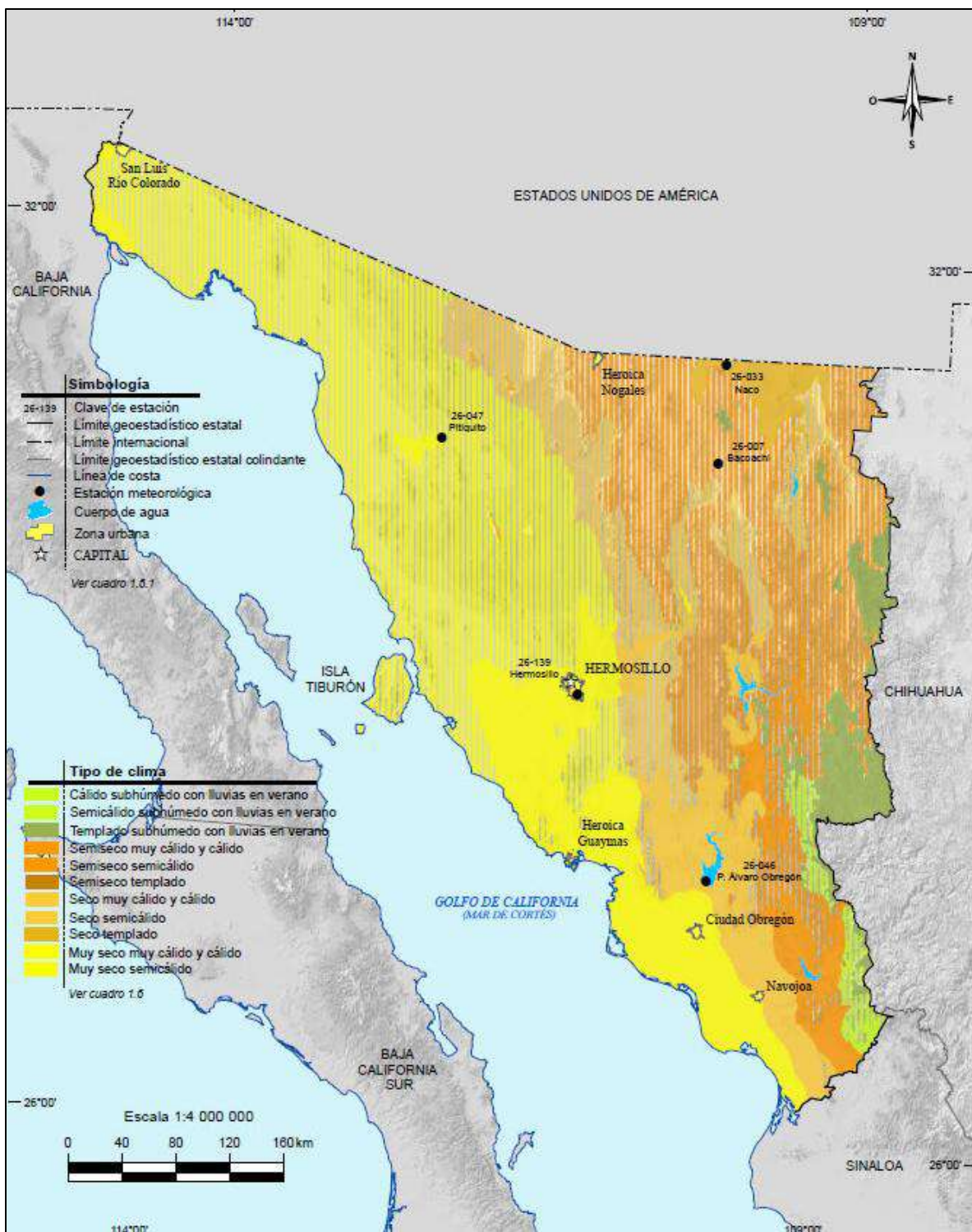


Figura 1.- INEGI, 2016. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas Escala 1: 1 000 000, serie 1.

II.4. Vegetación

Según la carta de uso de suelo y vegetación INEGI (2016), escala 1:250 000, el área de estudio se encuentra caracterizada principalmente por pastizales y matorrales espinosos de las especies *Prosopis velutina* (mezquite), *Cercidium microphyllum* (palo verde), *P. aculeata* (bagote), que se presentan en los cauces de los arroyos intermitentes y en las faldas de los cerros. También están presente *Mimosa* (uña de gato) y *Fouquieria* (cotillo), y abundantes cactáceas en su mayoría *Opuntia* spp. (nopal) y *Cylindropuntia thurberi* (siviri). (Figura 2).

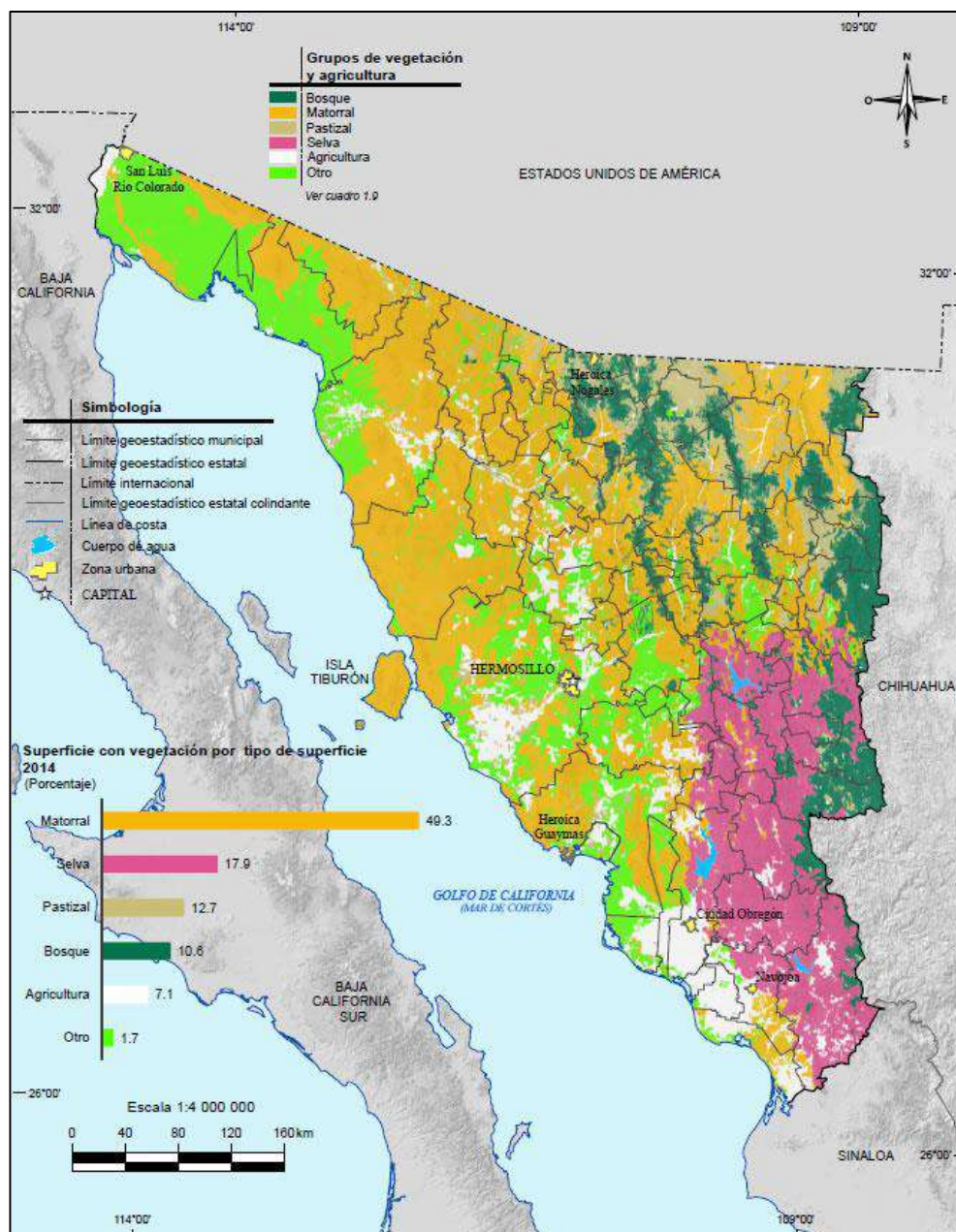


Figura 2.- INEGI, 2016. Conjunto de Datos Vectoriales del Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, serie V.

II.5. Fisiografía

El estado de Sonora se encuentra comprendido dentro de cuatro provincias fisiográficas, denominadas como: Provincia Sierra Madre Occidental, Provincia Llanura Sonorense, Provincia de Sierra y Llanuras del Norte, y la Provincia de la Llanura Costera del Pacífico. El área de estudio forma parte de la transición entre las Provincias: Llanura Sonorense y Sierra Madre Occidental (INEGI-SEMARNAT, 1998, Modificado de CONABIO, 2012), (Figura 3).

La Llanura Sonorense comprende más del 50% de la superficie del estado, y la cual se divide en tres subprovincias: Sierras y Llanuras Sonorenses, Desierto de Altar, y Sierra del Pinacate. Consta de sierras paralelas con orientación nor-noreste a sur-sureste, separadas entre sí por grandes bajadas de aluviones y llanuras cada vez más extendidas hacia la costa. El área de estudio pertenece a la subprovincias de Sierras y Llanuras Sonorense.

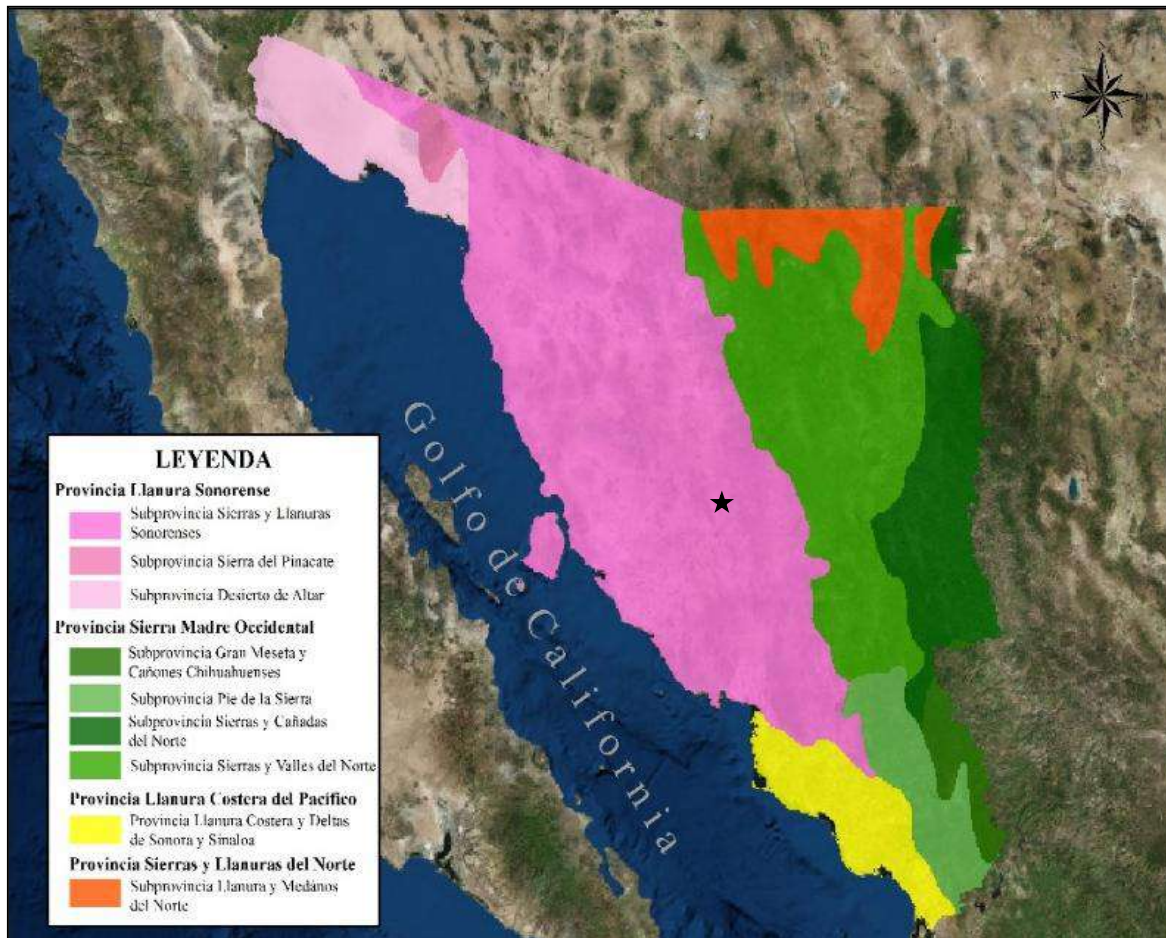


Figura 3.- Provincias Fisiográficas de Sonora. Modificado de CONABIO (2012).

II.6. Localización y vías de acceso

El área de San José de Gracia se localiza en la parte central del estado de Sonora, a 36 Km al noroeste de Hermosillo, capital de la entidad. El área de estudio aflora en la carta topográfica H12–D32, escala 1:50,000 de INEGI (2001); y en la carta Geológico – Minera H12–D32, escala 1:50,000 de SGM (2002). La loma El Chihuarruita, correspondiente a los afloramientos cámbricos se localiza a 2 km al sureste del poblado San José de Gracia, en las coordenadas geográficas 29°17'06'' N y 110°35'05'' W, (Figura 4).

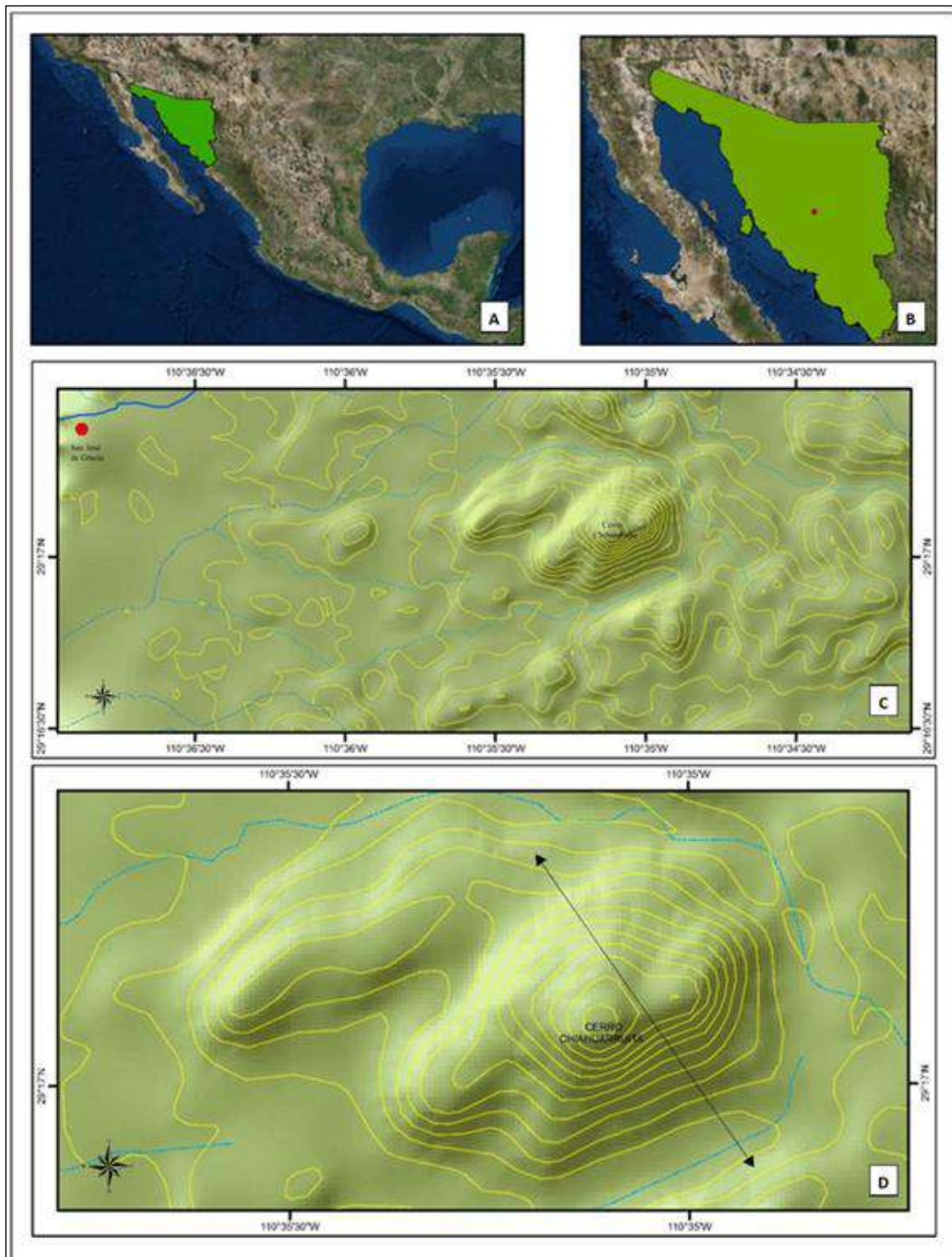


Figura 4.- Localización del área de estudio.

II.6.1. Vías de acceso.

Partiendo desde la ciudad de Hermosillo, el acceso al área de estudio se realiza tomando la carretera federal No. 15 y después la carretera federal No. 21 en el tramo Hermosillo – Ures, se tiene el entronque al poblado de San José de Gracia por un camino de terracería el cual nos conduce al área de estudio ubicado a 3.2 km al sureste del poblado, (Figura 5).

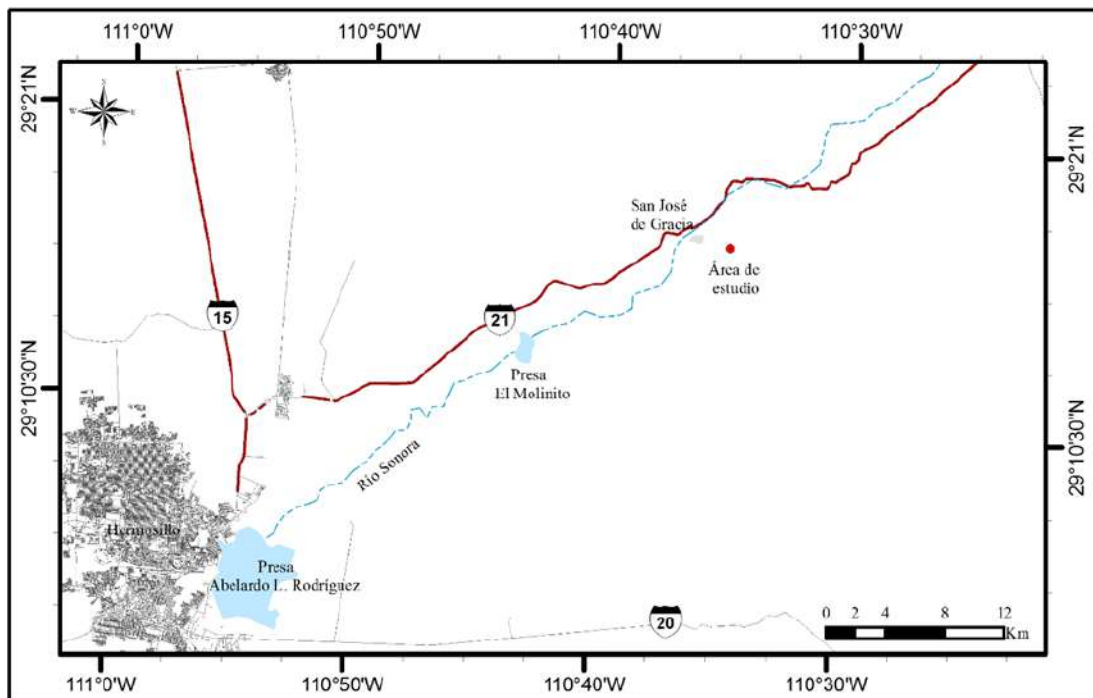


Figura 5.- Vías de acceso al área de estudio, situada al sureste del poblado San José de Gracia Sonora.

III.- Marco geológico

III.1. Marco geológico regional

El marco geológico en general lo constituyen rocas cuya antigüedad oscilan del Paleozoico inferior hasta el reciente. A continuación se hace una breve descripción de las unidades litológicas que afloran en el área de estudio, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente, cuya distribución se observa en la Figura 6.

III.1.1 Paleozoico

Unidad caliza, dolomía y arenisca (EiPcp,Do,Ar). Fm Puerto Blanco, Cuarcita Provedora, Fms Buelna, Cerro Prieto, Arrojos, El Tren, El Bisani, Dolomía San Antonio, Fms Murciélago, El Represo y La Venada.

Esta unidad comprende rocas del Paleozoico (Cámbrico-Pérmico), la litología predominante corresponde a caliza, dolomía y arenisca, que se depositaron en un mar somero de aguas tranquilas, posiblemente de plataforma o bancos calcáreos. Dentro de esta unidad se encuentran las formaciones Provedora, Buelna, Cerro Prieto, Arrojos y el Tren, definidas por Cooper & Arellano (1946; 1956) y Cooper et al. (1956) en el área de Caborca. Se encuentran aflorando en el área de estudio al norte, sur, oeste y suroeste de la misma.

III.1.2 Mesozoico

Unidad compuesta por andesitas y tobas andesítica (KspaA-TA). Formación Tarahumara.

Wilson y Rocha (1946) definieron la Formación Tarahumara en la cercanía de los poblados de San Javier y Tonichi, para describir un paquete característico de rocas volcánicas constituido por derrames brechas y aglomerados de composición andesítica-dacítica, que en su mayoría presentan evidencias de alteración hidrotermal de tipo propílitica, las cuales fueron producidas por el emplazamiento de cuerpos intrusivos del complejo batolítico Laramide de Sonora. Esta formación fue datada con métodos radiométricos y arrojó edades entre 70 y 90 años Ma (Cretácico Superior) (McDowell et al., 1994). Dentro de estas unidades se colocan las formaciones El Chanate, La Mesa y El Tuli. Estas unidades se encuentran aflorando en el centro y noroeste del área de estudio.

III.1.3 Cenozoico

Unidad Basalto-Andesita (NmB–A) Grupo Yécora (Infomal)

El Grupo Yécora fue propuesto de manera informal por Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana (1998) para agrupar a todas las rocas volcánicas y piroclásticas de composición ácida con basaltos en la cima, que afloran principalmente en la porción superior de la Sierra Madre Occidental en Sonora. Litológicamente corresponde a flujos de basalto intercalados con aglomerados basálticos sobre los que descansa la Formación Baúcarit. En esta unidad se realizaron estudios radiométricos de K/Ar y arrojaron edades que van de 30.4 a 25.3 Ma (Johnpeer 1977). Esta unidad se encuentra aflorando en la parte central, norte y noroeste del área.

Unidad Conglomerado Polimíctico-Arenisca (NmCgp–Ar) Formación Baucarit

Dumble (1900) definió a la Formación Báucarit, constituida litológicamente por conglomerado polimictico con fragmentos de rocas volcánicas e intrusivas, con intercalaciones de arenisca y basalto principalmente, gravas y arenas poco consolidadas. Se tienen edades radiométricas de K/Ar de 17 a 21 ± 0.4 Ma lo cual sitúa a esta unidad en el Mioceno. Se encuentra aflorando en la porción noroeste, norte, noreste, sur, suroeste y centro del área de estudio.

Unidad Toba Riolítica, Dacita, Andesita (NmTR, Da, A) Formación Lista Blanca

La Formación Lista Blanca corresponde a la parte superior del Grupo Yécora (informal) definido por Grijalva y Roldan (1988) y está constituido por una secuencia de toba riolítica, riolita, ignimbrita, andesita, aglomerado andesítico y algunos domos andesíticos con espesores que oscilan de 100 a 500 m. Se tiene edades de radiométricas de K/Ar 10.4 ± 0.2 Ma Bartolini et al. (1991), Se tienen 15 muestras datadas por K/Ar con edades que varían de 10.3 ± 0.3 a 23.5 ± 0.8 Ma, (Cochemé, 1985; Montigni; 1987, Demant, 1991; M.Kunk, 1994; Mora. A, G. 1993; Gans, 1997; Gastil y Krummenacher 1977). Esta unidad aflora al oeste, noroeste y sureste del área de estudio.

III.1.4 Cuaternario

Conglomerado Polimíctico (QptCgp) Grupo Sonora (Informal)

Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana (1998) definieron informalmente al Grupo Sonora compuesto por un conglomerado polimíctico, semiconsolidado, con fragmentos de rocas riolíticas, andesíticas, graníticas, metamórficas y calcáreas contenidos en una matriz arenosa, formando depósitos de talud y terrazas con espesores que varían de 20 hasta 50 m. Por su posición estratigráfica se ubica en el Pleistoceno y se correlaciona en edad con los basaltos del campo volcánico Moctezuma en donde tiene edades de 0.53, y 1.7 Ma que indican una edad del Pleistoceno Paz-Moreno et al. (2003). Se encuentran principalmente en los amplios valles y bordes orográficos.

Unidad Aluvión (Qhoal)

Unidad constituida por sedimentos no consolidados que van de gravas, arenas, limos y arcillas con espesores que varían a más de 50 m. En el área se encuentra aflorando en los valles y en los arroyos principalmente, cubriendo desde las unidades precámbricas hasta las recientes.

Unidad arenas limos arcillas (Qhoali)

Está constituido por arenas, limos y arcillas, llegan a tener espesores de 40m. En el área de estudio aflora hacia la parte noreste y suroeste.

III.1.5 Rocas intrusivas

Rocas intrusivas: Unidad granito-granodiorita (KsTpaGrGd). Batolito Laramide (informal)

Esta unidad forma parte del batolito Laramide que aflora ampliamente en el NW de México y fue estudiado por Damon, P.E., et al. (1983). Posteriormente fue propuesto el nombre de Suite Intrusiva El Jaralito por Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana (1998), esta unidad litodémica trata de agrupar aquellos afloramientos de rocas intrusivas de composición principalmente ácida a intermedia cuyas edades varían desde el Cretácico Temprano al Eoceno, los cuales son muy abundantes a lo largo de toda la geografía del estado de Sonora. Se encuentra aflorando en sur, centro y noroeste del área.

Geología Regional

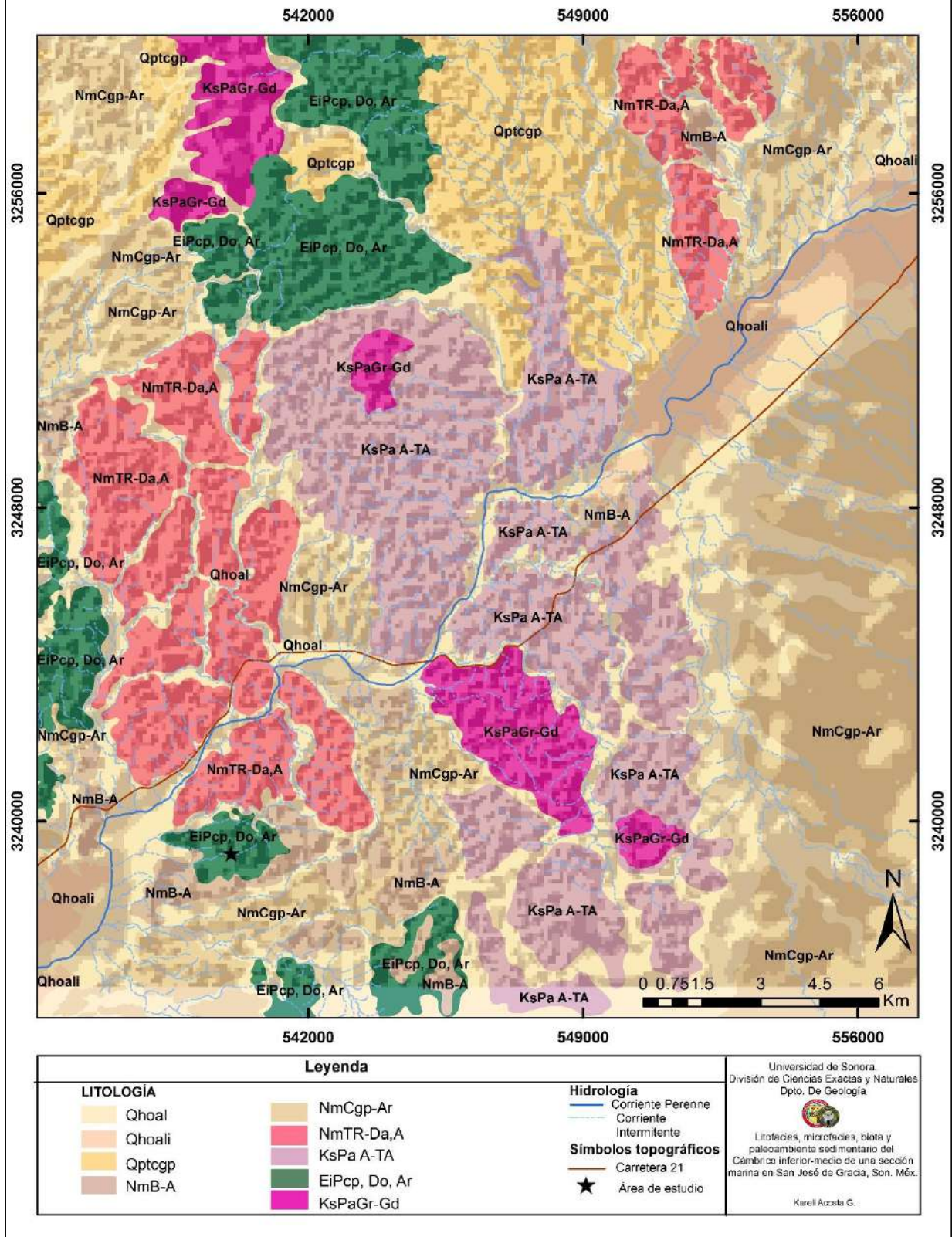


Figura 6.- Mapa geológico regional, modificado de SGM (2002).

III.2 Geología local

La sección estudiada comprende una secuencia detrítico-carbonatada del Cámbrico inferior-medio de aproximadamente 600 m de espesor, y aflora sobre la Loma El Chihuarruita que se muestra en cuatro formaciones: Proveedora, Buelna, Cerro Prieto y El Gavilán, que muestra algunos cambios en comparación con las formaciones cámbricas del área de Caborca. (Figuras 7, 8 y 9).

III.2.1 Formación Proveedora (LCamP)

Definición. Está compuesta por intercalaciones de cuarcitas y areniscas, con espesor de 266 m. de edad Cámbrico inferior. Definida por Cooper *et al.* (1956,) en el Cerro La Proveedora en Caborca Sonora.

Litología y espesor. Constituida principalmente por arenita de cuarzo intercalada con areniscas limolíticas, estas últimas en niveles menores, presentando en ocasiones metamorfismo ligero (Cooper *et al.* 1952; 1956). Posee un espesor aproximado que varía de 225 hasta 260 m. De la base a la cima, se encuentra la cuarcita de color blanco y ocasionalmente con tonalidades grisáceas y con algunas manchas de óxidos de fierro, posteriormente se encuentra la arenisca de grano fino de color café oscuro-verde, hacia a la cima se tiene gran cantidad de micas e icnofósiles, con escasos fragmentos de trilobites, los cuales no pudieron ser identificados con certeza por sus descriptores originales.

Distribución. El área de estudio, aflora únicamente en la Loma El Chihuarruita, encontrándose topográficamente en la cima del mismo.

Relaciones estratigráficas. El contacto inferior se desconoce, y es sobreyacida en forma concordante por la Formación Buelna.

Edad y Correlación. En el área de estudio no se encontraron fósiles, que pudieran indicar una edad, pero por correlación con La Formación Proveedora (Cooper *et al.*, 1956) del área de Caborca se le asigna una edad del Cámbrico inferior.

Ambiente. El alto contenido de bioturbación e icnofósiles, indican un ambiente somero, intermarea y submarea, probablemente de la icnofacies de *Skolithos*.

III.2.2 Formación Buelna (LCamB)

Definición. Esta unidad fue definida por Cooper *et al.* (1952; 1956) en el Cerro Buelna en el área de Caborca, Sonora, constituida por caliza granular y en menor proporción arenisca calcárea, lutitas, y conglomerados con gran abundancia de fósiles (oncolitos de *Girvanella*, *Salterella*, *Hyolithes* y trilobites), de edad Cámbrico temprano, depositado en una ambiente de plataforma somera.

Litología y espesor. La caliza es arenosa de color gris, y en algunas ocasiones de color verde. La arenisca calcárea se presenta en algunas capas y es de color café oscuro, de grano fino, delgada, pasando a fisil en la parte baja y lutita roja lenticular. La base está constituida por coquinas de *Salterella* sp. y los trilobites *Onchocephalus*, “Antagmus” y *Bonnia*, acumulados aparentemente por acción mecánica (Cooper *et al.*, 1952). En la parte media se encuentran bancos de caliza, formados por abundantes oncolitos de *Girvanella*. La parte superior de la formación está constituida por lutita, arenisca calcárea y caliza en capas delgadas con conglomerados de clastos de caliza, con gran cantidad de trilobites. El espesor de la formación es de 70 metros.

Distribución. Aflora al sureste de la Loma El Chihuarruita.

Relaciones Estratigráficas. Sobreyace de manera concordante a la Formación Proveedora y es sobreyacida concordantemente por la Formación Cerro Prieto.

Edad y correlación. La presencia de *Bristolia* sp. cf. *B. bristolensis*, *Haplophrentis reseei*, *Hyolithes sonora* y *Salterella* sp., indican una edad del Cámbrico temprano (Cuen, 2009). Se correlaciona con la Formación Buelna (Cooper *et al.*, 1956) del área de Caborca, Sonora.

Ambiente. La asociación faunística de esta formación del Paleozoico inferior, sugiere que estos habitaron en aguas someras, abarcando desde aguas tranquilas hasta ambientes de marea.

III.2.3 Formación Cerro Prieto (MCaCP)

Definición. Esta unidad fue definida por Cooper *et al.* (1952) en el área de Caborca, constituida por una caliza negra masiva con algunos horizontes oncolíticos, posiblemente

de *Girvanella* sp. y horizontes oolíticos de edad Cámbrico inferior depositado en ambiente somero de alta energía.

Litología y espesor. En el área de San José de Gracia, Cuen (2012), define a esta unidad como una caliza oolítica masiva de color negra- gris oscuro, distribuida en la parte sureste de la loma El Chihuarruita, formando crestos que sobresalen al terreno. Esta unidad se encuentra dolomitizada con un fuerte intemperismo cárstico.

En muestra de mano las oolitas se observan oxidadas y son de color café-rojizo, con un diámetro aproximado de 0.5 cm, en lámina delgada se observan oolitos recristalizados en cemento. Es posible observar la presencia de cristales de hematita y pirita oxidada. Se clasifican como grainstone (Dunham, 1962) y ooesparita (Folk, 1962). Esta unidad posee un espesor de 17.30 metros.

Distribución. Aflora al sureste de la Loma El Chihuarruita.

Relaciones Estratigráficas. Sobreyace de manera concordante a la Formación Buelna del Cámbrico inferior y es sobreyacida de manera concordante por la Formación El Gavilán del Cámbrico medio

Edad y correlación. Esta unidad no proporciona fósiles, sin embargo por relaciones estratigráficas se considera del Cámbrico inferior (Cooper *et al*, 1956; Lochman in Cooper *et al*, 1956). Se correlaciona con la Formación Cerro Prieto del área de Caborca (Cooper *et al.*, 1956)

Ambiente. Marino somero de alta energía.

III.2.4 Formación El Gavilán (McamG)

Definición. El nombre de esta Formación se deriva del río Gavilán ubicado a 4.5 km aproximadamente al oeste de la loma El Chihuarruita y tiene su área tipo al sureste de El Chihuarruita. La Formación El Gavilán se define como una sucesión compuesta principalmente de lutita de color rojo intercaladas con calizas de color gris. Con abundantes fósiles del Cámbrico medio, se encuentra aflorando en la parte superior de la secuencia cámbrica en San José de Gracia Sonora, litológicamente diferente a la Formación Arrojós en el área de Caborca Sonora (Cuen *et al.*, 2016).

Litología y espesor. La litología predominante es lutita de color rojo intensamente fracturada formando laminaciones menores a 30 cm de espesor, intercalada con caliza de

color gris claro con capas que varían de 30 – 50 cm en menor proporción. Esta unidad posee un espesor de 233 metros, sobreyace concordantemente a la Formación Cerro Prieto y es sobreyacida de manera discordante por rocas volcánicas del Terciario.

Cuen (2012), reporta la presencia de *Peronopsis* sp. cf. *P. bonnerensis*, *Oryctocephalus* sp., *Oryctocephalites walcotti*, *Elrathina antiqua*, *Ogygopsis typicalis*, *Bathyriscus* sp. y *Pagetia* sp., así como escleritos de *Chancelloria eros* y espículas de *Diagoniella* sp. (Cuen *et al.*, 2013). Danzos (2015) reporta la presencia de *Lingulella* sp., *Protreta* sp., *Linnarssonina* sp., *Acrothele* sp., y *Dictyonina* sp. El espesor de esta formación es de 233.70 m.

Distribución: Parte SE de la Loma El Chihuarruita.

Edad y correlación: Debido a la presencia de *Bathyriscus* sp., *Oryctocephalus* sp., *Ehmaniella* sp., *Oryctocara* sp., *Peronopsis* sp., *Peronopsis* sp. cf. *P. bonnerensis*, *Elrathina* sp., se asigna una edad del Cámbrico medio (Cuen *et al.*, 2016). Se correlaciona con la Formación Arrojos del area de Caborca (Cooper *et al.*, 1956).

Ambiente: Se considera que esta formación se depositó en un ambiente marino de agua someras.

III.2.5. Neógeno (Mioceno)

Según el Servicio Geológico Mexicano (2002), el Neógeno inferior está representado por rocas volcánicas, principalmente por andesitas y riolitas (**An- Rh**) que cubren discordantemente las rocas preexistentes.

El Mioceno medio está representado por la Formación Baúcarit (**Cgp**) representado por conglomerado polimíctico y el Mioceno superior representa derrames de andesita, andesita basáltica y basalto, sobreyaciendo discordantemente las unidades anteriores.

III.2.6. Cuaternario (Qoal)

Representado por depósitos de talud y terrazas, constituidas por conglomerados y gravas, el tamaño de los componentes es varia de bloques hasta arcillas del Pleistoceno. A la orilla de los arroyos en el área de estudio, se observa el aluvión compuesto por sedimentos no consolidados, principalmente gravas, arenas y arcillas.

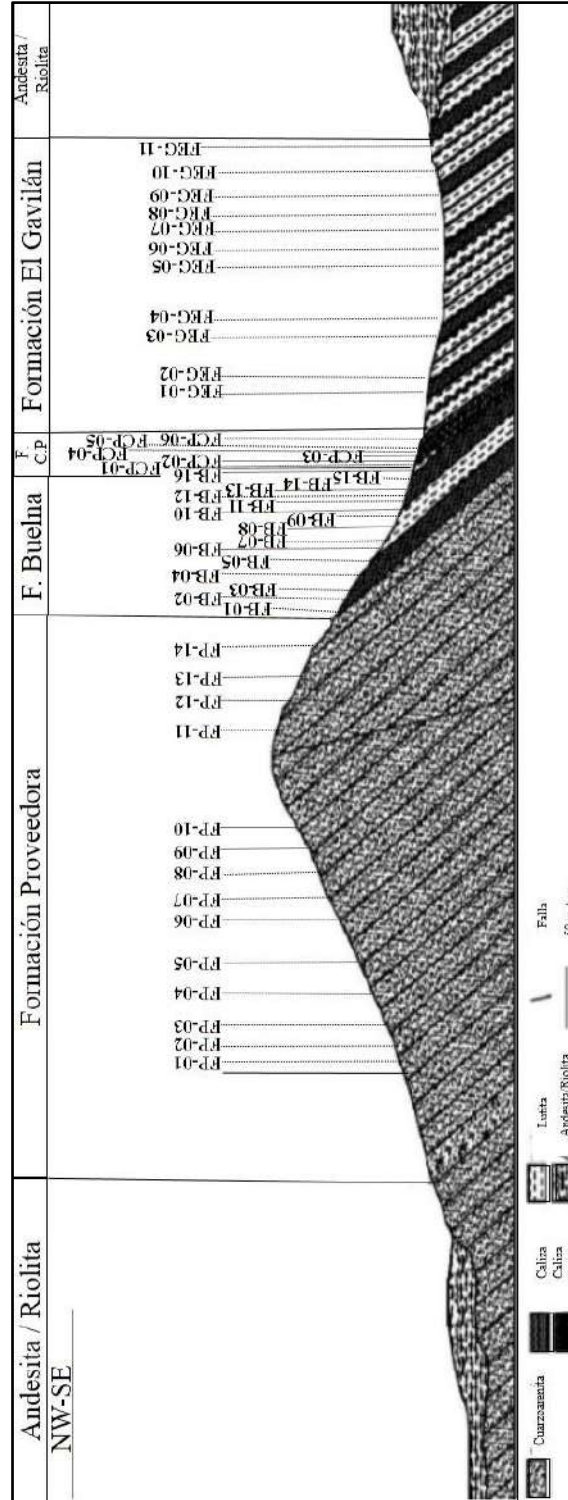
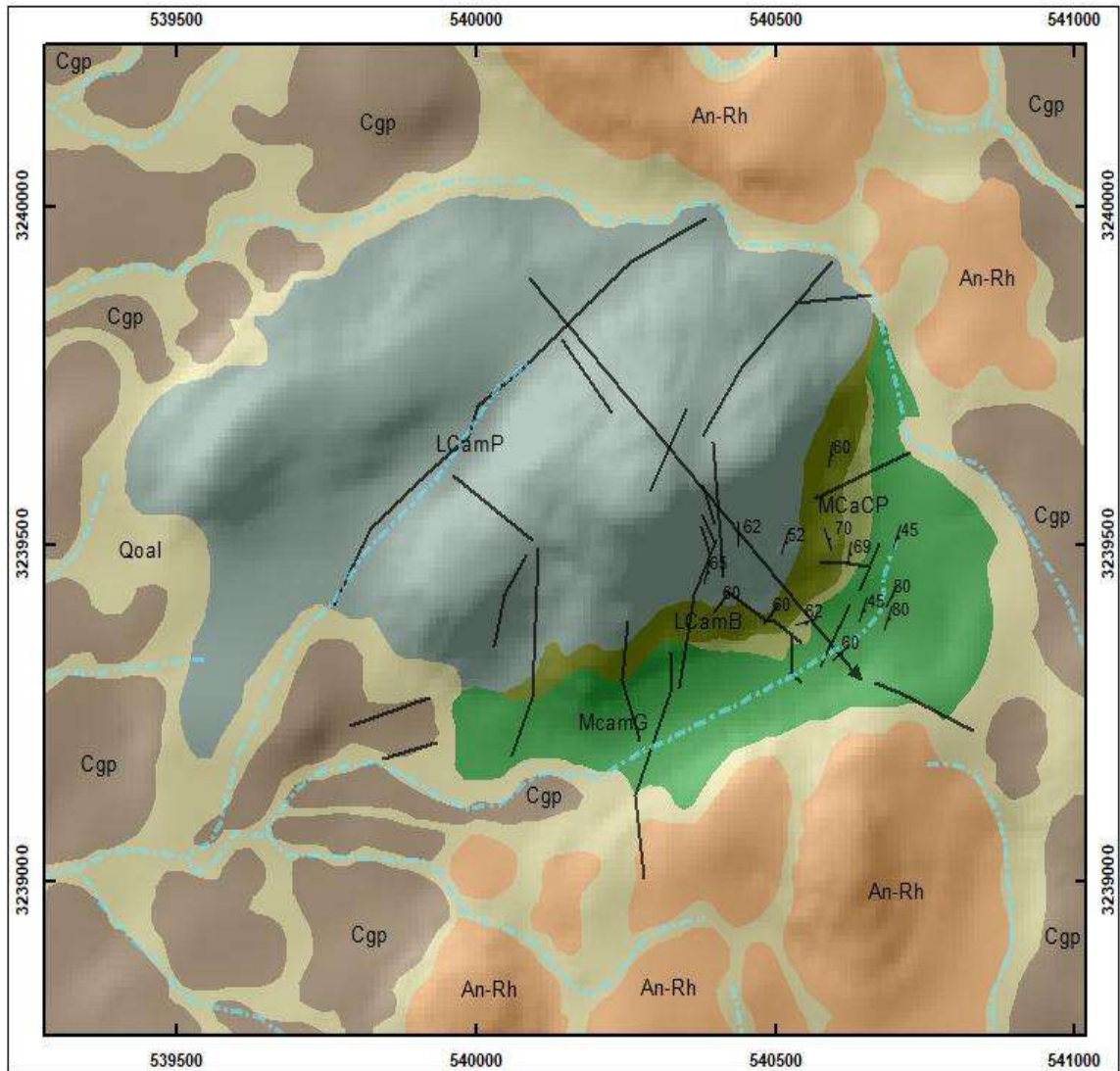


Figura 7.-Perfil esquemático de la sección realizada en el Cerro El Chihuarruita, en dirección NW – SE, modificada de Cuen (2013).

Mapa Geológico Local



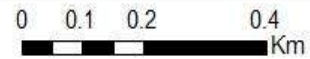
Leyenda

Litología

Qoal	Aluvión
Cgp	Conglomerado
An-Rh	Andesita-Riolita
McamG	Fm. El Gavilán
MCaCP	Fm. Cerro Prieto
LCamB	Fm. Buelna
LCamP	Fm. Proveedora

Simbología

—	Fallas o estructuras
→	Dirección de la sección
↖	Rumbo y echado
---	Hidrología



Universidad de Sonora
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología



Litofacies, microfacies, biota y paleoambiente sedimentario del Cámbrico inferior-medio de una sección marina en San José de Gracia, Sonora, México.

Tesis de licenciatura para obtener el grado de Geólogo

Kareli Acosta G.

Figura 8.- Mapa geológico local, modificado de Cuen (2016).

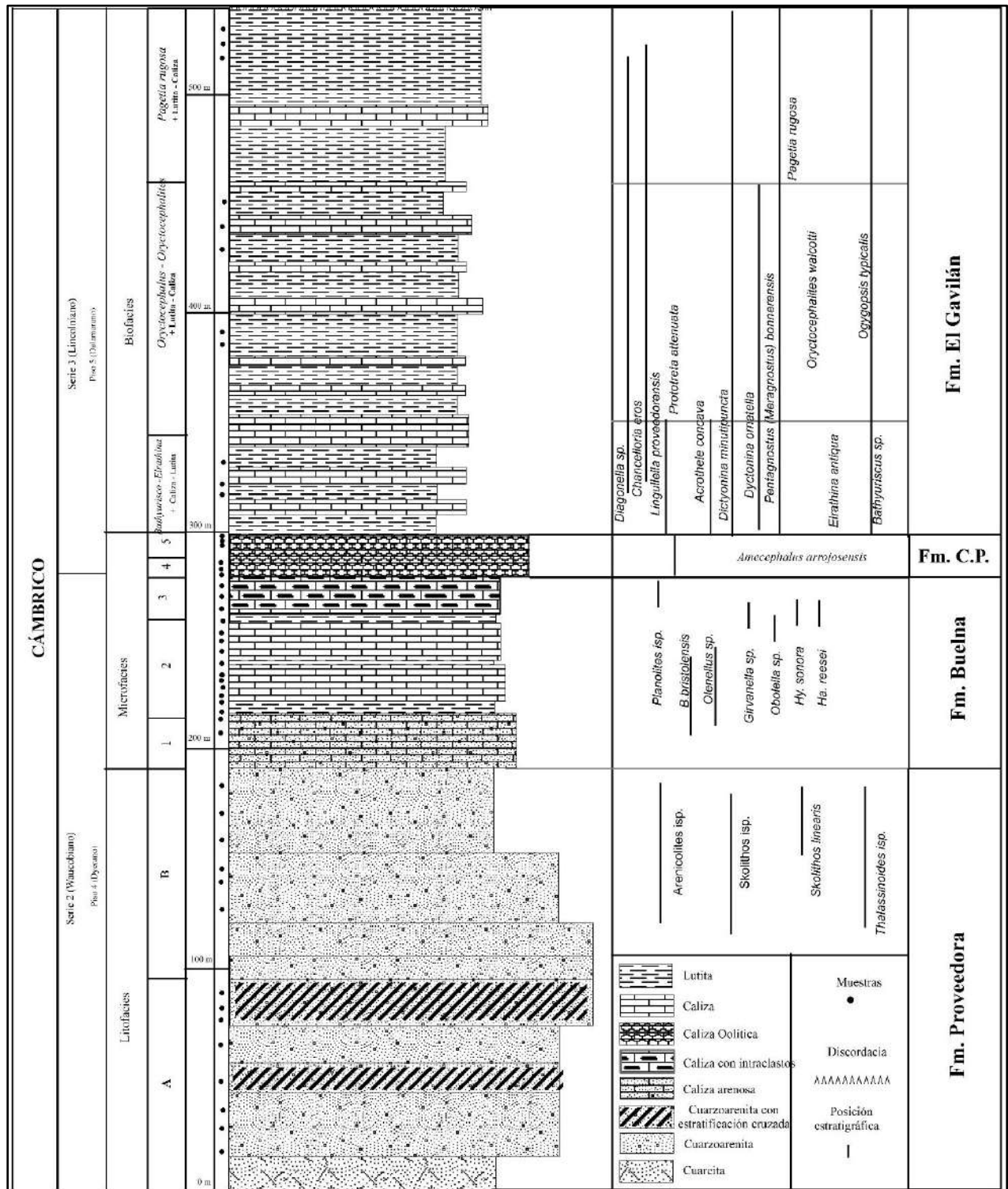


Figura 9.- Columna estratigráfica de la sección realizada, modificada de Cuen (2016).

IV.- Petrología

Para la clasificación de las muestras pertenecientes a las formaciones ya mencionadas se recurrió a diferentes clasificaciones propuestas por los siguientes autores: Para rocas mixtas se utilizó la clasificación de Vatan (1967), para rocas carbonatadas se utilizó la propuesta de Folk (1962), para la determinación textural Dunham (1962) complementando con la propuesta de Embry y Klovan (1972) y para rocas detríticas se usó Pettijohn *et al.* (1973).

Formación Proveedora

Cuarzoarenita

Los clastos son de tamaño menores a 2 mm, de forma angulosa a subangulosa, bien clasificados, presentan un empaquetamiento de grano soportado, el contacto entre los granos es longitudinal, con un cemento (calcita, sintaxial y de óxidos de hierro), se considera texturalmente madura. Sus componente principales son: cuarzo mayor al 95%, feldspatos y fragmentos de rocas < 5%. Según Pettijohn *et al.* (1973) se clasifica como cuarzoarenita. Figura (10 y 11).

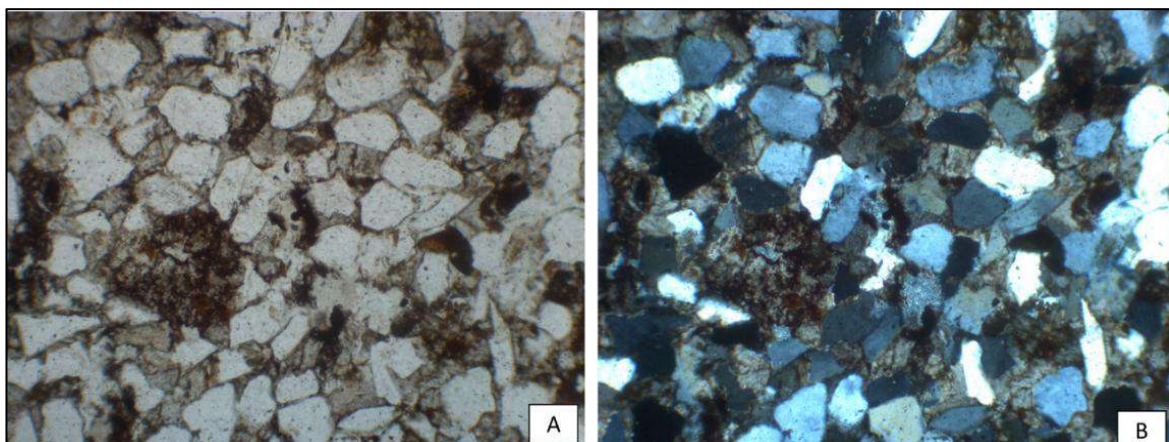


Figura 10.- A) Los granos de cuarzo presentan bordes de óxidos de hierro que enfatizan las formas de los mismo LN; B) Se observan cementos de calcita y cuarzo sintaxial sobre los granos de cuarzo. Los bordes de los granos están muy bien definidos por la presencia de óxidos de hierro NC. 10X.

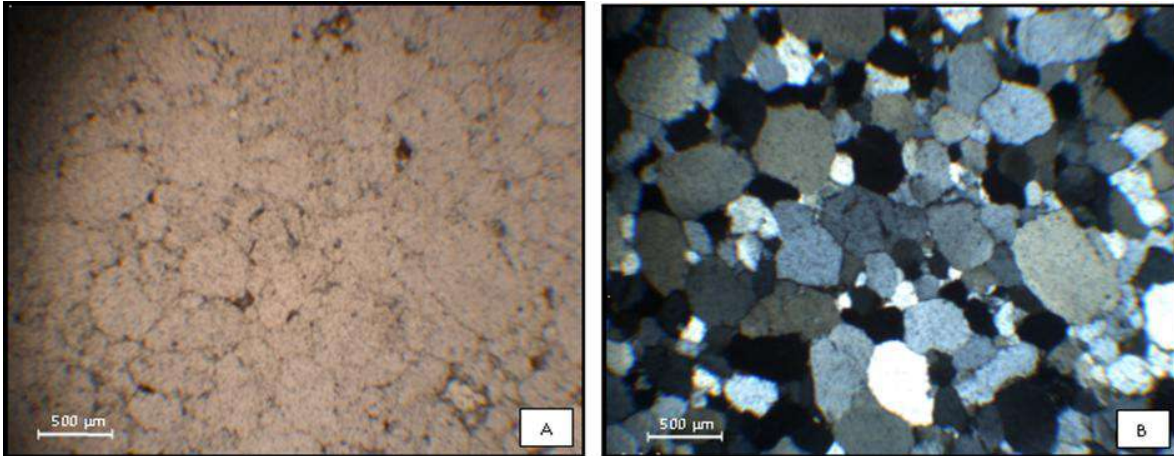


Figura 11.- A) Cuarzo monocristalino, cementante sintaxial de sílice y de óxidos de hierro NC 10x. B) Cemento pelicular que rodea a los granos de cuarzo y minerales opacos (pirita), LN 10x.

Formación Buelna

Para esta formación se analizaron 16 láminas delgadas, las muestras corresponden a micrita fosilífera arenosa, bioesparita y rudstone.

Micrita fosilífera arenosa

Presenta una fábrica soportada por micrita, con tamaño de grano limo arena fina y una clasificación buena a moderada; los ortoquímicos están compuestos en su mayoría por micrita (50-60%) y esparita (15%); los aloquímicos representados principalmente por bioclastos de trilobites (5%). El material terrígeno (28%) compuesto por cuarzo subanguloso de tamaño arena de grano fino y óxidos de Hierro (2%).

Corresponde a las muestras FB-01, FB-02 y FB-03 clasificadas como calizas arenosas según Vatan (1967), biomicrita según Folk (1972) y mudstone según Dunham (1962), (Figura 12).

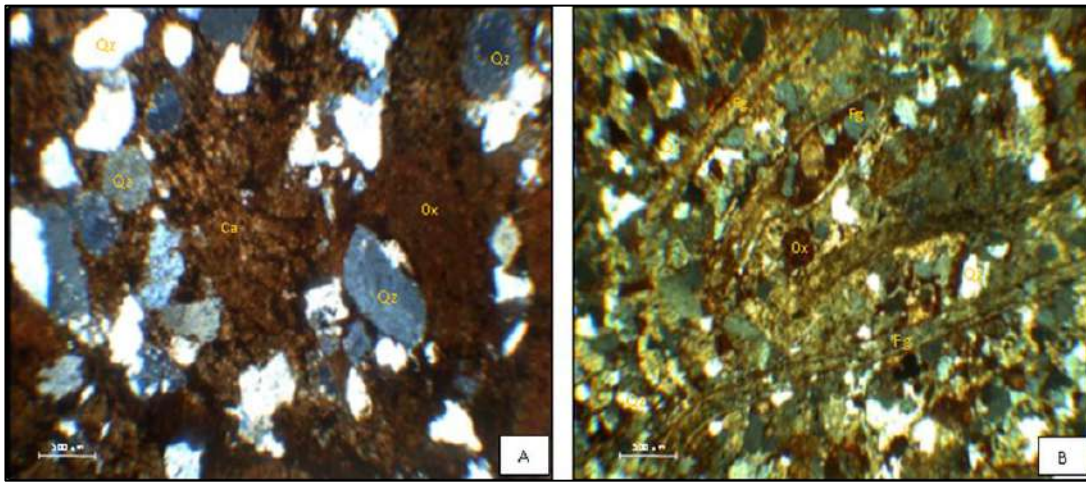


Figura 12.- A) Corresponde a una caliza arenosa con cemento de óxido de hierro y calcita (Ca) 10x NC. B) Caliza arenosa con fragmentos de trilobites (Fg), óxidos de Fe (Ox), aporte detrítico (Qz) en un cemento de calcita recrystalizada 10x NC.

Grainstone / Biomicrita

Presenta una textura grano- soportado, de tamaño de grano fino a grueso y moderadamente clasificado; los ortoquímicos están representados en su mayoría por esparita (40%) y micrita (2%); los aloquímicos están representados por bioclastos de agmatos (20%), hiolítidos (20%), trilobites (10%), y equinodermos (5%) e intraclastos (3%). La mayoría de los bioclastos se encuentran recrystalizados por esparita. Se observa principalmente una cementación tardía de tipo microesparita, ocasionalmente se observan cristales de dolomita y presencia de estilolitas.

Presenta aporte terrígeno representado por cuarzo monocristalino y policristalino de forma subangulosa de grano medio a grueso y óxidos de hierro.

Corresponde a las muestras FB-05, FB-06, FB-07, FB-08, FB-09, FB-10, FB-11, FB-12, FB-13, FB-14, clasificadas en su mayoría como bioesparita (según Folk, 1962), grainstone (según Dunham, 1962) y en ocasiones rudstone (según Embry y Klovan 1972), (Figura 13).

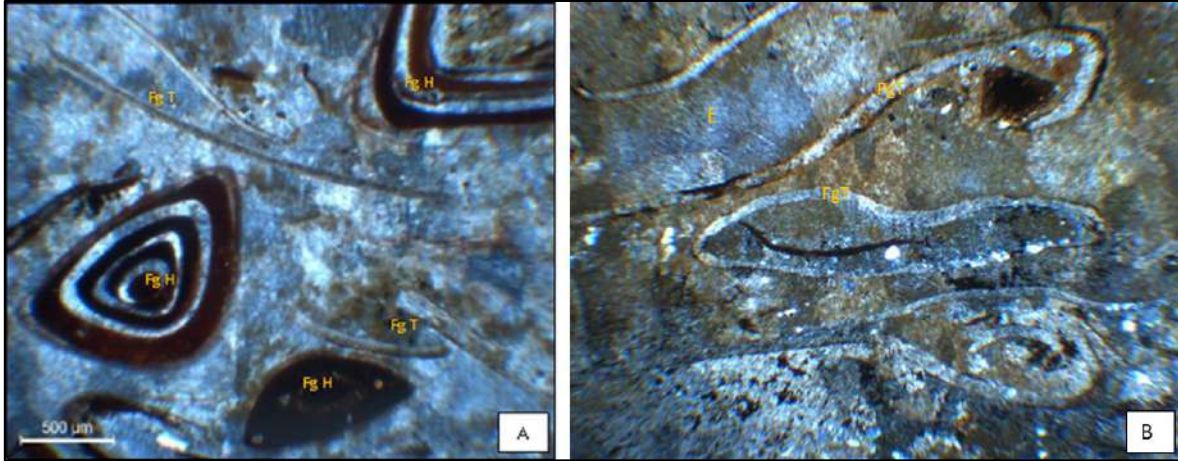


Figura 13.- A) Grainstone con hiolítidos (FgH) y fragmentos de trilobites (Fg T) 10x NC. **B)** Grainstone con cortes de trilobites recristalizados, equinodermos (E) y óxidos de hierro (Ox) 10x NC.

Rudstone

Textura grano-soportada, con clastos de tamaño mayores a 2 mm, con tamaño de grano fino a grueso y moderadamente clasificado; los ortoquímicos están representados en su mayoría por micrita (8 %); los aloquímicos están representados por oncolitos (>90%) y bioclastos de *Girvanella* (2%).

Algunos oncolitos poseen laminaciones concéntricas de 0.2 a 1.0 mm de cuarzos monocristalinos. Se observa y presencia de estilolitas y óxidos de hierro. Corresponde a las muestras FB15 y FB16 clasificadas según Embry y Klovan (1971) como Rudstone (Figura 14).

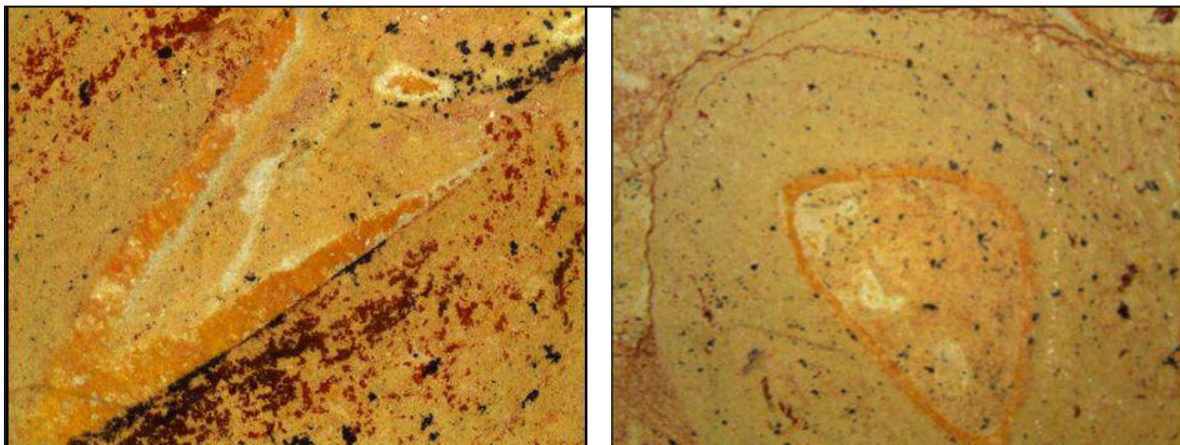


Figura 14.- Oncolito hematizado, tomada microscopio petrológico Leica 8x.

Formación Cerro Prieto

Oomicrita –packstone

Presenta una fábrica de grano soportado con tamaño de grano fino, bien clasificado; los ortoquímicos están representados en su mayoría por micrita (20%) y microseparita (5%), los aloquímicos están representados por oolitas superficiales y normales (83%), ocasionales oncolitos e intraclastos (2%). Las oolitas se presentan micritizadas y/o remplazadas por dolomita o cuarzo, así como también se observa presencia de estilolitas.

Presenta esporádico aporte terrígeno representado por cuarzo monocristalino de forma subangulosa de grano fino y óxidos de hierro. Corresponde a las muestras FCP01, FCP02 y FCP03, clasificadas como oomicrita según Folk (1962) y packstone según Dunham (1962), (Figura 15).

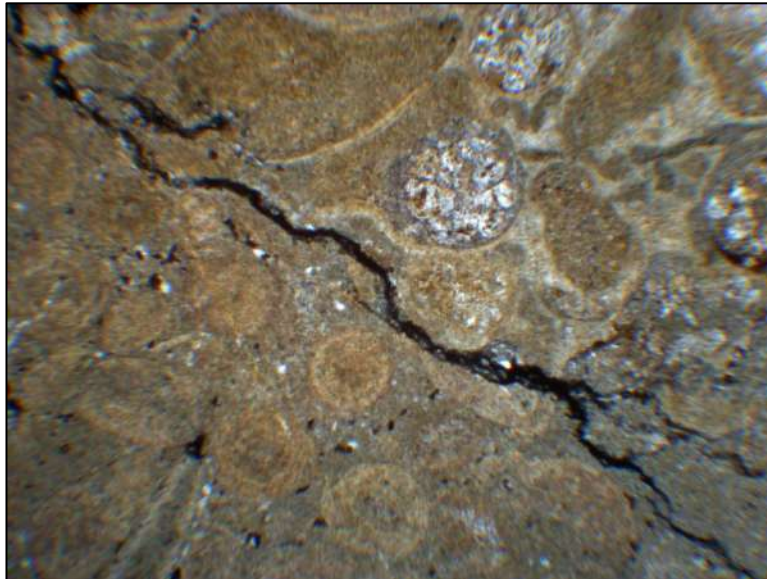


Figura 15.- Oomicrita, Se observa oolíticas superficiales y normales, rellenos de micrita y cristales de cuarzo, en una matriz de micrita y menor proporción cemento de esparita, se observan estilolitas. NC 10x.

Ooesparita - Grainstone

Presenta una fábrica de grano soportado con tamaño de grano fino a grueso y moderadamente clasificado; los ortoquímicos están representados en su mayoría por esparita (40%), los aloquímicos están representados por oolitas (50%), equinodermos (2%), cortes de trilobites(1%), oncolitos (5%) y pellets (2%). La mayoría de las oolitas

encuentran reemplazadas por dolomita. Se observa principalmente una cementación tardía con microsparita y presencia de estilolitas.

Corresponde a las muestras FCP04, FCP05 Y FCP05, clasificadas en su mayoría como ooesparita (según Folk, 1962), grainstone (según Dunham, 1962) y en ocasiones rudstone (según Embry y Klovan, (1972), (Figura 16).

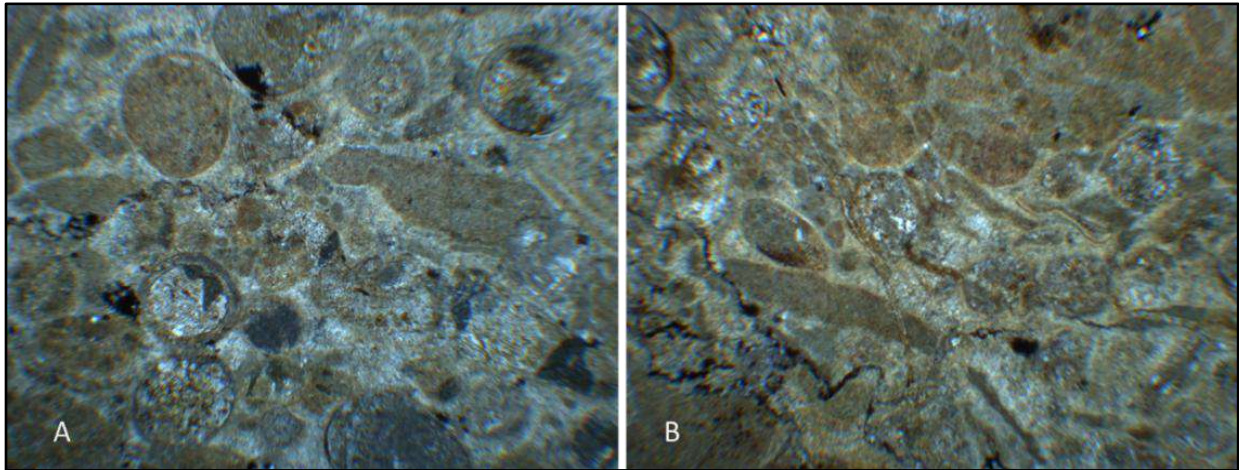


Figura 16.- A) Cemento de microsparita con abundantes oolitas micritizadas, cortes de equinodermos y pellets. B) cemento de microsparita, cortes de oolitas, algunas reemplazadas por cuarzo, agregados de granos, pseudopelets, cortes de trilobites y presencia de estilolitas. NC 10x.

Formación El Gavilán

Para esta formación se analizaron 11 láminas delgadas, las muestras corresponden a wackestone-packestone, lutita calcárea-mudstone y lutita.

Wackestone

Textura de matriz soportada, con tamaño de grano de limo a arena fina, los ortoquímicos están compuestos principalmente por micrita 60%, y aloquímicos 40% representados por trilobites, braquiópodos y espículas de esponja.

Corresponde a las muestras FG01, FG02 y FG03 clasificadas como wackestone (según Dunham, 1964), y biomicrita (según Folk 1964), (Figura 17).



Figura 17.- Wackstone, se presenta con una tonalidad café amarillo, con vetillas rellenas de óxido de hierro, en la parte central se observa una espícula de esponja. NC 4X.

Lutita calcárea –Mudstone

Presenta fabrica matriz soportada, con tamaño de grano limo y arena fina con clasificación buena; los ortoquímicos están compuestos por micrita (25%) y arcilla (45%); los aloquímicos representados principalmente por bioclastos de trilobites (20%), braquiópodos (5%) y espículas de esponja (5%).

Corresponde a las muestras FG04, FG05, FG06 y FG07 clasificadas como lutita calcárea (según Folk, 1974) mudstone (según Dunham, 1962), (Figura 18).



Figura 18.- Lutita calcárea – mudstone, se observa aporte terrígeno y óxido de hierro NC 4X.

Lutita calcárea

Presenta fabrica matriz- soportada, con tamaño de grano limo; los ortoquímicos están compuestos por micrita (10%) y arcilla (60%); los aloquímicos representados principalmente por bioclástos de trilobites (20%), braquiópodos (5%) y espículas de esponja (5%).

Corresponde a las muestras FG08, FG09, FG10 y FG11, clasificadas como lutita calcárea (según Folk, 1974), (Figura 19).

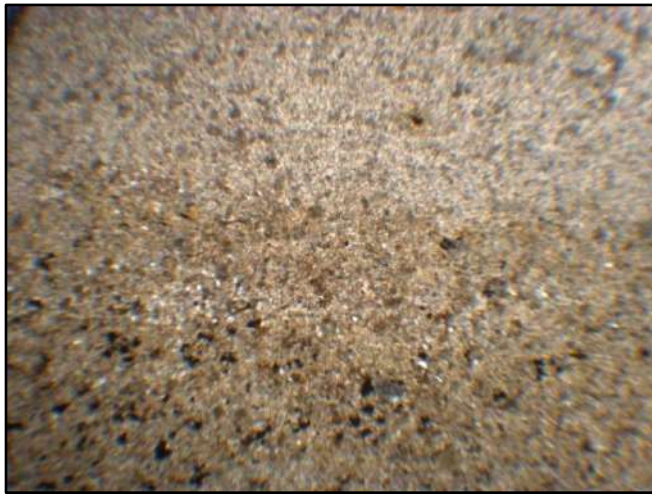


Figura 19.- Lutita con horizonte de óxido de hierro y vetilla de calcita

V.-Análisis de Litofacies, Microfacies y Biofacies

V.1 Introducción

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

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

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

Flügel (2004) y Wilson (1975) han propuesto usar los datos de microfacies carbonatadas para establecer un número restringido de tipos de microfacies principales que sirven como modelos para todas las microfacies carbonatadas, independientemente de las edades de las rocas carbonatadas. Estas microfacies están referidas como Tipos de Microfacies Estándares (SMF); y pueden ser agrupadas dentro de “zonas” de facies, las cuales son usadas luego para construir un modelo deposicional generalizado para las rocas carbonatadas (Figura 20 y Tabla 1).

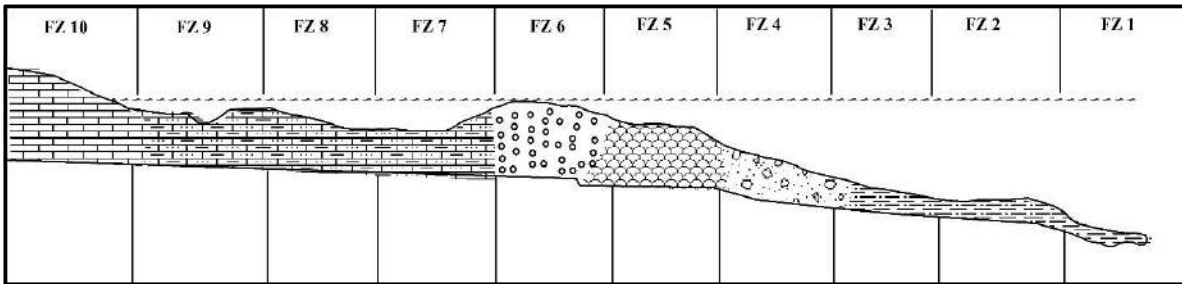


Figura 20.- Microfacies Estándares (SMF) de Wilson (1975).

Flügel (2004) propuso los Tipos de Microfacies de Rampa (RMF) comparables en algunos casos con las SMF de Wilson (1975). Las RMF no poseen el carácter estándar de las SMF, su utilización permite la caracterización de cinturones de facies y superficies de valor estratigráfico, difícilmente reconocibles macroscópicamente en este tipo de ambiente, (Figura 21 y Tabla 2).

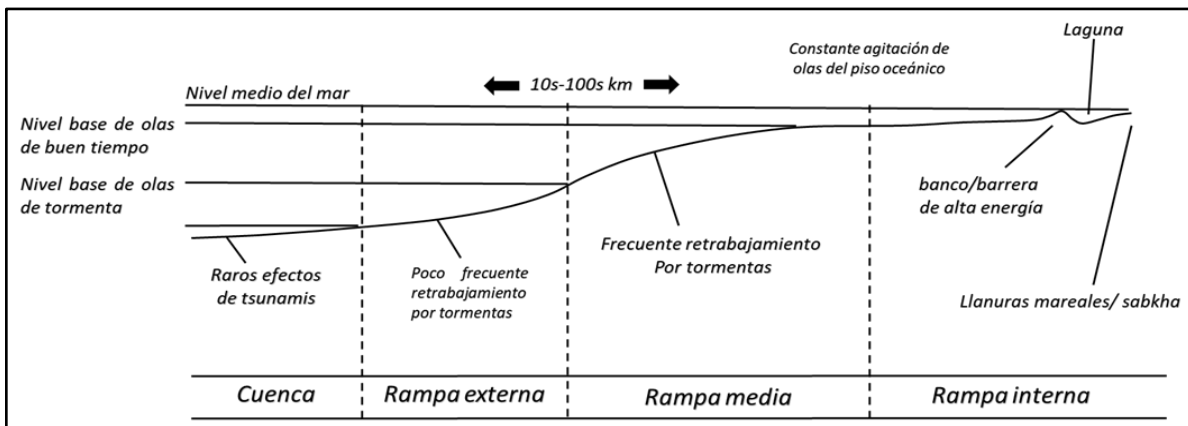


Figura 20.-Modelo propuesto por Flügel (2004) para los tipos de microfacies de rampa RMF

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

Microfacies tipo SMF		
SMF	Nombre	Características
1	Espiculita	Color oscura abundantes organismos, mudstone o wackestone arcilloso, conteniendo espículas, comúnmente orientadas y reemplazadas por calcita.
2	Calcsiltita microbioclástica	Pequeños bioclastos y peloides con una textura grainstone o packstone, ondulitas en escala milimétrica, comúnmente laminados.
3	Mudstone o wackestone pelágico	Matriz de micrita, con granos de arena fina o limo dispersos constituidos por microfósiles pelágicos o megafauna.
4	Microbrecha o packstone bioclástico -litoclástico	Granos desgastados de carácter robusto, originalmente puede consistir en bioclásticos y/o litoclásticos cementados; también puede incluir cuarzo, pedernal, u otros tipos de fragmentos de carbonato; comúnmente gradados.
5	Packstone floatstone o grainstone bioclástico	Constituido principalmente de bioclásticos derivados de organismos que habitan los flancos y la parte superior de los arrecifes; rellenos geopétales o infiltrados por sedimento fino.
6	Rudstone arrecifal	Grandes bioclásticos y organismos de la parte superior y flancos del arrecife. En forma de matriz.
7	Boundstone	Constituidos por organismos sésiles Pueden ser llamados framestone si se constituyen por agregados masivos y de formas robustas, bindstone si están constituidos por incrustaciones lamelares enmarañadas construyendo cavidades y capas incrustadas de micrita, y bafflestone si su composición es de complejos y delicadas masas de micrita.
8	Fósiles completos wackestone	Organismos sésiles inmersos en micrita, el cual contiene algunos bioclásticos dispersos, infauna y epifauna bien preservada.
9	Wackestone bioclástico o micrita bioclástica	Sedimentos micríticos que contiene fragmentos de diversos organismos mezclados y homogenizados por bioturbación; los bioclásticos pueden estar micritizados.
10	Packstone-wackestone con bioclastos desgastados y cubiertos en micrita	Los sedimentos exhiben inversión textural, los granos muestran evidencia de formación en ambientes de alta energía pero contiene matriz lodosa.
11	Grainstone con bioclastos cubiertos por cemento de esparita	Bioclásticos cementados con cemento esparítico; los bioclastos pueden estar micritizados.
12	Coquina, grainstone o rudstone bioclástico	Constituido por un depósito de conchas de ciertos tipos de organismos dominantes, carece de matriz lodosa.
13	Grainstone bioesparítico con oncoides	Constituido principalmente por oncoides en un cemento esparítico
14	Lags	Partículas cubiertas y desgastadas; puede incluir ooides y peloides que son ennegrecidos y manchados de hierro; con fosfatos; también puede incluir litoclásticos alóctonos.
15	Grainstone de ooides	Ooides bien formados y clasificados de tamaño que va de 0.5 a 1.5 mm fábrica empaquetada; con estratificación cruzada.
16	Pelsparita o grainstone peloidal	Probablemente pellets fecales; pueden ser mezclados con ostrácodos o foraminíferos; puede contener láminas gruesas gradadas y una fábrica fenestral.

17	Grainstone o grapestone pelsparítico	Mezclas de facies de peloides aislados, peloides aglutinados y granos agregados (grapestones y lumps); puede incluir algunos granos recubiertos.
18	Grainstone de foraminíferos o algas	Consiste en concentraciones comúnmente mezcladas con peloides.
19	Loferita	Laminada a bioturbada, mudstone o wackestone peleteado; puede gradar a pelsparita con fábrica fenestral; la asociación de ostrácodos y peloides es común en mudstone; también puede incluir micrita con foraminíferos, gasterópodos y algas.
20	Mudstone de estromatolitos de algas	Estromatolitos.
21	Espongiostroma	Fábrica de algas ramificadas en sedimento fino (limo-lodo).
22	Micrita con oncoides grandes	Wackestone o floatstone que contienen oncoides.
23	Micrita pura homogénea sin fósiles y sin laminación	Micrita; puede contener cristales de minerales evaporíticos.
24	Rudstone o floatstone con litoclastos gruesos y/o bioclásticos	Clastos comúnmente constituidos de micrita o calcilitas sin fósiles, y puede tener un arreglo imbricado, estratificación cruzada, los estratos; matriz esparcida.
25	Mudstone evaporítico-carbonatado laminado	Alternancia de carbonato cristalino fino (caliza, dolomita), estratos diagenéticamente deformados con cristales de evaporita (yeso).
26	Rudstone y packstone con pisoides	Acumulaciones de pisoides autóctonos y alóctonos, con variedad de formas, tamaños de milímetros a centímetros, densamente empaquetados, comúnmente cementados por cementos meteóricos. Los núcleos de los pisoides son usualmente pisoides rotos o cortezas de cemento.

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

Microfacies tipo RMF			
RMF	NOMBRE	TIPO DE RAMPA	CARACTERÍSTICAS
1	Calcilutita y <i>Mudstone</i> con peloides	Externa	Fragmentos esqueléticos muy finos, espículas de esponjas.
2	<i>Mudstone</i> y <i>Wackestone</i> arcilloso con bioturbación	Externa	Pocos foraminíferos aglutinados, ostrácodos y equinodermos.
3	<i>Wackestone</i> y <i>Packstone</i> bioclástico con bioturbación	Externa	Diversos y abundantes fósiles (bivalvos, braquiópodos y equinodermos) y peloides; granos esqueléticos no desgastados.
4	<i>Wackestone</i> y <i>Packstone</i> peloidal	Externa	Consiste de pequeños peloides, pequeños litoclastos y bioclastos.
5	<i>Mudstone</i> pelágico	Externa	Contiene microfósiles planctónicos y fósiles neotónicos de mar abierto (ej: ammonites)
6	<i>Grainstone</i> peloidal y bioclástico	Externa	Gradado, laminado y con estratificación cruzada fina (tempestitas).
7	<i>Packstone</i> bioclástico	Media	Abundantes equinodermos, bivalvos y foraminíferos; granos esqueléticos
8	<i>Packstone</i> y <i>Wackestone</i> con bioturbación	Media	Contiene varios granos esqueléticos, intraclastos, oncoides y peloides.
9	<i>Wackestone</i> , <i>Packstone</i> y <i>Floatstone</i> con bioclastos e intraclastos	Media	Con intraclastos micríticos y bioclastos derivados de rampa, puede contener algunas microbrechas.
10	Conglomerados de caliza	Media	Rampa distalmente empinada (<i>rampa distalmente empinada</i>)
11	Margas con intraclastos y guijarros de caliza	Media	Rampa distalmente empinada (<i>rampa distalmente empinada</i>)
12	<i>Boundstone</i> con corales	Media	Contiene <i>Framestones</i> de corales y algas rojas.
13	<i>Wackestone</i> y <i>Packstone</i> bioclástico con foraminíferos	Interna	Con abundantes foraminíferos grandes (ej: orbitolínidos)
14	<i>Wackestone</i> y <i>Packstone</i> bioclástico con granos esqueléticos	Interna	Con granos esqueléticos, varios intraclastos y algunos ooides (<i>near-shoal</i>)
15	<i>Floatstone</i> bioclástico	Interna	Con diversos materiales derivados de arrecifes, (cerca de arrecifes, corales, algas o fragmentos de bivalvos)
16	<i>Mudstone</i> , <i>Wackestone</i> o <i>Packstone</i> con foraminífero	Interna	Con abundantes foraminíferos miliólidos
17	<i>Wackestone</i> bioclástico con algas	Interna	Con algas verdes dasycladáceas
18	<i>Wackestone</i> bioclástico con ostrácodos	Interna	
19	Caliza o <i>Mudstone</i> no bioturbado	Interna	
20	<i>Wackestone</i> y <i>Packstone</i> bioclástico con algas calcáreas	Interna	Con foraminíferos bentónicos.
21	<i>Packstone</i> y <i>Floatstone</i> con oncoides	Interna	Oncoides aglutinados, con granos esqueléticos, sedimentarios y cuarzo terrígeno.
22	Caliza o <i>Mudstone</i> dolomítico	Interna	Micrita finamente laminada; con escasos fósiles de ostrácodos y foraminíferos.
23	<i>Bindstone</i> Fenestral	Interna	Fábrica de algas ramificadas en sedimento fino limo-lodo.

24	<i>Mudstone</i> y <i>Packstone</i> intraclastos	Interna	
25	<i>Bindstone</i> con láminas de evaporitas y carbonatos	Interna	Contiene cristales evaporíticos (yeso).
26	<i>Grainstone</i> y <i>Packstone</i> bioclástico de grano medio a grueso	Interna	Contiene varios granos esqueléticos bentónicos.
27	<i>Grainstone</i> y <i>Packstone</i> bioclástico	Interna	Compuesto de pocos granos esqueléticos dominantes
228	<i>Floatstone</i> y <i>Rudstone</i> bioclástico	Interna	Exhibe una fábrica altamente desordenada.
29	<i>Grainstone</i> con ooides	Interna	Presenta ooides concéntricos densamente empaquetados.
30	<i>Grainstone</i> y <i>Packstone</i> con ooides y conchas	Interna	Presenta abundantes fragmentos de conchas.

El término biofacies se refiere a todas las características biológicas del cuerpo rocoso (Moore 1949), para el presente trabajo ha sido utilizado en dos diferentes maneras: en un sentido estratigráfico refiriéndose a un cuerpo de roca, el cual se caracteriza por el contenido fósil que lo distingue de las partes contiguas de la roca, y en un sentido ecológico para hacer referencia a la biota que caracterizan una parte o el cuerpo rocoso.

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

V.2. Litofacies

V.2.1 Formación Proveedora

V.2.1.1 Litofacies A.

Esta litofacies está caracterizada por capas de areniscas con estratificación laminar y cruzada con tonalidades que varía de guinda, a rosa y a café rojizo. Los clastos son de tamaños menores a 2 mm (grano fino a medio), de forma subangulosa a subredondeados, bien clasificados, granos soportados, presentan cementante sintaxial de sílice y de óxidos de fierro, y se considera texturalmente madura. Los componentes principales son cuarzo mayor al 95%, fragmentos de rocas (cuarzo policristalino y microcristalino) menor al 5%. En las imágenes de láminas delgadas se identificaron trazas de trilobites.

El ambiente de formación es línea de costa (intermarea -infra mareal, (Figura 22).

V.2.1.2 Litofacie B.

Está compuesta por cuarzoarenitas de color blanco rosado, de forma masiva en estratos gruesos a muy gruesos, abundante fracturamiento y bioturbación, los clastos de tamaño menores a 2 mm (medio a grueso), de forma subangulosa a subredondeados, bien clasificados, granos soportados, presentan cementante sintaxial y pelicular, se considera texturalmente madura. Los componentes principales son cuarzo mayor al 95%, fragmentos de rocas (cuarzo policristalino y microcristalino) menor al 5%. Esta litofacies es característica por contener una gran abundancia de icnofósiles (*Skolithos* isp., *Planolites* isp., *Thalassinoides* isp., *Arenicolites* isp., *Palaeophycus* isp., *Diplocraterion* isp., *Monocraterium* isp.).

El alto contenido de bioturbación e icnofósiles indican un ambiente marino somero, intermarea - submarea, probablemente de la icnofacies de *Skolithos* (Figura 23).

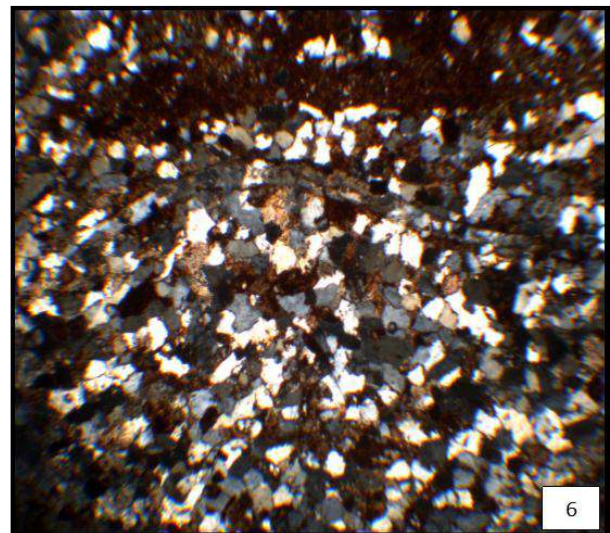
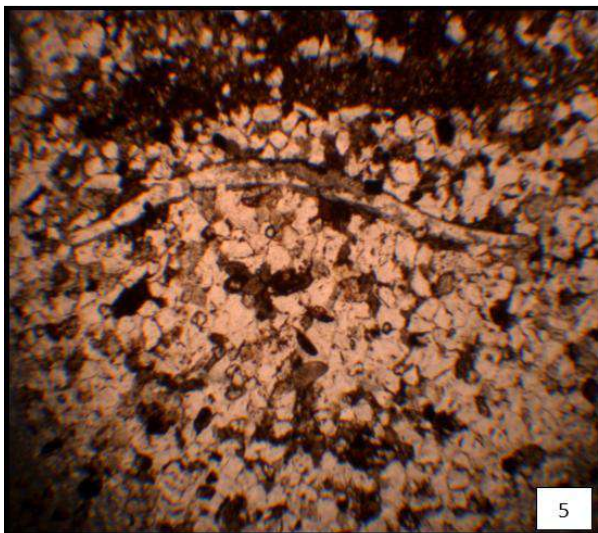
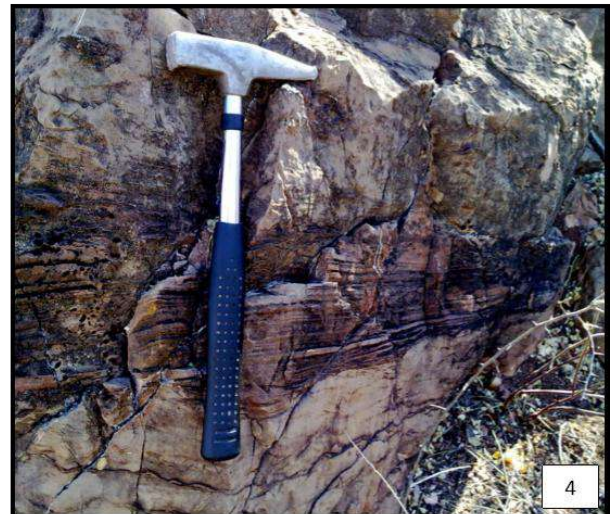


Figura 21.-Fotografías de la biofacies A, donde en la foto 1 y 2 se observa estratificación cruzada, fotos 3 y 4, estratificación laminar y fotos 5 y 6 Láminas delgadas de cuarzoarenita, con cementante de óxido de hierro, y cortes de trilobites, tomadas LN y NC.

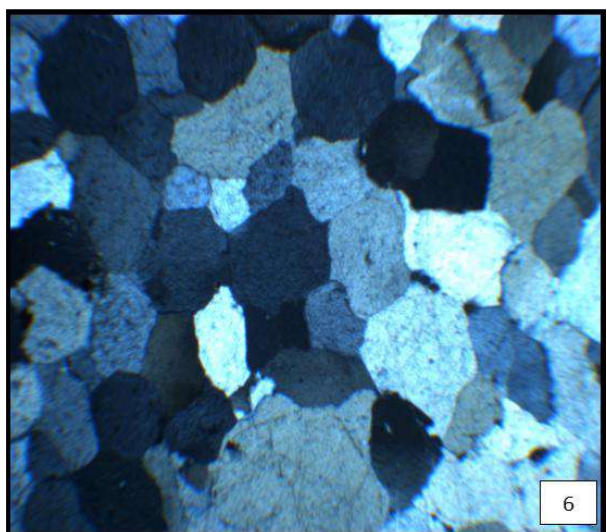
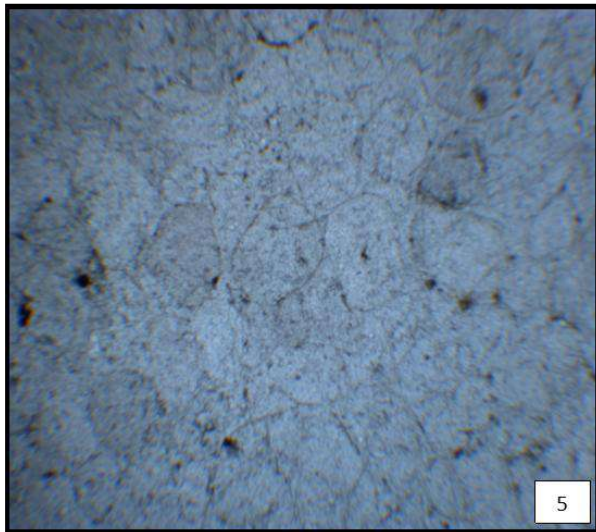
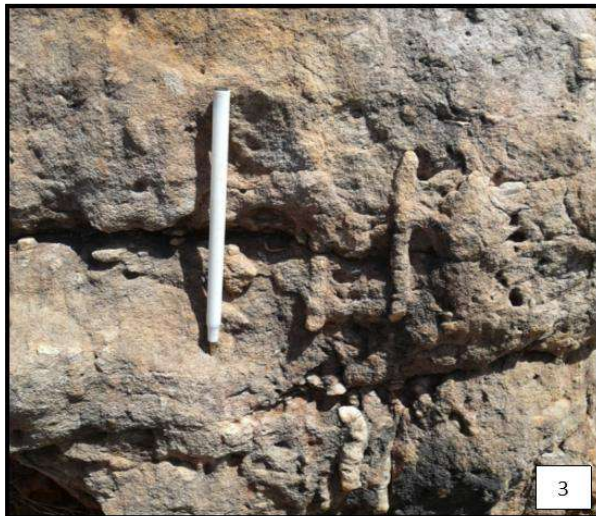
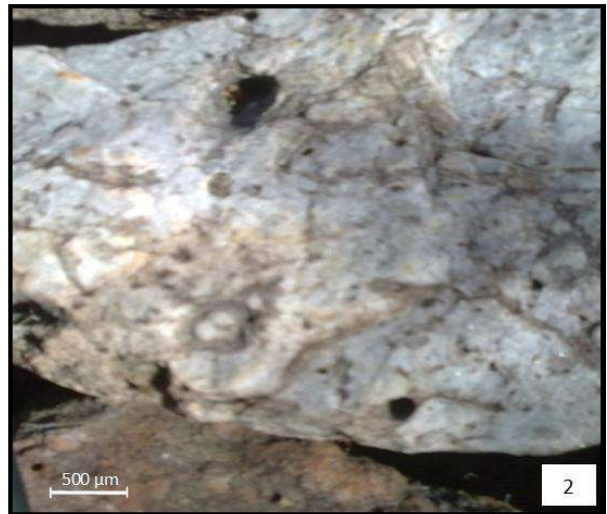


Figura 22.-Fotografías de la biofacies B, 1) *Thalassinoide* isp, 2) *Monocraterion* isp., 3) *Skolithos* isp., 4) *Diplocraterion* isp., 5 y 6) Láminas delgadas de cuarzoarenita, con cementante syntaxial y pelicular, tomadas LN y NC.

V.3. Microfacies

Se realizó el análisis de microfacies de 22 láminas delgadas, correspondientes a las 16 muestras de la Formación Buelna, y 6 para Formación Cerro Prieto. En la cual se obtuvieron 5 tipos de microfacies basadas en la caracterización litológica y el agrupamiento de diferentes fósiles (agmatos, hiolítidos, trilobites, braquiópodos, equinodermos, espículas de esponja, oolitas y algas oncolíticas).

V.3.1 Formación Buelna

En la Formación Buelna se identificaron tres microfacies: facies mixtas, grainstone con intraclastos y rudstone oncolítico.

V. 3.1.1 Facies mixtas

Microfacies 1 (MF1): Caliza arenosa

Está constituida por fragmentos de trilobites con abundante material terrígeno cuarzo (monocristalino y policristalino) y óxidos de fierro en una matriz de micrita. Algunos fragmentos de trilobites se encuentran silificados y otros recristalizados, (Tabla 3, Figura 24).

Esta microfacies es similar al tipo SMF 10 y un tipo RMF 26 desarrollada en una rampa interna de acuerdo al modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye bioclastos desgastados y cubiertos en micrita y se asocia a un ambiente lagunar de circulación abierta Zona de Facies 7, según el modelo propuesto por Wilson, (1975).

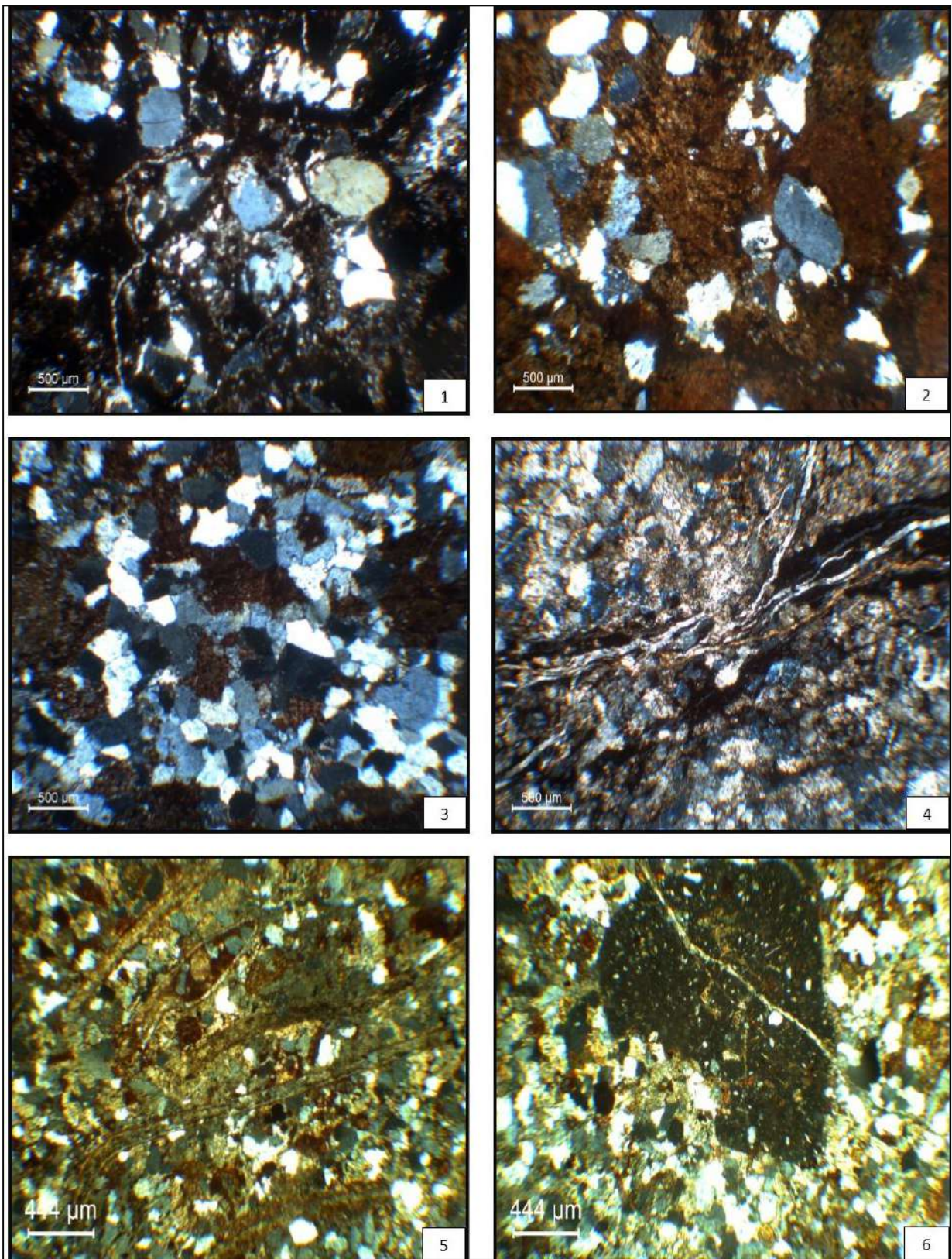


Figura 23.- 1, 2,3 y 4) Imágenes correspondientes a caliza arenosa con cemento de óxido de hierro y calcita (lente de 10x NC), 5 y 6) caliza arenosa con fragmentos de trilobites, óxidos de Fe, aporte detrítico (cuarzo) en un cemento de calcita recristalizada (lente de 10x NC).

V. 3.1.2 Facies de carbonatados

Microfacies 2 (MF2): Grainstone con intraclastos

Está constituida por agmatos, trilobites, Hiolítidos, equinodermos, fragmentos de algas oncolíticas, intraclastos y fragmentos de roca, con poco material terrígeno y óxidos de hierro en un cemento esparítico. Algunos fragmentos de trilobites se encuentran silicificados y otros recristalizados.

Esta microfacies es similar al tipo SMF 12 y un tipo RMF 7 desarrollada en una rampa media de acuerdo al modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye depósitos de organismos dominantes, carece de una matriz lodosa y se asocia a un ambiente de margen de plataforma de arrecifes, Zona de Facies 5, según el modelo propuesto por Wilson, (1975).

Esta microfacies está presente en las láminas FB-05, FB-06, FB-07, FB-08, FB-09, FB-10, FB-11, FB-12, FB-13, FB-14, (Tabla 3, Figura 25).

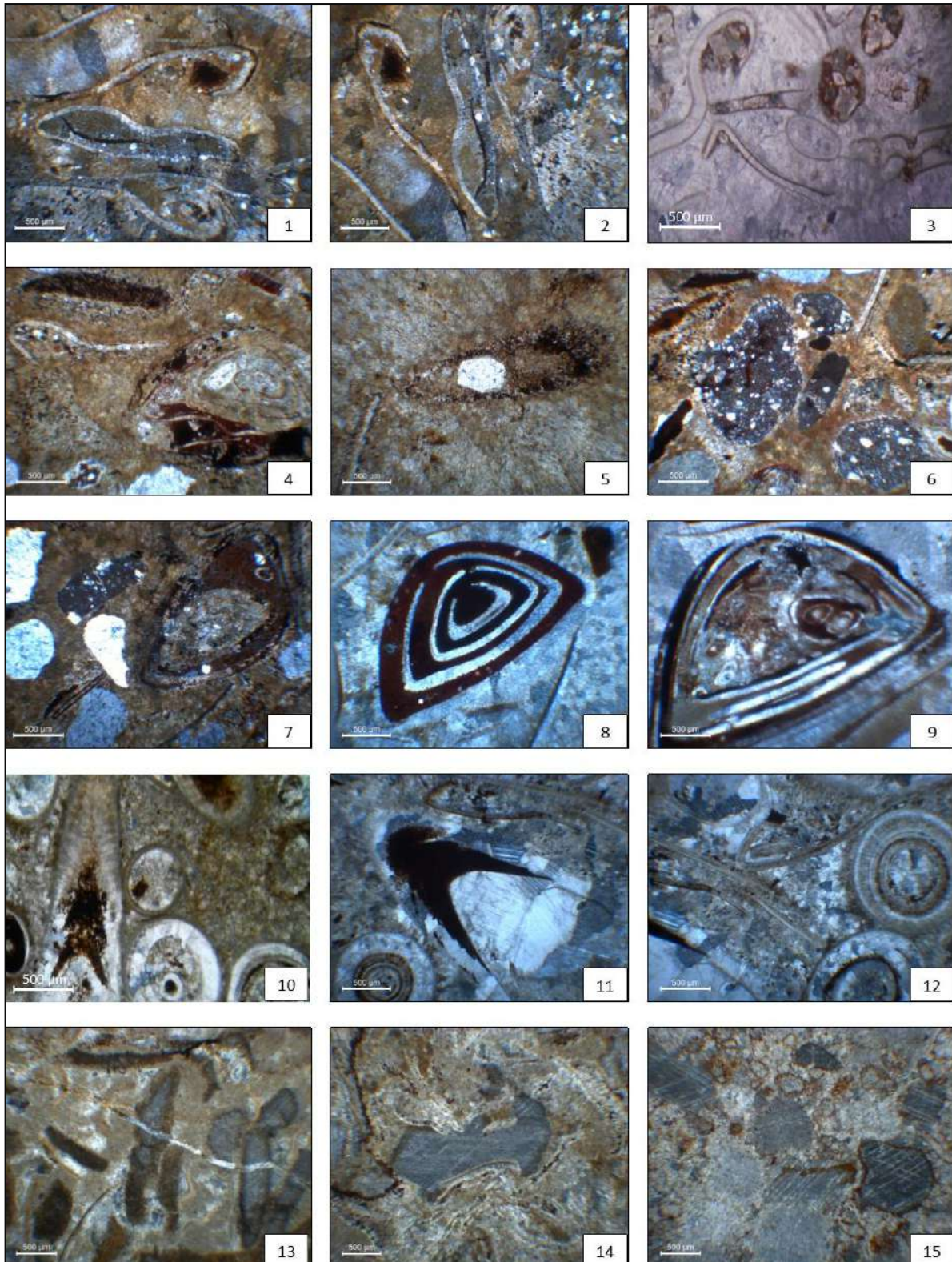


Figura 24.-1, 2) Cortes de trilobites en una matriz de micrita (lente de 4x, NC), 3) cortes de trilobites con un cementante de esparita (lente de 4x, NC), 4) cortes de trilobites y hyolithes altamente desgastados en una matriz de micrita (lente de 4x, NC), 5) granos de cuarzo encima de un corte de *Hyolithes* erosionado (lente de 4x, NC), 6, 7) fragmentos de roca y cortes esqueletales muy erosionados (lente de 4x, NC), 8, 9) cortes de *Hyolithes* y trilobites con un cementante de esparita (lente de 4x, NC), 10, 11, y 12) cortes de *Salterella* y trilobites con aporte de esparita (lente de 4x, NC), 13, 14 y 15) cortes de equinodermos en una matriz de micrita con aporte terrigeno, (lente de 4x, NC).

V. 3.1.3 Microfacies 3 (MF3): Rudstone oncolítico

Se compone de algas oncolíticas que van de 1 cm hasta 3 cm con abundante presencia de equinodermos (*Gogia*) en un matriz recristalizada por esparita. Algunas algas están micritizadas y las placas de equinodermos sustituidas por óxidos de hierro.

Esta microfacies es similar al tipo SMF 13 y un tipo RMF 8 desarrollada en una rampa media de acuerdo al modelo propuesto por Flügel (2004) asociada a un ambiente plataforma retrabajada Zona de facies 6, según el modelo propuesto por Wilson, (1975). Esta microfacies está presente en las láminas FB 15 y FB 16, (Tabla 3, Figura 26).

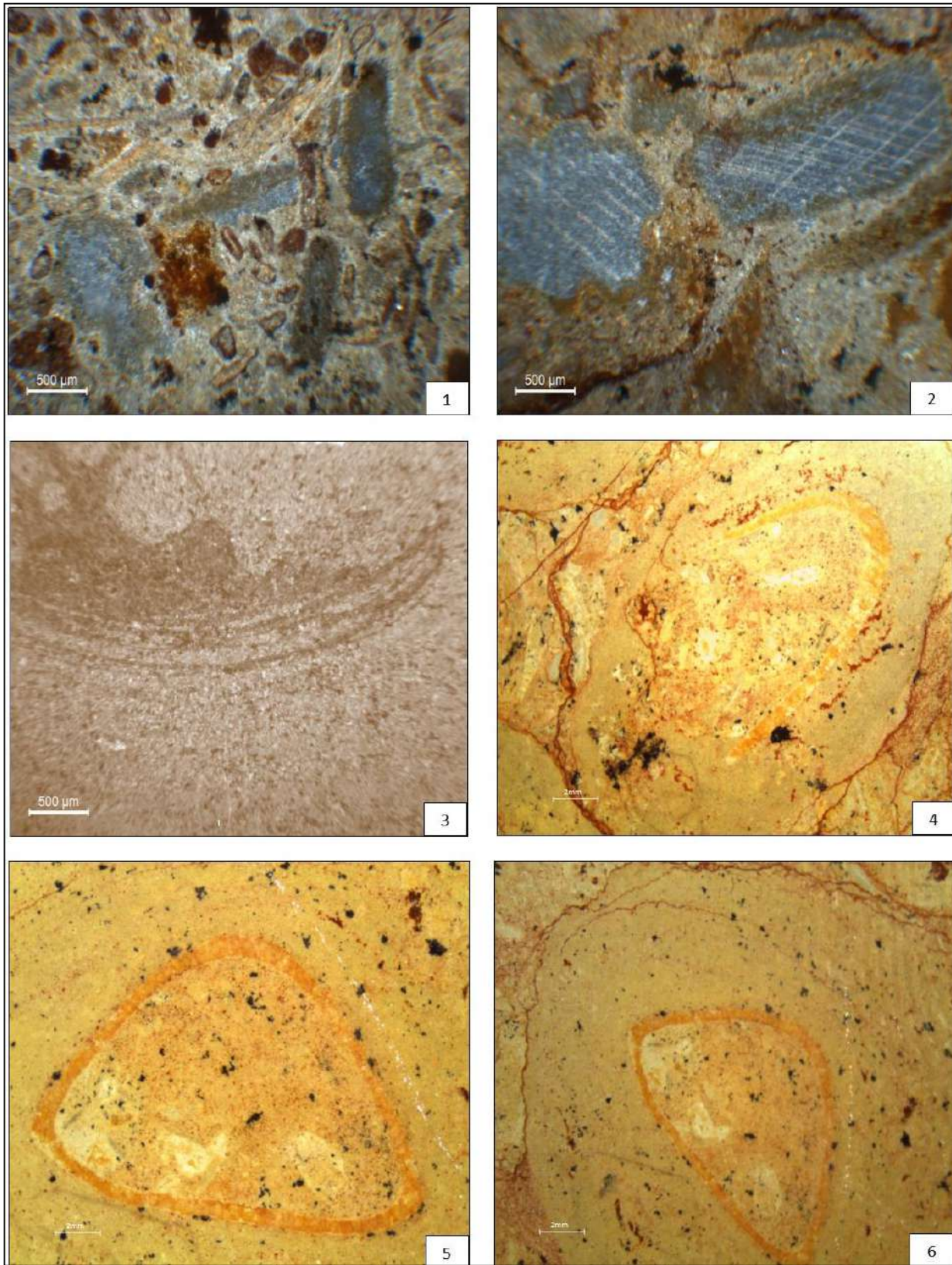


Figura 25.- 1) Cortes de equinodermos y trilobites, aporte terrígeno de formas aglutinadas (lente de 4x, NC), 2 cortes de equinodermos (identificados como *Gogia*) en una matriz de micrita. 3) caliza arenosa (lente de 4x, NC), 4, 5, y 6) cortes de oncolitos en una matriz de micrita, aporte de óxidos (lente de 4x, NC).

Tabla 3. Microfacies de la Formación Buelna. Abundancia de los componentes: ✓ Presencia,

FORMACIÓN BUELNA																		
Unidad de Microfacies SJ		FB-01	FB-02	FB-03	FB-04	FB-05	FB-06	FB-07	FB-08	FB-09	FB-10	FB-11	FB-12	FB-13	FB-14	FB-15	FB-16	
Numero de muestra																		
Textura	Mudstone																	
	Wackstone																	
	Floatstone																	
	Packstone											✓						
	Grainstone				✓	✓	✓				✓		✓	✓	✓			
	Rudstone							✓	✓	✓						✓	✓	
	Framestone																	
Dolomita							✓											
Siliciclásticos		✓	✓	✓	✓													
Aloquímicos	Intraclastos					✓	✓	✓	✓									
	Cortoides																	
	Oolitas																	
	Pelets																	
	Trilobites				A	A	A	S	R	T	T	A	S	S		T		
	Anélidos																	
	Equinodermos										S	A	A	A	A	A		
	Braquiópodos																	
	Esponjas																	
	Salterella							T	S	A	T							
	Hiolítidos							A	A		T							
	Algas Oncolíticas										T					T		
	Otros																	
Partículas de terrígenas		A	A	A	T	T	R	T	T					T				
Diagénesis	Cementante Temprano "A"											✓						
	Cementante Tardío "B"				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			
	Neomorfismo	Coalescivo																
		Inversión																
		Recristalización								✓	✓						✓	
	Estilolitas								✓	✓	✓		✓					
	Porosidad																	
	Dolomitización																	
	Dedolomitización																	
	Silicificación				✓	✓	✓	✓			✓							
	Minerales autígenicos				✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓					
Otros																		

A Abundantes, F Frecuentes, S Escasos, R Raros, T Trazas.

V.3.2. Formación Cerro Prieto.

En la Formación Cerro Prieto se reconocieron dos microfacies: Packstone y Grainstone.

V.3.2.1 Microfacies 4 (MF4): Packstone

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

Esta microfacies es similar al tipo SMF 10 y un tipo RMF 21 desarrollada en una rampa interna de acuerdo al modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye oolitas lo que indica que su depósito se efectuó en un ambiente de alta energía pero contiene matriz lodosa y se asocia a un ambiente de plataforma abierta laguna Zona de facies 7, según el modelo propuesto por Wilson, (1975. Esta microfacies está presente en las láminas FCP-01, FCP-02 y FCP- 03 (A, B, C, D, E, F), (Tabla 4, Figura 27 y 28).

V.3.2.2 Microfacies 5 (MF5): Grainstone

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

Esta microfacies es similar al tipo SMF 15 y un tipo RMF 27 desarrollada en una rampa interna de acuerdo al modelo propuesto por Flügel (2004), la cual incluye grainstone de ooides recritalizados bien seleccionados y bien formados y se asocia a un ambiente de borde de plataforma donde hay buena circulación de agua lo que indica que su depósito se efectuó en un ambiente de alta energía de Zona 6 según el modelo propuesto por Wilson,

(1975).Esta microfacies está presente en las láminas FCP-04, FCP-05 y FCP-06, (Tabla 4, Figuras 27 y 29).

Tabla 4.- Microfacies de la Formación Cerro Prieto. Abundancia de los componentes: ✓ Presencia,

Datos de microfacies de: Cerro El Chihuarruita (San José de Gracia, Sonora)								
FORMACIÓN CERRO PRIETO								
Unidad de microfacies SJ								
Numero de muestra		FCP-01	FCP-02	FCP-03	FCP-04	FCP-05	FCP-06	
Textura	Mudstone							
	Wackstone							
	Floatstone							
	Packstone	✓	✓					
	Grainstone			✓	✓	✓	✓	
	Rudstone							
	Framestone							
Dolomita								
Siliciclásticos								
Aloquímicos	Intraclastos							
	Cortoides							
	Oolitas	A	A	F	A	A	A	
	Pelets							
	Trilobites	R	T					
	Anélidos							
	Equinodermos	T	R	R	R	R	S	
	Braquiópodos							
	Espojas							
	Salterella							
	Hiolítidos							
	Algas Oncolíticas							
	Otros				✓			
Partículas de terrígenas								
Diagénesis	Cementante Temprano "A"	✓	✓	✓	✓		✓	
	Cementante Tardío "B"					✓		
	Neomorfismo	Coalescivo						
		Inversión						
		Recristalización			✓		✓	
	Estilolitas	✓	✓				✓	
	Porosidad							
	Dolomitización							
	Dedolomitización							
Silicificación	✓	✓		✓		✓		
Minerales autigénicos			✓		✓			
Otros								

A Abundantes, F Frecuentes, S Escasos, R Raros, T Traza

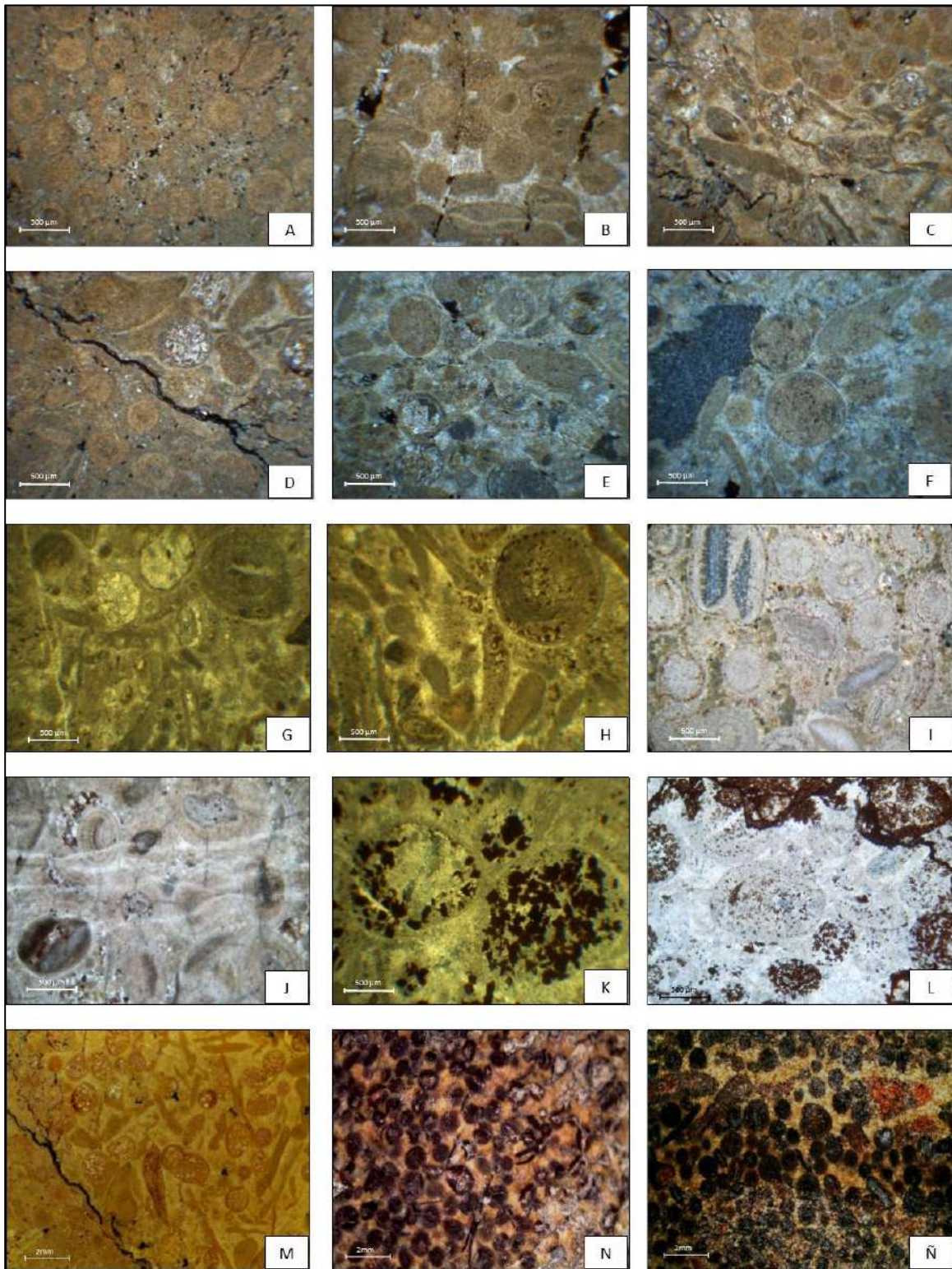


Figura 26.-A. oolitas micritizadas y superficiales; B. oolitas normales y micritizadas; C. oolitas superficiales y reemplazadas por sílice y estilolitas; D. oolitas superficiales, micritizadas y reemplazadas por sílice; E. oolitas micritizadas y recristalizadas por calcita; F. oolitas recristalizadas por calcita, placas de equinodermos; G. oolitas micritizadas, superficiales, recristalizadas por calcita; H. Oolitas micritizadas con óxidos de hierro; I. pisolito, oolitas superficiales y normales; J. oolitas normales y superficiales, equinodermos; K. oolitas reemplazadas por óxidos de hierro; L. oolitas rellenas de óxidos de hierro; M. oolitas rellenas de detritos de cuarzo; N. Oolitas rellenas de óxidos de hierro; Ñ. oolitas con óxidos de hierro.

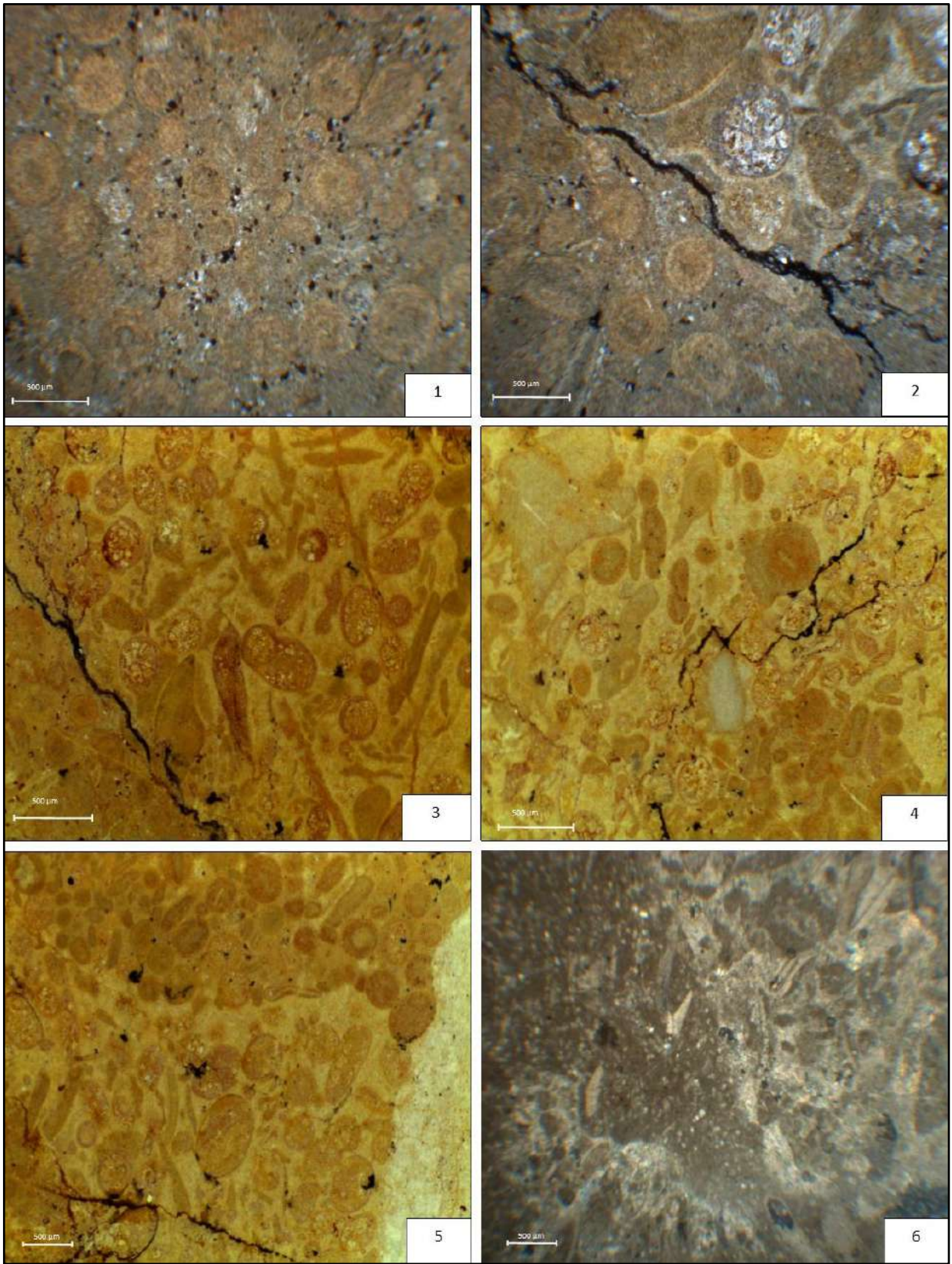


Figura 27.- Se muestran imágenes de secciones delgadas de la Formación Buelna, presentan cortes oolíticos, equinodermos y otros fragmentos esqueléticos en una matriz de micrita con poco cementante esparítico, (lente de 4x, NC).

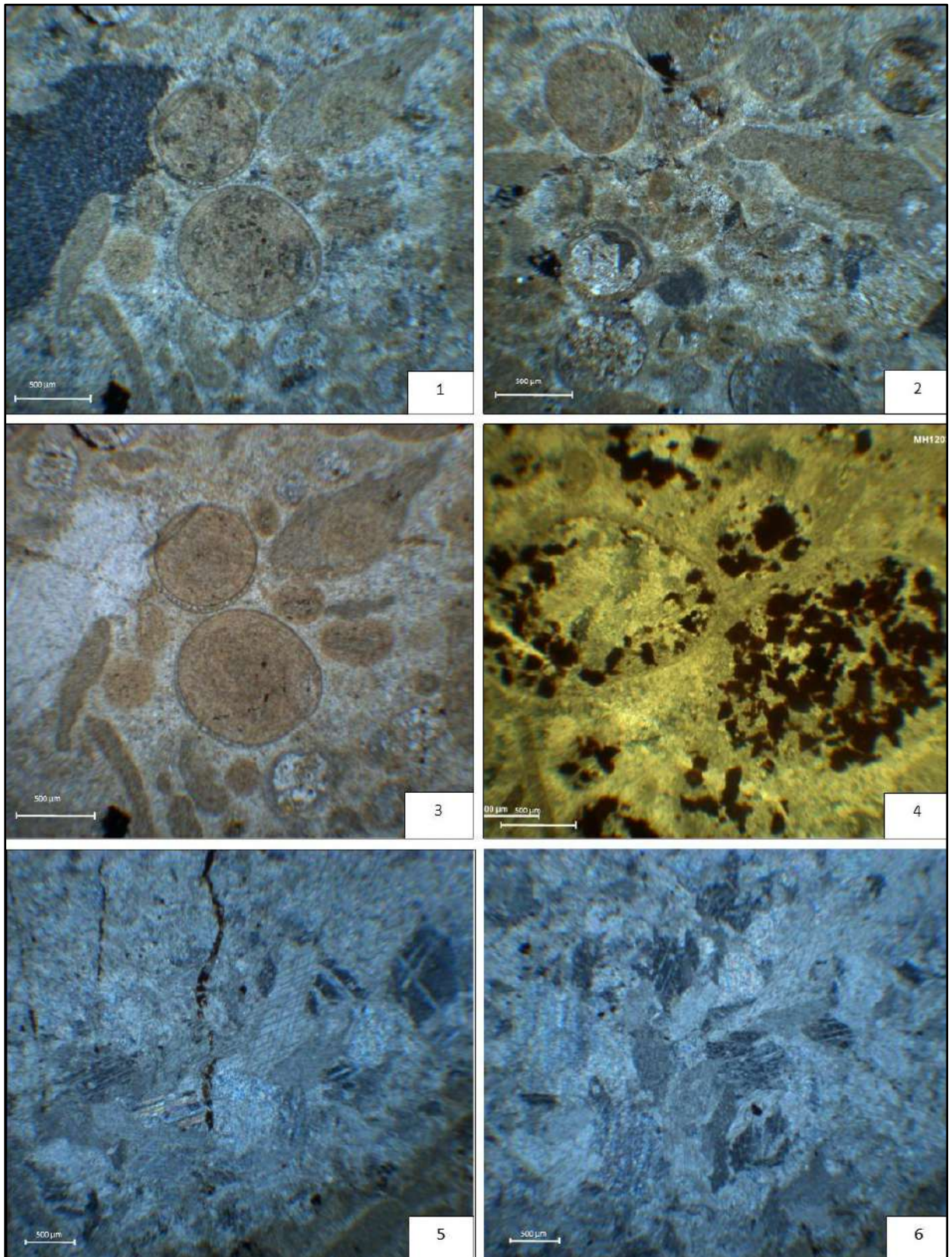


Figura 28.- Imágenes de láminas delgadas, Formación Buena, cortes oolíticos, equinodermos y fragmentos esqueléticos en un cementante de esparita con aporte de óxidos (lente de 4x, NC).

V.4.1 Formación Gavilán

V.4.1.1 Biofacies de Dolichometopidae - *Bathyriscus*

Biofacies de Dolichometopidae – *Bathyriscus* (Figura 31-A): Esta asociación biótica es común en la parte inferior de la Formación El Gavilán. La fauna asociada está integrada por esponjas: *Diagoniella* sp., *Chancelloria eros*; braquiópodos: *Lingulella proveedorensis*, *Acrothele concava*, *Dictyonina* spp., y los trilobites: *Pentagnostus* (*Meragnostus*) *bonnerensis*, *Elrathina antiqua*, *Ogygopsis typicalis* y *Bathyriscus* sp. Esta biofacies se encuentra en wackstone y packstone, de plataforma exterior, (Figura, 31).

V.4.1.2 Biofacies de Oryctocephalidae – *Oryctocephalus-Oryctocephalites*

Biofacies de Oryctocephalidae – *Oryctocephalus-Oryctocephalites*: predominan los trilobites con el 50 % de la fauna total y corresponde a los géneros, *Pentagnostus* (*Meragnostus*) *bonnerensis*, *Oryctocephalus* sp., *Oryctocephalites walcotti*, *Elrathina antiqua* y *Ogygopsis typicalis*, alcanzando el mayor porcentaje de la asociación faunística local (~50%). Los braquiópodos están representados por *Prototreta attenuata* y *Dictyonina* spp., las esponjas se encuentran en menor porcentaje y corresponden a *Diagoniella* sp., *Chancelloria eros*. Esta biofacies se encuentra en mudstone y calcilita, de plataforma exterior, (Figura 31B).

V.4.1.3 Biofacies de Eodiscidae - *Pagetia*

Biofacies de Eodiscidae (*Pagetia*) (Figuras 31 C y 32), la presencia de fauna en esta unidad es escasa, existiendo ejemplares de esponjas que corresponden al género *Diagoniella* sp., *Chancelloria eros*, los braquiópodos están representados por *Prototreta attenuata* y *Dictyonina* spp., y los trilobites por, *Pentagnostus* (*Meragnostus*) *bonnerensis*, *Ogygopsis typicalis* y *Pagetia rugosa*. Esta biofacies se halla en mudstone y lutita, y ambiente de plataforma exterior, (Figura 31 C).



Figura 30.- A *Bathyriscus*, B *Oryctocephalus* sp., C *Pagetia rugosa*

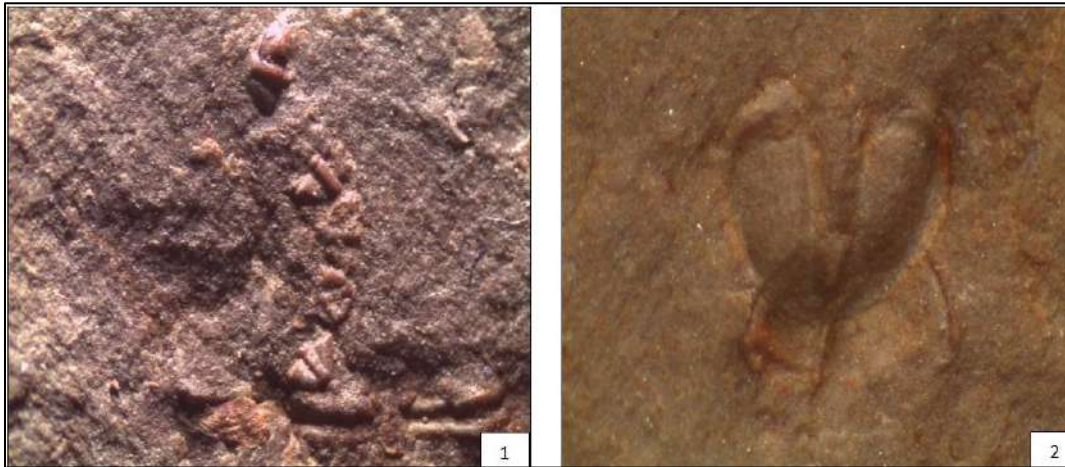


Figura 32.- 1 y 2 corte de trilobites (*Pagetia rugosa*)

Interpretación de ambiente de las biofacies

Bathyriscus se considera endémico de Laurentia y se le encuentra distribuido en casi toda la periferia del el cratón de Norteamérica, y solo se ha reportado en la plataforma externa (Bordonaro y Fojo, 2011). Este mismo autor reporta la presencia de *Bathyriscus* en la Precordillera Argentina. *Bathyriscus* sp. ha sido reportada en la Caliza Metaline, Pend Oreille County, Washington, en asociación con *Elrathina* sp., *Ogygopsis* sp., y *Taxioura* sp. (McLaughlin y Enbysk, 1950). La Biofacies de Oryctocephalidae – Oryctocephalites se consideran que se depositaron en una plataforma externa y la biofacies de Eodiscidae *Pagetia* se depositó en un ambiente más profundo hacia la zona de talud, (Figura 33).

BIOFACIES	Dolichometopidae <i>Bathyriscus</i>	Oryctocephalidae <i>Oryctocephalus</i> - <i>Oryctocephalites</i>	Eodiscidae <i>Pagetia</i>
BIOZONA <i>Mexicella mexicana</i>	<i>Bathyriscus</i> , <i>Ogygopsis typicalis</i> , <i>Elrathina antiqua</i> <i>Pentagnostus</i> , (<i>Meragnostus</i>) <i>bonnerensis</i>	<i>Pentagnostus</i> (<i>Meragnostus</i>) <i>bonnerensis</i> , <i>Oryctocephalus</i> sp. <i>Oryctocephalites walcotti</i> <i>Elrathina antiqua</i> <i>Ogygopsis typicalis</i>	<i>Pentagnostus</i> (<i>Meragnostus</i>) <i>bonnerensis</i> , <i>Ogygopsis typicalis</i> , <i>Pagetia rugosa</i>
LITOFACIES	Wackestone, packestone	Mudstone, lutita calcárea	Mudstone Nivel del mar
AMBIENTE	PLATAFORMA EXTERNA		TALUD

Figura 33.- Interpretación de ambientes de biofacies

VI. Paleogeografía.

La evolución geográfica estuvo basada en la fragmentación y dispersión del supercontinente Rodinia, existente durante el Proterozoico (~2500- 541 Ma), lo que dio origen a la generación de diversos cratones: Laurentia, Báltica, Australiano, Africano, entre otros (Weil *et al.*, 1998).

Laurentia o cratón Norteamericano, el segundo continente más grande, incluye la mayor parte de América del Norte. Laurentia se estiro a través del ecuador cámbrico, sumergida en parte por el océano Japeto, mientras que Báltica y Siberia se encontraban sumergidos acercados desde el sureste.

Hoy en día los sedimentos cámbricos de Sonora constituyen los depósitos más australes del cratón norteamericano, sin embargo, es posible que durante el Cámbrico estos se hayan sedimentado en la parte occidental de Laurentia, esta secuencia marina fue depositada en ambiente de plataforma somera en la margen pasiva de Laurentia después del rompimiento de Rodinia. Las rocas sedimentarias están compuestas de areniscas, dolomías y calizas con presencia de estromatolitos, que pertenecen al Neoproterozoico y Paleozoico. El espesor estimado para esta secuencia es de 3300 m y se considera como parte de la secuencia miogeosinclinal cordillerana expuesta a lo largo del borde oeste de Norteamérica (Anderson y Silver, 1979; Stewart *et al.*, 2002), (Figura 34) y afloramientos actuales (Figura 35).

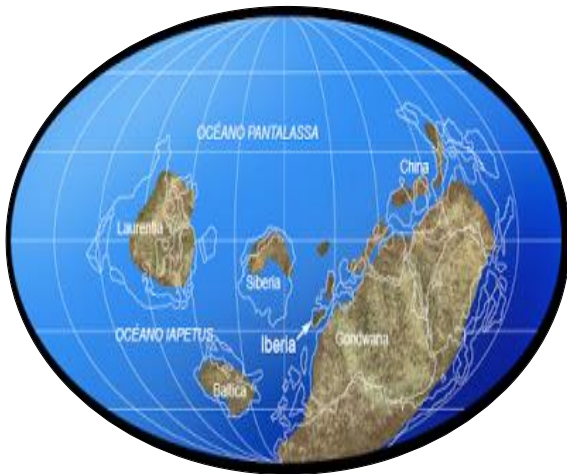


Figura 34.- Mapa Paleogeográfico en el Cámbrico inferior (510M.a).

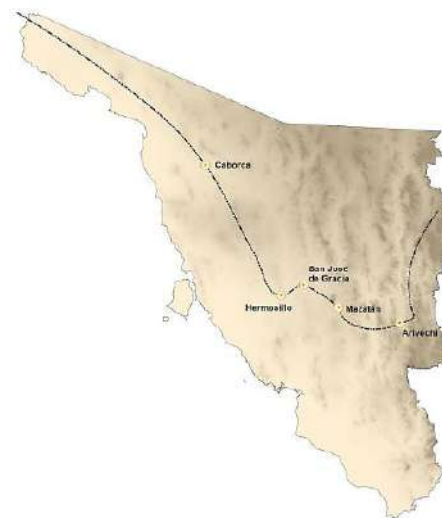


Figura 33.- Afloramientos cámbricos actuales en el estado de Sonora. Tomado de Cuen 2013.

VII. Conclusiones y recomendaciones

VII.1. Conclusiones

Se realizó una sección donde por primera vez se determinaron 2 litofacies para la Formación Proveedora, 3 microfacies para la Formación Buelna y 2 para la Formación Cerro Prieto, y 3 Biofacies para la Formación El Gavilán.

Las características litológicas de la Formación Proveedora permitieron definir dos litofacies donde el ambiente de formación va de intermarea a inframarea, y en la segunda litofacies debido al alto contenido de bioturbación e icnofosiles, indica un ambiente marino somero, intermarea y submarea, probablemente de la icnofacies de *Skolithos*.

Las microfacies establecidas para cada formación y su posterior correlación con el modelo propuesto por Flügel (2004) sugieren que las Formación Buelna y Cerro Prieto se desarrollaron en un ambiente de rampa homoclinal de carbonatos.

Las características litológicas, petrográficas y microfaciales de los niveles carbonatados de las Formaciones Buelna y Cerro Prieto, permiten definir una plataforma carbonatada a mixta tipo rampa en un medio marino abierto con variaciones en el nivel del mar que van de rampa intermedia con aguas agitadas, rampa media con aguas fuertemente agitadas, rampa media con aguas moderadamente agitadas, rampa interna con aguas escasamente agitadas a interna con moderada a alta energía.

En la determinación de biofacies, nos permite reconocer las asociaciones de trilobites que coexistieron en cada sector de la secuencia en un lapso acotado y así establecer afinidades faunísticas entre regiones distantes, donde es fundamental comparar faunas de biofacies similares ya que los índices de afinidades podrían variar notablemente, si analizamos faunas que viven en ambientes diferentes, como los que se muestran en este trabajo. Se sugiere un cambio de facies hacia ambientes más profundos y de aguas tranquilas.

VII.2. Recomendaciones

Para la Formación Cerro Prieto solo se analizaron 6 secciones delgadas, se recomienda hacer un muestreo detallado de esta formación, con la finalidad de realizar el análisis de microfacies y obtener el ambiente de depósito más preciso.

Realizar un análisis de los procesos de diagénéticos que han afectado a las formaciones estudiadas para así establecer los ambientes biogénéticos que han operado en términos generales.

VIII. Bibliografía

- Almazán, V.E. (2002). El Cámbrico Temprano y Medio de San José de Gracia, Sonora Central, México. *Unión Geofísica Mexicana*, V. 22 – 2. p. 333.
- Almazán, V.E. (2002). El Cámbrico Temprano y Medio de San José de Gracia, Sonora Central, México. *Unión Geofísica Mexicana*, V. 22 – 2. p. 333.
- Almazán, V.E. (1989). El Cámbrico – Ordovícico de Arivechi, en la región centrooriental del estado de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista*. Vol. 08, núm. 01, pp. 58 – 66.
- Álvarez, M. (1949). Notas sobre el Paleozoico mexicano. *Mexicana de geólogos petroleros. Boletín de la Asociación*. Vol. 1, núm. 1, pp. 47 – 56.
- Bartolini, C., Morales, M.M. y Damon, M. (2001). Estratigrafía del Terciario y Geocronología (K – Ar) del área sur de San José de Gracia, Sonora central, México. *Geological Society of America*. Vol. 24, pp. 6
- Biostratigraphical and palaeoecological comments. *Geobios* 42 (2009), pp. 233 – 242.
- Buitrón, B.E., Almazán, V.E. & Mendoza, M.C. (2004). *Gogia spiralis* el eocrinoide de mayor antigüedad (Cámbrico temprano) de México. *Unión Geofísica Mexicana*. V. 24. No. 02. p. 251.
- Buitrón, B.E., Vachard, D., Clausen S. & Gómez, E. C. (2011). Cambrian mollusks (*Hyolithida*, Syssoiev, 1957) from San José de Gracia, Sonora, Northwestern Mexico. *Reunión Internacional de Malacología*, libro de resúmenes. p. 175
- Buitrón, S.B., Cuen, R.F., Huerta, R.A. y Montijo-González, A. (2017). *Hiolítidos del Cámbrico (Hyolitha) de San José de Gracia, Sonora, México. Consideraciones estratigráficas y paleogeográficas. Paleontología Mexicana* 6, 1, 25-34.
- Buitrón S.B, Cuen, R.F., Montijo, G.A. y Beresi, S.M. (2017). El equinodermo *Gogia granulosa* (Echinodermata: Blastozoa) del Cámbrico temprano-medio en Sonora, México: paleoecología y paleogeografía. *Revista de biología tropical*. Vol 65, No 1-1.

- Cirett, G.J. y Aguilar, R.F. (1989). Características geológicas e hidrogeoquímicas del Valle de Ures, Sonora, México. Tesis Profesional de Licenciatura. Universidad de Sonora, Departamento de Geología.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2012). Provincias fisiográficas de México.
- Cooper, G.A. & Arellano, A.R. (1946). Stratigraphy near Caborca, northwest Sonora, México. Bulletin American Association Petroleum Geologists. Vol. 30, núm. 4, pp. 606 – 611.
- Cooper, G.A., Arellano, A.R., Johnson, J.H., Okulitch, V.J., Stoyanow, A. & Lochman, C. (1952). Cambrian Stratigraphy and Paleontology near Caborca, northwestern Sonora, México. Smithsonian Miscellaneous Collections. Vol. 119, pp. 1 – 184.
- Cooper, G.A., Arellano, A.R.V., Johnson, J.H., Okulitch, V.J., Stoyanow, A. & Lochman, C. (1956). Geología y Paleontología de la región de Caborca, norponiente de Sonora. Pt. 1ª. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, pp. 259
- Cuen, R.F., Beresi, M., Montijo, A., Buitrón, B., Minjarez, S., De La O, M. & Palafox, J.J. (2013). Chancelloria Walcott, 1920 y Reticulosa Reid, 1958 del Cámbrico Medio de San José de Gracia, Sonora, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 65, 581-590
- Cuen, R.F., Valdez, H.J., Buitrón, S.B., Monreal, S.R., Sundberg, F., Montijo, G.A. & Minjarez, S. I. (2016). Cambrian, Stratigraphy of San José de Gracia, Sonora, México: El Gavilán Formation a new lithostratigraphic unit of middle Cambrian open shelf environment. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 68, 429-441.
- Cuen, R.F. (2012). Sobre la Estratigrafía y Paleontología del Cámbrico del área de San José de Gracia, Sonora central. Universidad de Sonora, Departamento de Geología. Tesis profesional de Licenciatura, pp. 73.
- Cuen, R.F., Almazán, V.E., Montijo, G.A., Minjárez, S.I., Grijalva, N.F., Monreal, S.R., Schwennicke, T. y Ochoa. G. (2009). Faunas marinas de invertebrados del

- Cámbrico temprano y medio en la parte central del estado de Sonora, México. *Unión Geofísica Mexicana*. Vol. 29, No. 1, pp. 91.
- Cuen, R.F., Montijo, G.A., Minjárez, S.I., De la O, V. M., Buitrón, S.B. y Sundberg, F. (2012). La biota del Cámbrico de San José de Gracia, Sonora: Consideraciones bioestratigráficas, sistemáticas y paleogeográficas. Universidad de Sonora, Departamento de Geología. XXXV Semana Cultural. Libro de Resúmenes.
- Cuen, R.F. y Radelli, L. (2007). Un problema estratigráfico en el Cámbrico y Precámbrico de Caborca, Sonora, México. Resúmenes, XXIX Semana Cultural, Universidad de Sonora. P. 06.
- Damon, P.E., Clark, K.C. y Shafiqullah, M. (1983). Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of México: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1052-1071.
- Dunham, R.J. (1962). Classification of Carbonate Rocks according to Depositional Texture. *American Association of Petroleum Geologists*, 1, 108-121.
- Dumble, E. (1900a). Notes on the geology of Sonora, Mexico: *American Institute of Mining and Petroleum Engineering Transactions*., v. 29, p. 122–152.
- Flügel, E. (2004). *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*, Springer.
- Folk, R.L. (1962). Spectral subdivision of limestones types. *Amer. Ass. Petrol.Geol. Mem.*1, 62-84.
- González, L.C. (1986). Estratigrafía del Paleozoico de la Sierra del Tule, noroeste de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*. Vol. 06, núm. 2, pp. 117 – 135.
- Grijalva, N.F. & Roldán Q.J. (1998). An overview of the Cenozoic tectonic and magmatic evolution of Sonora, northwestern México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 145-156.

- Homewood, P.W. (1996). The carbonate feedback system: interaction between stratigraphic accommodation, ecological succession and the carbonate factory. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 167, 701–715.
- Huerta, R.A. (2011). Moluscos del Cámbrico (Hyalithida, Syssoiv, 1957) de San José de Gracia, Sonora. Consideraciones bioestratigráficas, Paleoecológicas y Paleogeográficas. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Tesis profesional de Ingeniero Geólogo.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2001. Carta Topográfica
- James, N.P. (1997). The cool-water carbonate depositional realm. In: *Cool-water Carbonates* (Eds N.P. James and J.A.D. Clarke), SEPM Spec. Publ., 56, 1–20.
- Johnpeer, G.D. (1977). Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, Mexico: Tempe, Arizona State University, M. Sc. thesis, 67 p
- Lochman, C. (1948). New Cambrian trilobite genera from northwest Sonora, México. *Journal of Paleontology*. Vol. 22, núm. 4. Pp. 451 – 464.
- Maytorena, S.J. y Esparza, Y.F. (1990). The Cambrian succession of central Sonora: Tectonic implications. *Geological Society of America. Abstracts with programs*. V. 22, núm. 3. Pp. 65.
- McDowell, F.W., Roldán, Q.J. y Amaya, M.R. (1997). Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico: *Geological Society of America, Bulletin*, 109, 1349–1360.
- Nardin, E., Almazán, V.E. y Buitrón, S.B. (2009). First report of *Gogia* (Eocrinoidea - Echinodermata) from the Early - Middle Cambrian of Sonora (México), with biostratigraphical and palaeoecological comments: *Geobios*, 42, 233-242.
- Paz M.F., Demant, A., Cochemé, J.J., Dostal, J. & Montigny, R. (2009). The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alcali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, Mexico, en Johnson, S.E., Paterson, S.R., Fletcher, J.M., Girty, G.H., Kimbrough, D.L., Martín-Barajas, A. (eds.), *Tectonic*

Evolution of northwestern Mexico and the southwestern United States: Geological Society of America Special Paper, 374, 439- 455.

Rivera, C.E. (1988^a). Condiciones paleoambientales de depósito de las formaciones cámbricas del área de Caborca, Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista. Vol. 07, núm. 1, pp. 22 – 27.

Robison, R.A. (1965). Middle Cambrian *Eocrinoids* from Western North America. Journal of Paleontology, V. 39 (3), pp. 355 – 364.

SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2002). Carta Geológico – Minera H12-D32, escala 1:50,000.

Schlager, W. (1993) Accommodation and supply: a dual control on stratigraphic sequences. Sed. Geol., 86, 111–136.

Stewart, J.H., Amaya, M.R. & Palmer, A.R. (2002). Neoproterozoic and Cambrian strata of Sonora, México. Rodinian Super continent to Laurentian Cordilleran Margin. Geological Society of America. Special Paper 36. Pp. 9 – 15.

Walcott, C.D. (1920). Middle Cambrian Spongiae. Smithsonian Miscellaneous. Collections 67: 261-364