

IV. FACIES SEDIMENTARIAS DE LA FORMACIÓN MORELOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Una facies está definida por un conjunto particular de atributos sedimentarios como las características litológicas, textura, conjunto de estructuras sedimentarias, contenido fósil, color, etc., (Tucker, 1990). Por lo tanto, las facies sedimentarias reflejan las condiciones ambientales (físicas, químicas y biológicas) a los que fueron sometidos los sedimentos y su escenario de formación. El estudio a detalle de las facies permite inferir en qué tipo de ambiente se depositó una roca por el conjunto de características observadas. La distribución de los diferentes tipos de facies dependerá del sistema carbonatado (e.g., rampa carbonatada, plataforma bordeada, etc.). Por ello, es de gran utilidad lograr el reconocimiento y entender la distribución de las facies para poder inferir la arquitectura de la plataforma, (Jones y Desrochers, 1992; Read, 1985). Sin embargo, para poder interpretar de forma correcta los componentes que determinan las facies es indispensable conocer la naturaleza, composición y distribución de los sedimentos, y en ocasiones sus características diagenéticas. A continuación se presenta de manera más amplia el desarrollo de este punto.

4.1.1 Factores que intervienen en la naturaleza, composición y distribución de los sedimentos

Los sedimentos carbonatados son precipitados de dos formas diferentes: abióticamente (o casi-abiótica) gobernada por reacciones termodinámicas y cinéticas, y bióticamente, en respuesta al metabolismo de los organismos. A su vez el tipo de carbonato precipitado depende de factores como el clima, la temperatura, la cantidad de luz, el contenido de oxígeno, la salinidad, la profundidad y el aporte de sedimentos terrígenos, cambios relativos del nivel del

mar, nutrientes, etc. (Jones y Desrochers, 1992; Schlager, 2003). Estos factores definen el paleoambiente, espacio físico (no biogénico) donde se desarrollaron ciertos organismos bajo condiciones específicas. En la Tabla 4.1 se muestran algunos parámetros y estructuras características de ciertos ambientes sedimentarios.

NIVEL DE ENERGÍA	
Indicadores	Ambientes específicos:
<p>Ambientes de baja energía</p> <p><i>Facies:</i> mudstone y wackestone <i>Estructuras sedimentarias:</i> laminación paralela, granos cubiertos (oncoides).</p>	<p>Zonas con alguna barrera que impide el flujo de corrientes e impide la acción de las olas y permite la producción y acumulación de sedimentos de grano fino; ejemplos: lagunas, plataformas bordeadas, rampas externas, cuencas, estuarios.</p>
<p>Ambientes de alta energía</p> <p><i>Facies:</i> Packstone y grainstone. <i>Estructuras sedimentarias:</i> estratificación cruzada, imbricación, brechas.</p>	<p>Zonas sin ninguna barrera natural sujetas a la acción de las olas y a las corrientes, por lo que se acumulan sedimentos de grano grueso. Ejemplos: planicies de intermarea, plataformas no bordeadas, parches arrecifales, rampas internas.</p>
PROFUNDIDAD	
Indicadores	Ambientes específicos:
<p>Aguas someras</p> <p>Mayor abundancia en la cantidad y diversidad de organismos. Conchas delgadas o aglutinadas y poco ornamentadas en foraminíferos.</p>	<p>Zonas de litoral, planicies de marea.</p>
<p>Aguas profundas</p> <p>Conchas gruesas o aglutinadas en foraminíferos bentónicos. Presencia de radiolarios.</p>	<p>Parte de la plataforma, cuenca.</p>
TEMPERATURA	
Indicadores	Ambientes específicos:
<p>Aguas cálidas</p> <p>Abundancia y diversidad de organismos bentónicos, plantas y agregados no esqueletales (ooides). Macroforaminíferos y corales hermatípicos. Presencia de la asociación Clorozoan.</p>	<p>Ambientes ubicados geográficamente alrededor de los 30° N y 30° S del Ecuador.</p>
<p>Aguas frías</p> <p>Menor cantidad de organismos. Presencia de la asociación Foramol. Ausencia de agregados no esqueletales. Briozoarios, braquiópodos y las algas rojas son característicos.</p>	<p>Ambientes ubicados geográficamente de 30° N y 30° S del Ecuador a los límites polares.</p>

Tabla. 4.1. Resumen: factores que determinan el ambiente sedimentario carbonatado e indicadores ambientales.

CANTIDAD DE OXÍGENO	
Indicadores	Ambientes específicos:
Zona bien oxigenada (aeróbica)	
Abundancia y diversidad de organismos de fauna bentónica. Estratificación cruzada, bioturbación. Texturas de alta energía. Bajo contenido de materia orgánica por lo cual se presentan colores claros en las rocas.	Planicies de marea, plataformas abiertas o con pequeñas barreras, zonas de surgencia, ventilas hidrotermales.
Zona anaeróbica o anóxica	
Presencia de materia orgánica. Los colores de las rocas llegan a ser muy oscuras. Se conserva la laminación fina por la ausencia de organismos bentónicos bioturbadores.	Sabkhas, lagunas restringidas.
SALINIDAD	
Indicadores	Ambientes específicos:
Aguas dulces, salobres e hipersalinas	
Presencia de organismos eurihalinos (toleran los cambios salinos). Ejemplos: algas verde-azules, diatomeas, foraminíferos aglutinados, pelecípodos, gasterópodos, ostrácodos, entre otros.	Lagunas, cuencas y bahías semi restringidas.
Condiciones marinas normales	
Presencia de organismos estenohalinos (sensibles a los cambios de salinidad) como: algas rojas y verdes, radiolarios, coccolitofóridos, calciesponjas, corales, braquiópodos, equinodermos, foraminíferos planctónicos, etc.	
CANTIDAD DE LUZ	
Indicadores	Ambientes específicos:
Zona fótica	
Algas calcáreas, cianobacterias, foraminíferos bentónicos, algunos foraminíferos planctónicos, corales, ciertos bivalvos. Granos cubiertos (cortoides y oncoides) que tienen como núcleo materia algal.	Alcanza profundidades que van de 50 a 200 m, dependiendo de la turbidez del agua, se refiere a condiciones marinas iluminadas donde los organismos pueden realizar el proceso fotosintético. Cubre la zona de intermarea y supramarea, lagunas someras, parches arrecifales.
Zona disfótica	
Organismos multicelulares fotoautótrofos	Ambientes donde la cantidad de luz es menor al 0.01%, por lo que la actividad fotosintética es escasa. Las cuevas y arrecifes marinos están bajo estas condiciones.
Zona afótica	
Radiolarios, calciesponjas, algunos foraminíferos pelágicos.	Zonas profundas donde es imposible realizar la fotosíntesis. Cubre parte de las plataformas profundas y cuencas oceánicas.

Tabla. 4.1. Resumen: factores que determinan el ambiente sedimentario carbonatado e indicadores ambientales. Continuación.

Los parámetros mencionados anteriormente también determinan el tipo de fábrica de carbonatos. La fábrica de carbonatos es el piso marino de submarea somera iluminada (profundidades menores a 15 m). De acuerdo a Schlager (2000) se reconocen tres sistemas de producción de carbonatos (fábricas de carbonatos): a) de aguas cálidas, b) de aguas frías y c) montículos de lodo (*mud mounds*). En la Tabla 4.2 se presenta una breve descripción de las características de cada una de éstas fábricas de carbonatos.

FÁBRICA DE CARBONATOS	AGUAS CÁLIDAS	AGUAS FRÍAS	“MUD MOUND”
Precipitados carbonatados	Controlados biótica y abióticamente.	Controlados bióticamente	Derivados de reacciones bióticas y abióticas
Localización (actual)	30° N y 30° S del Ecuador	De 30° N y 30° S del Ecuador a los límites polares	Muy importantes en el Fanerozoico
Cantidad de nutrientes	Poco	Altos	Altos
Nivel de oxígeno	Alto		Bajo
Producción de sedimentos	Representan la tasa más alta	Representa cerca del 25% de la tasa tropical	Representa del 80-90% de la tasa tropical
Bioclastos	Asociación Clorozoan	Asociación Foramol	
Características	Gran cantidad y diversidad de organismos		Los carbonatos precipitan in situ y son de grano fino
Profundidad	Aguas someras, no superan la zona fótica?	Superan la zona fótica (superior a 300 m?)	Superan la zona fótica (superior a 400 m?)

Tabla 2. Resumen con las características más destacables en los tres diferentes sistemas de producción de carbonatos. Reitner et al., 1995, Schalager 2000 y 2003,

4.2 OBJETIVOS

- Describir las microfacies de la Formación Morelos observadas en campo y en lámina delgada.
- Determinar el ambiente depositacional de cada facies.
- Definir asociaciones de facies de acuerdo al ambiente depositacional que tengan en común.
- Determinar los principales rasgos diagenéticos de las facies identificadas con base en el análisis petrográfico e inferir sus ambientes diagenéticos.

4.3 METODOLOGÍA

4.3.1 Revisión bibliográfica del área de estudio

La primera fase para la elaboración de este trabajo consistió en la búsqueda, consulta y revisión bibliográfica de trabajos geológicos previos del área de estudio. Se utilizó la carta geológica del Servicio Geológico Mexicano E14-B61 escala 1:50,000 con la finalidad de identificar el relieve, las principales estructuras geológicas, litologías, rutas de acceso, etc., y posteriormente para marcar y llevar un control de los puntos de muestreo de las secciones medidas.

4.3.2 Medición de secciones estratigráficas

Se realizó un muestreo de reconocimiento del área de estudio, este muestreo comprende la colección de 121 muestras de mano, de las cuales elaboramos sus respectivas láminas delgadas. El estudio de las láminas con microscopio petrográfico, proporcionó las herramientas y permitió el reconocimiento de los atributos necesarios para la caracterización de las facies sedimentarias, en la sucesión calcárea de la Formación Morelos registradas en el Anticlinal Cuachi (Anexo 1). Con base en los primeros resultados, se midieron dos secciones estratigráficas a detalle que abarcan las zonas principales del Anticlinal Cuachi.

Aunque no se pudo medir una sola sección estratigráfica continua de la Formación Morelos, debido a que algunas capas de la caliza estaban cubiertas por suelo, se incluyeron la parte basal, con un espesor total de 53.9 metros (Fig. 4.1, Anexo 1a), la segunda sección comprende la parte media del Anticlinal Cuachi y tiene un espesor total de 52.42 metros (Fig. 4.2, Anexo 1b) y la tercer sección cubrió parte de los estratos más jóvenes del Anticlinal con un espesor de 22.61 metros (Fig. 4.3, Anexo 1c).

Se realizó el muestreo con control estratigráfico detallado, de acuerdo al cambio vertical y lateral de las litofacies y en casos de estratos muy gruesos, masivos o cubiertos por material orgánico, se aplicó el mismo procedimiento: muestrear sistemáticamente cada 50 cm. Se tomaron muestras frescas que representaban lo mejor posible cada litofacies (color, estructuras primarias, macro- y microfósiles). Se asignó una nomenclatura de acuerdo al orden de la sección y del muestreo. La medición del espesor de las litofacies y/o de los estratos se realizó con flexómetro y en los casos de estratos masivos, con cinta. Se obtuvo el dato estructural de la estratificación con la brújula Brunton.

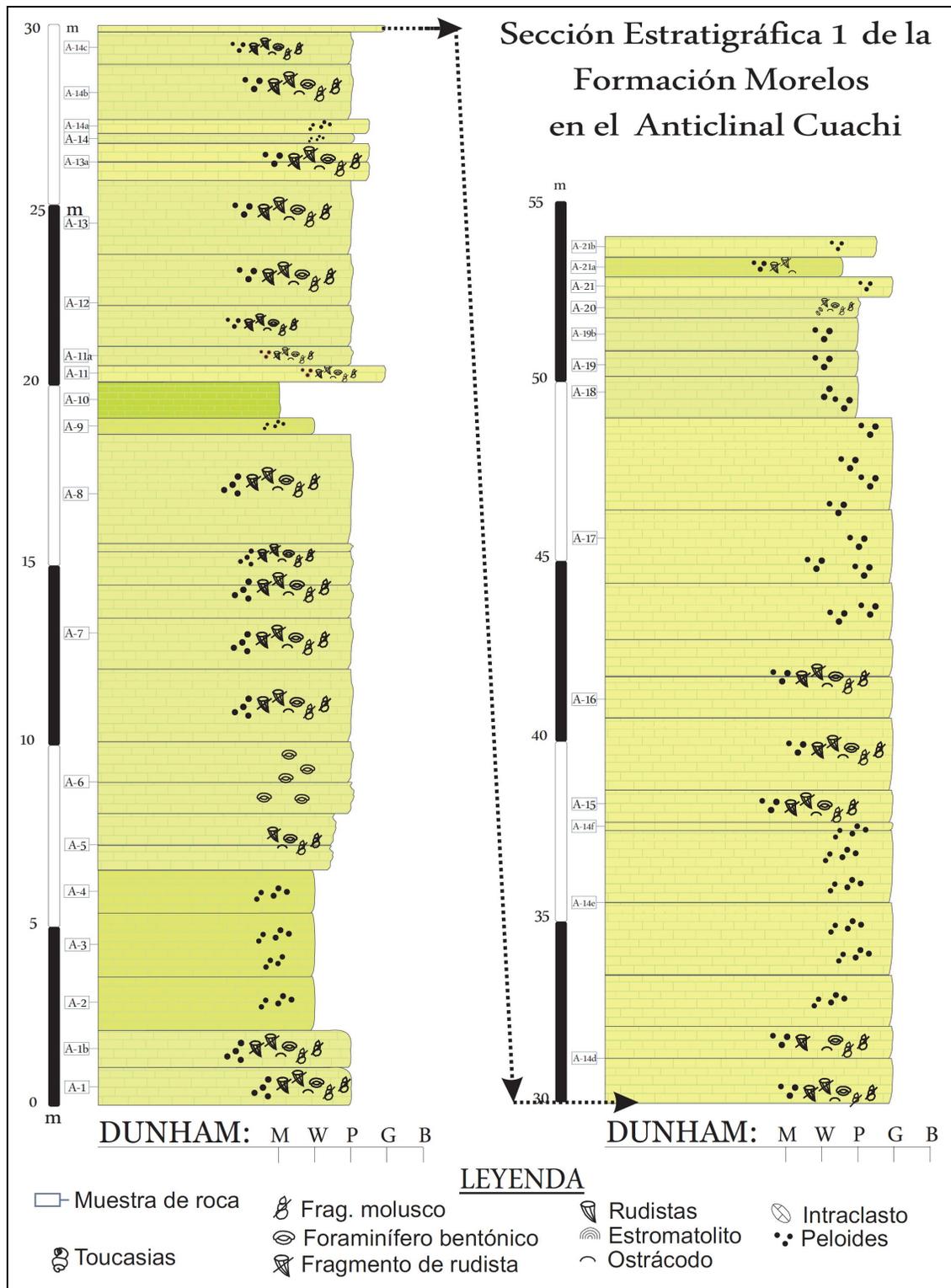


FIG. 4.1. Sección Estratigráfica 1, medida en el Anticlinal Cuachi. Calizas de la Formación Morelos.

Sección Estratigráfica 2 de la Formación Morelos en el Anticlinal Cuachi

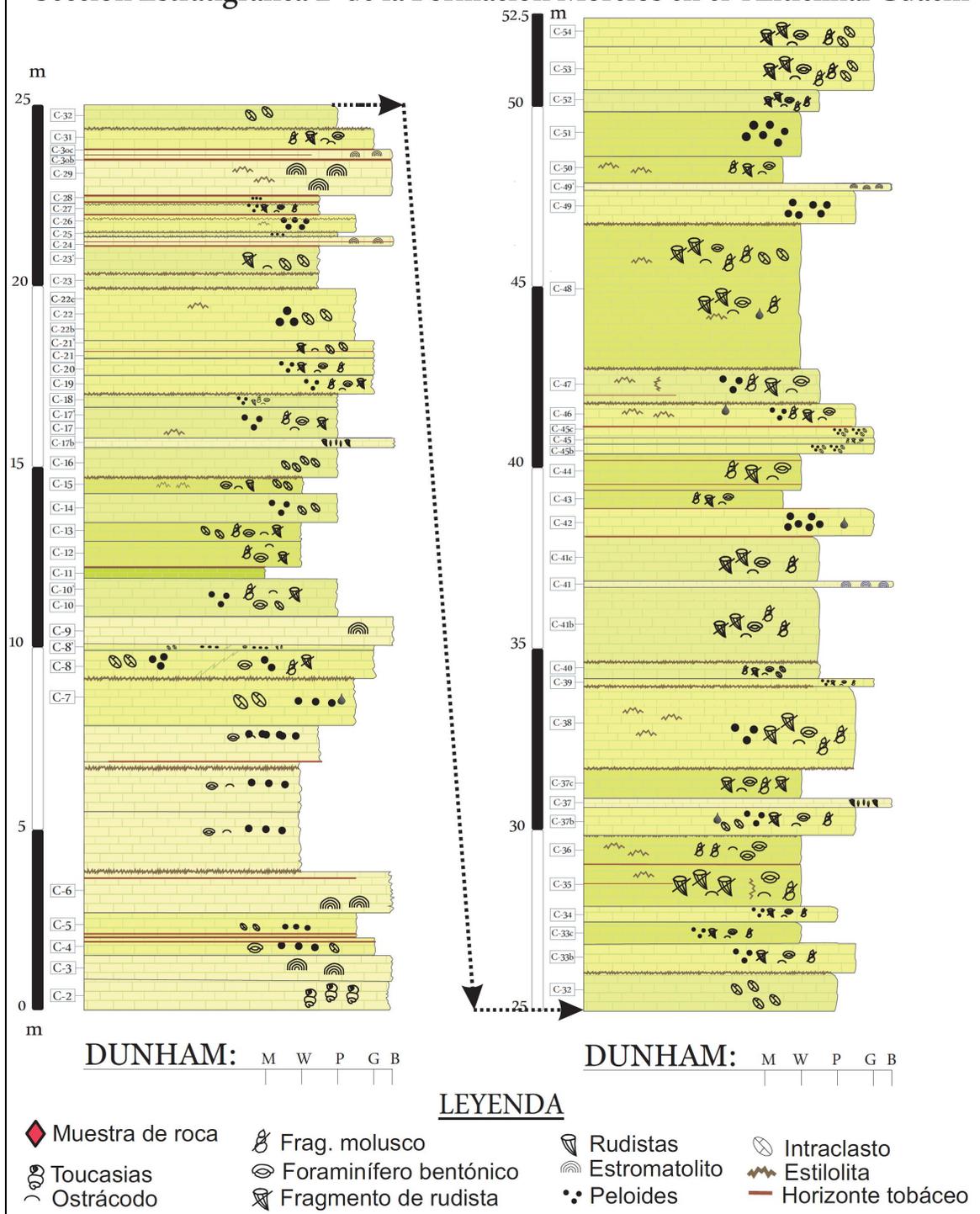


Fig. 4.2. Sección Estratigráfica 2, Calizas de la Formación Morelos medidas en el Anticlinal Cuachi.

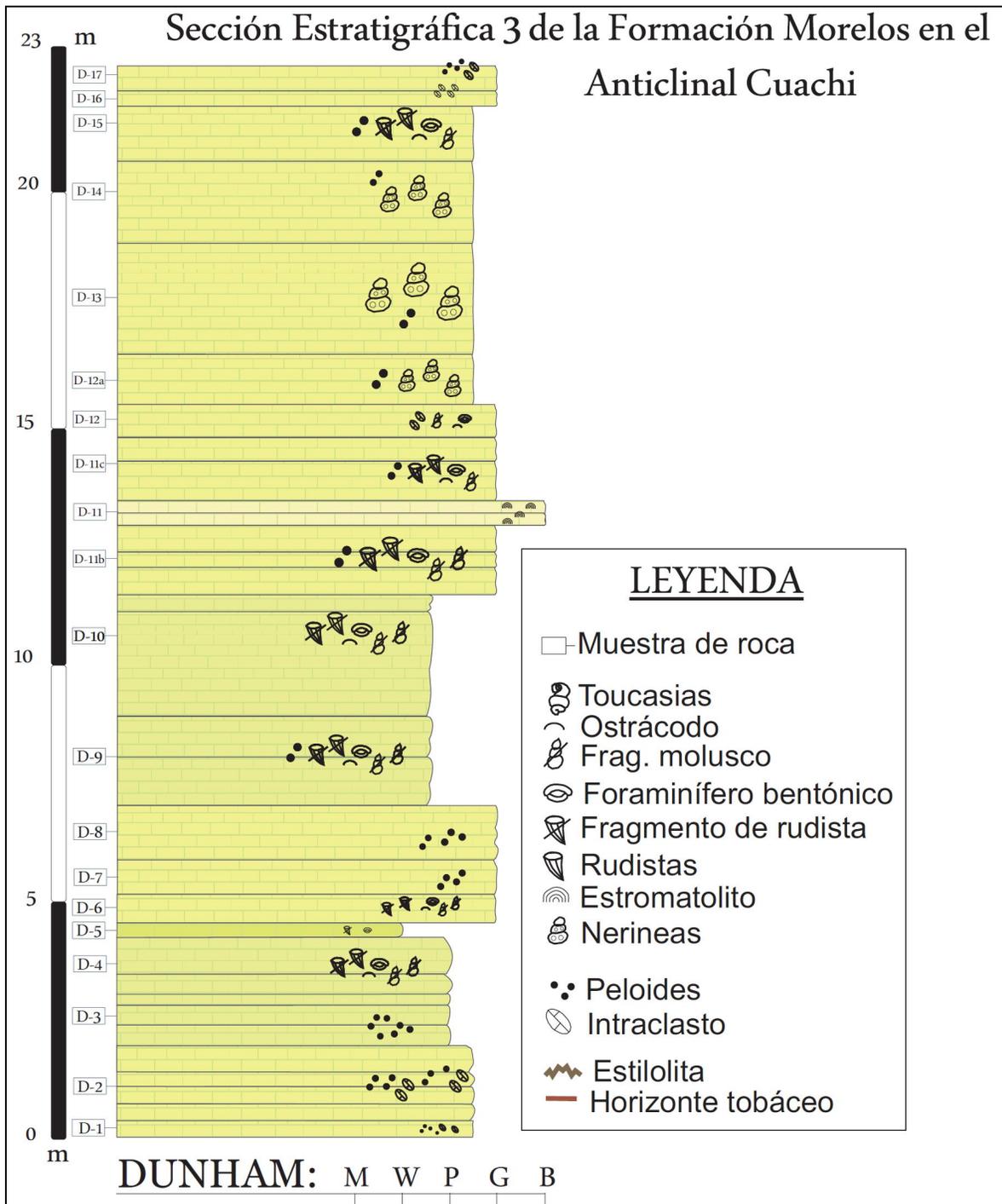


FIG. 4.3. Sección Estratigráfica 3, Calizas de la Formación Morelos medidas en el Anticlinal Cuachi.

4.3.3. Análisis petrográfico

Para la determinación de la litofacies se realizaron 229 láminas delgadas, también se realizó la impregnación con resina epóxica azul de 30 almohadillas para determinar si había porosidad remanente en las rocas. El estudio petrográfico se realizó utilizando microscopios petrográficos de luz polarizada marca Olympus del Instituto Mexicano del Petróleo, y se empleó la clasificación de Dunham (1962) por considerarse la más adecuada y práctica. Se definieron la textura depositacional, componentes carbonatados (granos orgánicos e inorgánicos, cementos y lodo calcáreo), estructuras sedimentarias y rasgos diagenéticos mayores. En los anexos 1, 2 y 3 se muestran las descripciones en lámina delgada de las muestras de las Secciones Estratigráficas 1, 2 y 3 respectivamente. En la tabla 4.3 se muestra la relación de las láminas delgadas realizadas y analizadas en este trabajo de tesis.

Sección Estratigráfica	No. De Muestras	Muestras	Espesor total (m)
1	17 *	A-1 / A-21b	53.90
2	71	C-1 / C-54	52.42
3	20	D-1 / D-17	22.61
Sección de reconocimiento	121	A-1 / A-122	

Tabla 4.3. Relación de las muestras obtenidas y laminadas para la determinación de las facies sedimentarias de la sucesión calcárea de la Formación Morelos aflorante en el Anticlinal Cuchi. * Muestras agregadas en la base de la sección de reconocimiento.

4.3.4. Análisis de facies

La determinación de las facies se basó tanto en la información obtenida en los afloramientos durante el trabajo de campo y en el estudio petrográfico a detalle de 229 láminas delgadas. Tanto la determinación del tipo de facies como el ambiente depositacional se estableció de acuerdo a las características texturales y

componentes carbonatados (peloides, intraclastos, bioclastos, etc.) en base a las clasificación de Dunham (1962) (Fig. 4.4) y a las estructuras sedimentarias de las rocas.

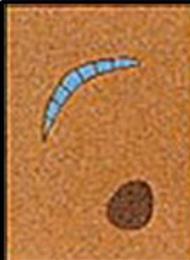
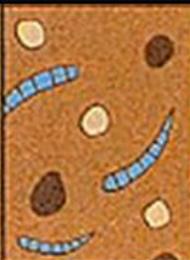
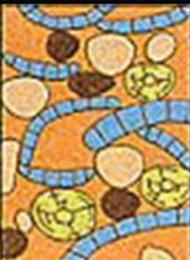
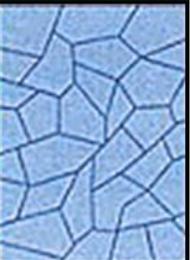
Textura depositacional reconocible					Textura depositacional no reconocible
Componentes originales no unidos durante el depósito			Componentes originales unidos durante el depósito	Carbonato cristalino	
Contienen lodo		No contiene lodo			Boundstone
Lodo-soportado		Grano-soportado		Carbonato cristalino	
< 10% de granos	> 10% de granos	Packstone	Grainstone		Carbonato cristalino
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	
					

Fig. 4.4 Clasificación de Dunham (1962) de las rocas carbonatadas en base al contenido de aloquímicos y el contenido de matriz y/o cementante.

4.3.4.1 Interpretación paleoambiental

Las fábricas de carbonatos mantienen una estrecha relación con el medio ambiente. Debido a que los organismos son los principales generadores del sedimento, éstos son sensibles tanto a las condiciones marinas existentes como a las condiciones del sustrato (Heckel, 1972; Pickerill y Brenchley, 1991). Las variantes que ocurran podrán aniquilar la biota que no pueda tolerar las nuevas condiciones o probablemente también podrá incrementarse el número de individuos de las especies que sobrevivan (Jones, B., Desrochers, A., 1992).

Sin embargo aunque existan organismos que pueden tolerar rangos bastante amplios, también existen aquellos que viven bajo condiciones específicas. Algunas estructuras sedimentarias también son generadas bajo condiciones ambientales

específicas. Estos organismos y-o estas características que viven o se forman bajo condiciones determinadas son el tipo de parámetros útiles para determinar los paleoambientes. Se describen las partículas esqueléticas y no esqueléticas utilizadas en este trabajo como indicadores paleoambientales. En la Figura 4.5 se esquematizan estos elementos.

	CONDICIONES MARINAS RESTRIGIDAS				CONDICIONES MARINAS ABIERTAS	
	PLATAFORMA INTERNA				PLATAFORMA EXTERNA	
	Supramarea	Intermarea	Submarea		Barrera Interna	Banco de arena o Arrecife
					Nivel de Mareas Bajas	
	Facies 1: Boudstone de estromatolitos	Facies 2: Wackestone de oncoides	Facies 7: Wackestone-packstone de intraclastos, bioclastos y peloides Facies 8: Mudstone-wackestone de bioclastos Facies 9: Wackestone-packstone de bioclastos y peloides	Facies 6: Grainstone de intraclastos, peloides y bioclastos	Facies 3: Boudstone de toucasias Facies 4: Boudstone de chondrodonta y rudistas Facies 5: Packstone-grainstone de nerineas y peloides	Facies 10: Packstone-grainstone de bioclastos y peloides/pellets
ENERGÍA DE LAS AGUAS DEPOSITACIONALES	Ninguna	Moderada	Baja		- Baja - Moderada - Alta	Alta
ESTRATIFICACIÓN	- Irregular - Varios cm de espesor	- Regular - Varios cm de espesor	- Regular - Varios cm de espesor - Varios m de espesor		- Irregular - Espesor irregular - Capas mayor a 1 m	- Masivas o pobremente estratificada, - Capas mayor a 1 m
TEXTURA	Mudstone	Packstone Grainstone Boundstone	Wackestone		Packstone Grainstone Boundstone	Grainstone Boundstone
ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS		- Riples - Laminación paralela - Laminación cruzada				Estratificación cruzada
COLOR	- Claro - Oscuro	- Claro	- Claro - Oscuro		Oscuro	- Claro
FÓSILES	Raros	- Abundantes - Comunes - Diversidad de especies - Organismos grandes, pequeños, completos y rotos.	- Abundantes - Comunes - Diversidad de especies - Organismos pequeños (en posición de vida) y completos.		- Abundantes - Comunes - Diversidad de especies - Organismos grandes, completos y rotos.	- Abundantes - Diversidad de especies - Organismos grandes, completos y rotos.
PARTÍCULAS	- Ostrácodos	- Ostrácodos - Estromatolitos - Dasycladacea - Pelets y peloides - Ooides - Miliólidos - Otros foras bent. de amb. restringido. - Gasterópodos	- Ostrácodos - Corales - Ooides - Dasycladacea - Codiacea - Otras algas verdes - Miliólidos - Orbitolinidos - Otros foras bentónicos de ambientes restringidos.	- Gasterópodos - Pelets y peloides	- Estromatolitos - Otras algas verdes - Pelets y peloides - Ooides - Intraclastos - Miliólidos - Otros foras bent. rest. - Gasterópodos - Rudistas	- Pelets y peloides - Ooides - Rudistas - Orbitoideos - Nummulitidos - Otros foras bent. de ambiente restringido

Fig. 5.- Arquitectura de la Plataforma Morelos-Guerrero (Formación Morelos). Las facies y sus componentes identificados en este trabajo corresponden al tracto de plataforma interna. Modificado de Hernández Romano (1999).

PARTÍCULAS NO ESQUELETALES

Peloides. Son granos de carbonato micro y criptocristalino, de origen poligenético, excepto por lo pellets fecales.

Interpretación: éstos se presentan con mayor abundancia en condiciones marinas someras de baja energía. Son comunes en plataformas carbonatadas marinas someras (perimarea y submarea), en arrecifes y en “*mud mounds*”, aunque también son abundantes en carbonatos de aguas profundas.

Intraclastos. Son fragmentos de sedimento litificado o parcialmente litificado, derivado de la erosión de sedimentos penecontemporáneos cercanos a la cuenca y redepositados dentro de la misma área. Otro componente calcáreo similar está representado en los extraclastos, ya que ambos, representan condiciones de retrabajo en la sedimentación. Sin embargo, los litoclastos se consideran como restos de rocas carbonatadas externas a la cuenca depositacional de donde son encontradas (Flügel, 2004). Es decir, mientras que los primeros son formados sindeposicionalmente, los segundos fueron formados anteriormente.

Interpretación: Son comunes en condiciones marinas someras, característicos en regímenes dominados por las olas y mareas que continuamente retrabajan el carbonato. También existen intraclastos originados por desecación del lodo carbonatado, éstos son formados en ambientes de supramarea.

Oncoides. Son granos cubiertos, formados por actividad microbiana. Tienen formas esferoidales concéntricas, a menudo irregulares. Los oncoides se forman mecánicamente por acción del giro o balanceo causado por el oleaje. La laminación concéntrica es resultado de la fijación de sedimentos de grano fino a la superficie mucilagenosa de la materia algal, así como por la precipitación de carbonato derivado del descenso de dióxido de carbono durante la fotosíntesis. Sin embargo, la materia algal (algas rojas, verdes o cianobacterias) no siempre constituye el núcleo de los oncoides. También pueden actuar como organismos

incrustantes los microbios, foraminíferos, briozoarios, moluscos, etc. (Scholle, 2003 y Flügel, 2004)

Interpretación: En general representan condiciones marinas someras debido a la actividad fotosintética de las algas, esto no quiere decir que sean exclusivas de estos ambientes, ya que varios tipos de algas verdes también se desarrollan en ambientes con poca intensidad de luz. Particularmente se pueden formar en una gran variedad de ambientes como lagos, arroyos, pantanos a condiciones marinas de inter y submarea. Para determinar el nivel de energía en que se formaron es necesario correlacionar la textura con el tipo de oncoides, así, para condiciones de alta energía se tendrán texturas de packstone a grainstone con oncoides de tamaños pequeños que exhiban laminación regular; para ambientes con aguas tranquilas se tendrán oncoides micríticos individuales o múltiples con crecimiento irregular en texturas de wackestone y floatstones (Flügel, 2004)

PARTÍCULAS ESQUELETALES

Foraminíferos son protistas heterotróficos, pertenecientes al *phylum Sarcodina* y a la clase *Rhizopoda*. Se dividen en dos grupos principales: foraminíferos bentónicos que viven en o sobre los sedimentos del piso marino y los planctónicos que viven en la parte superior. El grupo principal de foraminíferos observados en este trabajo de tesis es el de los foraminíferos bentónicos. Este grupo está restringido a un rango de profundidad y toleran ciertos grados de temperatura y salinidad (Scholle, 2003 y Flügel, 2004).

Interpretación: Respecto a la salinidad la mayoría se han encontrado en condiciones de salinidad normal (35%), la diversidad decrece conforme disminuye la salinidad. Las bajas salinidades (lagunas costeras) favorecen ensamblajes poco diversos, ricos en formas aglutinadas. Las altas concentraciones de carbonato en aguas hipersalinas favorecen la ocurrencia de miliólidos. Ambientes someros

cercanos a la costa y lagunares, con menos de 50 m de profundidad están caracterizados por la presencia de foraminíferos miliolínidos. Los Rotalínidos hialinos ocurren en aguas someras y profundas. Las testas aglutinadas son comunes sobre el talud pero también pueden presentarse a varios cientos de profundidad. En plataforma externa dominan las especies de rotálidos perforados. En la zona batial tienden a predominar los foraminíferos aglutinados de formas biseriales y triseriales, con algunos rotálidos hialinos y miliólidos porcelanáceos. La mayoría de las clases de estos organismos ocurre en áreas de concentración normal de oxígeno. Muchos foraminíferos están limitados a la zona fótica por sus relaciones endosimbióticas (Scholle, 2003 y Flügel, 2004).

Moluscos, este phylum es muy numeroso y existen gran diversidad de especies. Las clases Bivalvia y Gastropoda son las principales que conciernen a este trabajo. Los bivalvos-rudistas tienen importancia por ser índices stratigráficos (Jurásico Superior-Cretácico Superior) y ecológicos. Los requiénidos (Género: *Toucasia*), caprínidos, dicerátidos son una parte de las numerosas familias, *Chondrodonta* es una especie importante del Orden Pterioidea (Buitrón, 1998). La Familia Nerineidae (Jurásico-Reciente) es una de las numerosas familias de Gasterópodos, son importantes en este trabajo porque representan una facies característica de la parte superior de la columna stratigráfica en campo. Es común encontrar esta asociación en el Cretácico de todo el mundo.

Interpretación: Los rudistas vivieron en ambientes tropicales. Tanto rudistas como nerineidos vivieron cerca de los arrecifes, formaron parte de ellos o los constituyeron completamente, algunos rudistas también eran gregarios. Los grupos de rudistas se extendían desde las áreas protegidas en una plataforma, hasta las abiertas o incluso hasta los márgenes de ésta, donde producían enormes cantidades de arenas bioclásticas de rudistas. La agrupación de estos organismos favorecía la formación de extensos cinturones arrecifales. Respecto a los gasterópodos, se les encuentra en ambientes bastante amplios, desde

terrestres, marinos y acuícolas (aguas dulces?) ya que están adaptados a un rango amplio de temperatura y profundidad (Buitrón, 1998).

Ostrácodos. Son artrópodos crustáceos bivalvos que van del tamaño de mm hasta cm. Este grupo es usado en bioestratigrafía para analizar sedimentos marinos y no marinos. Los caparazones calcíticos son comunes en calizas lacustres del Mesozoico y Cenozoico (Scholle, 2003 y Flügel, 2004).

Interpretación: Ocurren prácticamente en todos los ambientes acuáticos.

Estromatolitos. Son un tipo de depósito organosedimentario controlado por comunidades microbiales bentónicas (Riding, 2000), cuya característica principal es la laminación. La formación de estromatolitos es favorecida por el aporte regular e incluso ordenado de sedimentos en tiempo y espacio sobre superficies colonizadas por las capas de microbios. Los estromatolitos aglutinados (Riding, 1991) resultan de la captura e incrustación de partículas de sedimento.

Interpretación: Ocurren en planicies de marea (intermarea y submarea) y márgenes lagunares. Estos junto con los organismos incrustados se utilizan para la interpretación de paleoambientes y para determinar controles que rodearon su formación como: cantidad de nutrientes, de luz, energía del agua, y profundidad.

4.4 TIPOS Y DESCRIPCIÓN DE FACIES SEDIMENTARIAS DE LA FORMACIÓN MORELOS

Se identificaron 10 facies de la Formación Morelos en el área de estudio y la Tabla 4.4 presenta un resumen de las características de esas facies. A continuación se describen cada una de ellas.

No.	FACIES	ESCALA DE AFLORAMIENTO			ESCALA MICROSCÓPICA		
		COLOR	ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS Y/O RASGOS DISTINTIVOS	ESPESOR DEL ESTRATO	COMPONENTES CALCÁREOS ORGÁNICOS	COMPONENTES CALCÁREOS INORGÁNICOS	AMBIENTE
1	Boundstone de estromatolitos	gris claro	criptolaminitas de cianobacterias	Delgados (20 a 30 cm)	Estromatolitos	Peloides	Supramarea - Intermarea
2	Wackestone de oncoides	gris intermedio	-	?	oncoides	-	
3	Boundstone de toucasias	gris claro	Abundantes rudistas (toucasias)	Gruesos (80 cm)	Fragmentos de toucaseas, escasos foraminíferos bentónicos	Peloides	Submarea somera (Laguna)
4	Boundstone de <i>chondrodonta</i> y rudistas	gris intermedio	Bioestromas de <i>chondrodonta</i> y rudistas	Delgados (horizontes) a masivos (35 a 110 cm)	Fragmentos de <i>chondrodonta</i> y rudistas	Peloides	
5	Packstone - grainstone de nerineas y peloides	gris claro	Abundantes nerineas	Gruesos a masivos (60 a 180 cm)	Fragmentos de nerineas	Peloides	
6	Grainstone de intraclastos, bioclastos y peloides	gris claro	Escasos macrofósiles silicificados (rudistas)	Delgados a masivos (20 a 140 cm)	Foraminíferos bentónicos y fragmentos de rudistas	Intraclastos	
7	Wackestone - packstone de intraclastos, bioclastos y peloides	gris claro	Bioturbación incipiente. Escasos macrofósiles silicificados	Delgados a masivos (35 a 100 cm)	Foraminíferos bentónicos y fragmentos de rudistas, ostrácodos y traza de algas verdes	Intraclastos y peloides	
8	Mudstone - Wackestone de bioclastos	gris claro	-	Delgados a masivos (30 a 110 cm)	Escasos bioclastos que consisten de foraminíferos bentónicos y fragmentos de moluscos (rudistas) y ostrácodos	-	
9	Wackestone - packstone de bioclastos y peloides	gris intermedio	Bioturbación. Escasos macrofósiles silicificados (rudistas y gasterópodos)	Medianos a masivos (70 a 110 cm)	Foraminíferos bentónicos y fragmentos de moluscos (rudistas, <i>chondrodonta</i> y otros gasterópodos), ostrácodos y traza de algas verdes	Peloides	
10	Packstone - grainstone de bioclastos y peloides\pellets	gris intermedio a gris oscuro	Bioturbación. Abundantes macrofósiles (rudistas y nerineas) silicificados	Medianos a masivos (60 a 110 cm)	Foraminíferos bentónicos y fragmentos de moluscos (rudistas, <i>chondrodonta</i> y otros gasterópodos) y ostrácodos.	Pellets/peloides	

Tabla 4.4. Resumen y principales características de las Facies identificadas en el Anticlinal Cuachi de la Formación Morelos.

Facies 1. Boundstone de estromatolitos

Esta facies se caracteriza por la presencia de criptoalgalaminillas. En campo se identifica por la estructura sedimentaria de criptolaminitas de cianobacteria de color gris claro, estas facies se presentan en estratos delgados de 20 a 30 cm (Figs. 4.6A y 4.6B). Frecuentemente estos estratos contienen o están delimitados por intercalaciones muy delgadas (pocos centímetros de espesor) de tobas de

color pardo rojizo (Fig. 4.6B). Esta facies comúnmente se encuentra en la cima de ciclos sedimentarios de perimarea que se somerizan verticalmente. En lámina delgada se observa que esta facies consiste de criptoalgalaminillas irregulares intercaladas con láminas de textura de packstone a grainstone de peloides, y en menor proporción wackestone a packstone de peloides (Figs. 4.6C, 4.6D y 4.6E). En algunos casos las criptoalgalaminillas tienden a ser horizontales (Fig. 4.6F). Las láminas microbianas consisten de micrita de color oscuro de forma irregular. En las láminas de packstone y grainstone el material que une a los peloides es micrita y/o cementante de ortoesparita (calcita en bloque). Se observan escasos bioclastos mal conservados que consisten de fragmentos de rudistas; ostrácodos completos o como testas individuales y traza de foraminíferos bentónicos. Las estructuras fenestrales son comunes en esta facies.

Interpretación: Esta facies fue asignada a un ambiente de intermarea superior - supramarea por la presencia de la laminación irregular microbiana. Las láminas son el resultado de la actividad de las cianobacterias que al atrapar y fijar el sedimento forman estas estructuras orgánicas laminares (estromatolitos). La poca diversidad de organismos indica un ambiente con condiciones adversas debido posiblemente a una exposición regular a condiciones subaéreas o condiciones hipersalinas. El hecho de que estos estromatolitos se encuentren en la cima de los ciclos carbonatados sugiere que corresponden a la parte más somera de dichos ciclos a causa de la progradación de las facies de supramarea sobre facies de intermarea/lagunar.

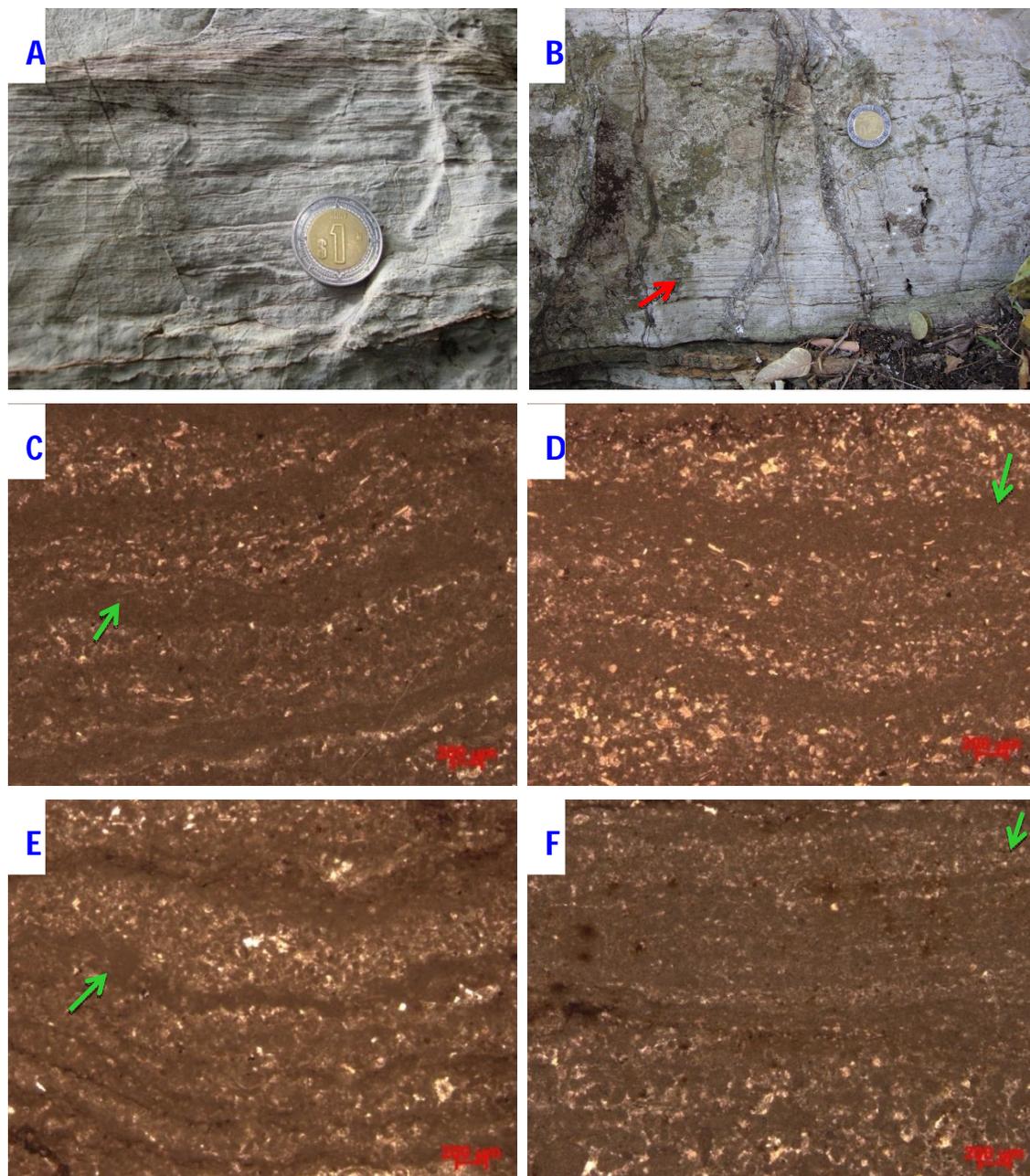


FIG. 4.6. Facies 1: Boundstone de estromatolitos. (A) y (B) Foto de afloramiento de la facies 1 Boundstone de estromatolitos; sobresalen laminaciones microbianas y horizonte tobáceo (flecha). C-29 y C-6 respectivamente. (C), (D), (E) y (F) Fotomicrografías de la Facies 1: Boundstone de estromatolitos. Consisten de láminas irregulares de cianobacterias alternando con láminas de textura de packstone/grainstone de peloides y escasos bioclastos. Las flechas verdes señalan las laminillas algáceas que denotan el crecimiento orgánico de esta facies. Todas las fotomicrografías fueron tomadas con nicoles paralelos y un objetivo de 2.5x.

Facies 2. Wackestone de oncoides

Esta facies se caracteriza por la presencia de oncoides de 0.5 a 1 cm de diámetro contenidos en una matriz de lodo calcáreo. Se presentan en capas delgadas de color gris intermedio. Los oncoides presentan un crecimiento irregular. En lámina delgada esta facies contiene oncoides flotando en una matriz micrítica, en algunos casos se observan fragmentos de moluscos como núcleos del grano envuelto, también es frecuente la presencia de laminación concéntrica irregular en estas estructuras. La matriz contiene escasos fragmentos de rudistas y foraminíferos bentónicos (Fig. 4.7).

Interpretación: La presencia de los oncoides, formados por actividad microbial, indica condiciones someras que permitieran realizar la fotosíntesis. La presencia de los oncoides y el contenido de lodo calcáreo indican condiciones de baja energía. Se interpretan como facies de aguas someras debido a que se asocian con la actividad microbial que originó el grano envuelto y a la presencia de pocos foraminíferos bentónicos. Se considera que se depositaron y desarrollaron en un ambiente de supramarea a intermarea.

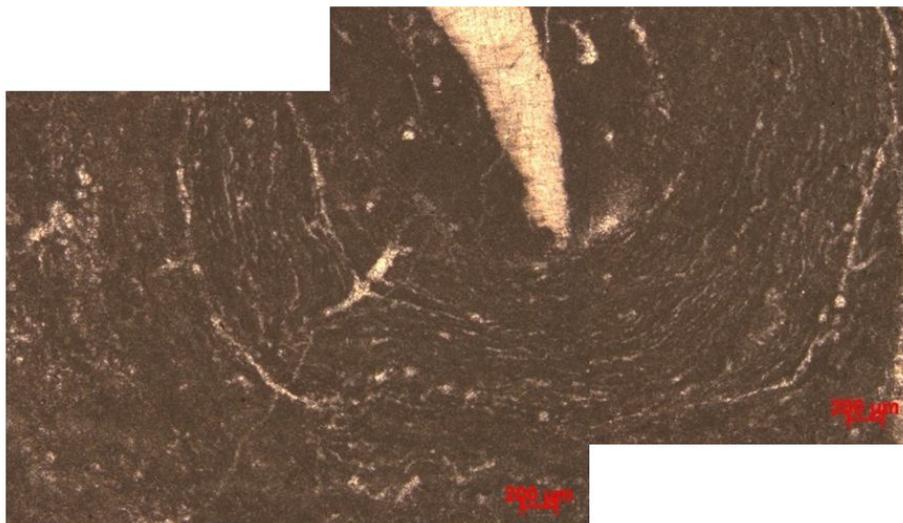


FIG.4.7. Facies 2: Wackestone de oncoides. Fotomicrografía de la Muestra A-49. Oncoide con núcleo de fragmento de rudista. Note laminación irregular. Nicles paralelos y objetivo de 2.5x.

Facies 3. Boundstone de toucasias

Esta facies caracteriza por la abundancia de toucasias completas en una matriz de packstone a grainstone de peloides. En escala de afloramiento se caracteriza por la abundancia de macrofósiles completos de rudistas del género *Toucasia*. Las capas presentan color gris claro y estratificación gruesa (80 cm). Se observa fracturamiento intermedio en esta facies (Fig. 4.8). Esta facies comúnmente se encuentra en la cima de ciclos sedimentarios de submarea que se somerizan verticalmente. En lámina delgada la matriz de la Facies 3: Boundstone de toucasias varía de packstone a grainstone de peloides y bioclastos. Los bioclastos consisten de fragmentos de toucasias y escasos foraminíferos bentónicos biseriales (lituólidos). En la matriz, el material que une a los componentes calcáreos consiste de micrita y/o cementante de ortoesparita (calcita en bloque).

Interpretación: Por las características, principalmente en escala de afloramiento, se infiere que esta facies se depositó en un ambiente de submarea somera. Probablemente estos organismos formaron biostromas, sin embargo por la pobre exposición de la facies no es posible determinar con seguridad esta característica. Probablemente condiciones de baja energía (áreas protegidas en una plataforma) en el ambiente de depósito permitieron la conservación completa e *in situ* de estos organismos.



Fig. 8. Foto de afloramiento de la facies 3: Boundstone de toucasias. Note la abundancia de los macrofósiles.

Facies 4. Boundstone de *chondrodonta* y rudistas

La facies 4: Boundstone de *chondrodonta* y rudistas se caracteriza por la abundancia de macrofósiles principalmente *chondrodonta* en una matriz de packstone de peloides y bioclastos. En afloramiento esta facies se identifica por la abundancia de macrofósiles completos de *chondrodonta* y menor cantidad de rudistas. Es común que esta facies se presente como bioestromas delgados de 10 a 35 cm (Figs. 4.9A Y 4.9B), sin embargo también se registran boundstones de *chondrodonta* y rudistas en estratos masivos de 95 a 135 cm. Esta facies comúnmente se encuentra en la cima de ciclos sedimentarios de submarea que se somerizan verticalmente. En lámina delgada se observa que la matriz de la facies 4: Boundstone de *chondrodonta* y rudistas varía de packstone a grainstone de peloides y bioclastos. Los bioclastos consisten de abundantes fragmentos de *chondrodonta* y rudistas en menor cantidad. En la matriz, el material que une a los componentes calcáreos consiste de micrita y/o cementante de ortoesparita (calcita en bloque).

Interpretación: Se infiere que la facies 4: Boundstone de *chondrodonta* y rudistas se depositó en un ambiente de submarea somera debido principalmente a sus rasgos en afloramiento. Por su geometría, se infiere que estos organismos formaron biostromas y biohermas en las cima de la secuencias carbonatadas. Probablemente condiciones de baja energía (áreas protegidas en una plataforma) en el ambiente de depósito permitieron la conservación completa e *in situ* de estos organismos.



FIG. 4.9. Foto de afloramiento de la facies 4. Boundstone de *chondrodonta* y rudistas. A) Base de la capa calcárea donde se observan abundantes fósiles de *chondrodonta* y escasos rudistas. B) Biostroma: Boundstone de *chondrodonta* y rudistas.

Facies 5: Packstone - grainstone de nerineas y peloides

En escala de afloramiento esta se caracteriza por la presencia de macrofósiles silicificados de nerineas (Fig. 4.10A Y 4.10B). Esta facies se presentan en estratos tanto delgados como masivos (30 a 180 cm) de color gris intermedio. En la columna estratigráfica medida, esta facies corresponde a las capas más jóvenes que coronan los últimos ciclos sedimentarios de submarea. En lámina delgada la facies 5: Packstone - grainstone de nerineas y peloides contiene fragmentos de nerineas y abundantes peloides. Los fragmentos de nerineas se presentan como poros móldicos obliterados por calcita en bloque. En la matriz, la micrita y/o la calcita en bloque cementan a los componentes calcáreos.

Interpretación: Debido a que los fósiles de nerineas no se encuentran en posición de crecimiento ni formando estructuras orgánicas (biostromas o biohermas), se infiere que fueron arrastrados a corta distancia de una parche arrecifal, posiblemente del borde de la plataforma. Las texturas de packstone y grainstone presentes en estas facies corresponden a condiciones de alta energía. Por su posición estratigráfica (estratos más jóvenes) se concluye que estas facies se

depositaron en la cima de los últimos ciclos sedimentarios de submarea. Por todos estos rasgos, se infiere que facies 5: Packstone - grainstone de nerineas y peloides se depositó en ambiente de submarea somera, en una zona semi protegida, con condiciones de alta energía.



FIG. 4.10. Fotos de afloramiento de la facies 5: Packstone - grainstone de nerineas y peloides. Note la cantidad de fósiles de nerineas.

Facies 6. Grainstone de intraclastos, bioclastos y peloides

Esta facies se caracteriza por la textura de grainstone y en menor proporción de packstone de intraclastos y bioclastos. En campo, los estratos se observan de color gris claro, con espesores delgados a masivos (20 a 140 cm). En ocasiones los estratos están delimitados por planos estilolíticos u horizontes tobáceos de pocos cm de espesor. Contienen escasos macrofósiles de gasterópodos silicificados (Figs. 4.11A y 4.11B). En lámina delgada esta facies consiste de abundantes intraclastos, comunes bioclastos y peloides unidos por cemento de calcita en bloque (ortoesparita) (Figs. 4.11C, 4.11D, 4.11E y 4.11F). Los intraclastos exhiben texturas lodosoportadas, son subangulosos a redondeados y su tamaño va de 2 a 8 mm (Fig. 4.9D). Respecto a las partículas esqueléticas, son más abundantes y

diversas que en las facies previamente descritas; consisten de fragmentos de rudistas y foraminíferos bentónicos espirales y biseriales (lituólidos y rotálidos), escasas valvas de ostrácodos y traza de algas rojas coralináceas. En general, los bioclastos se conservan en buen estado, los hay completos e incompletos. Algunos fragmentos de rudistas son superiores a los 2 mm (Figs. 4.11C y 4.11D).

Interpretación: La asociación de partículas esqueléticas y no esqueléticas en estas facies indica un ambiente marino muy somero. Esta facies corresponde a un cuerpo de arena carbonatada acumulado en el interior de la plataforma (posiblemente laguna), los bioclastos fueron derivados de posibles aparatos arrecifales de rudistas y transportados hacia la laguna por corrientes, algunos organismos posiblemente representan fauna bentónica (foraminíferos); mientras que los intraclastos aparentemente fueron arrancados de facies cementadas tempranamente.

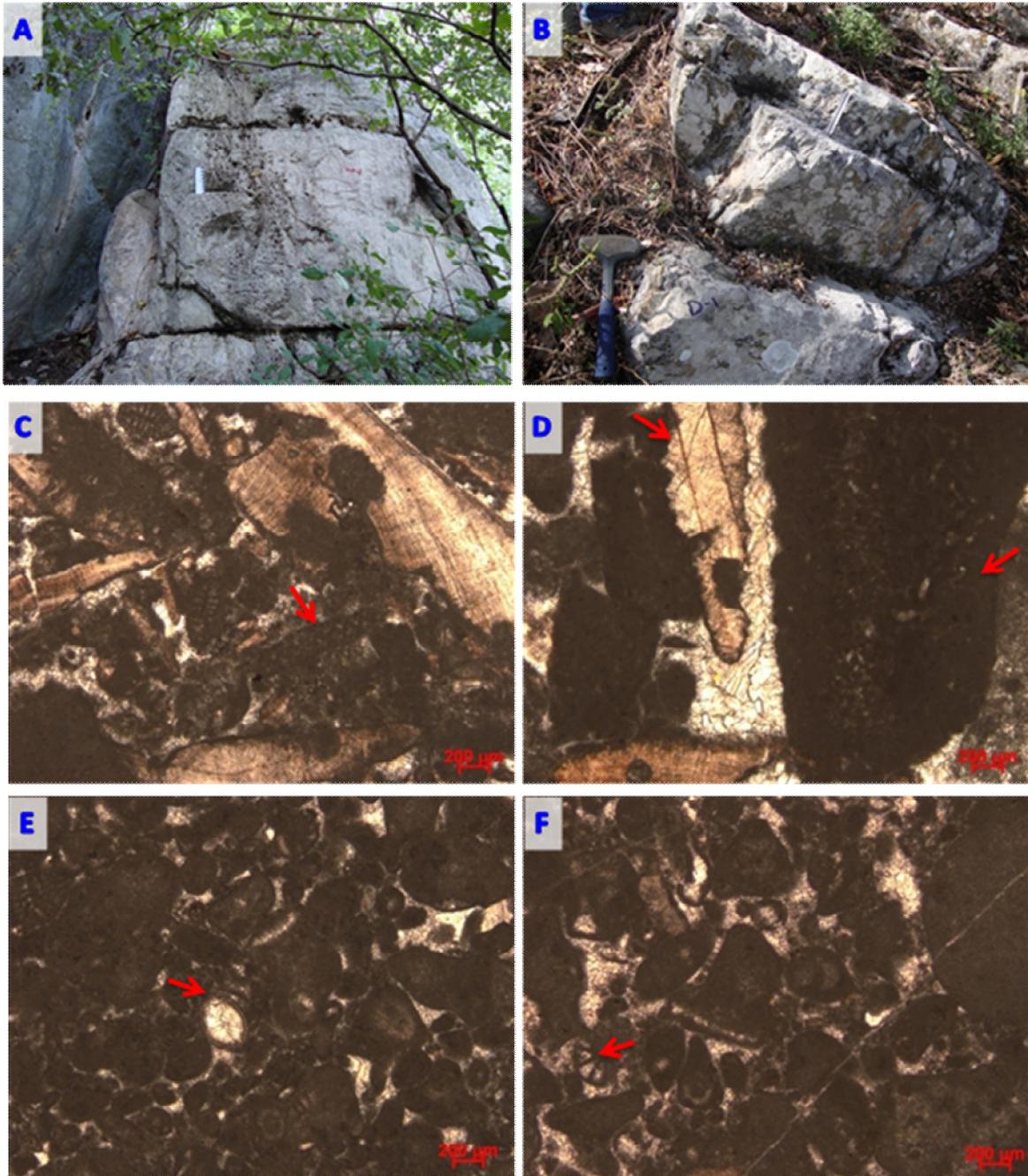


FIG. 4.11. Facies 6: Grainstone de intraclastos, bioclastos y peloides. (A) y (B) Foto de afloramiento donde se muestra estratificación delgada a gruesa. C-7, D-1 y D-2 respectivamente. (C), (D), (E) y (F) Fotomicrografías de la Facies 1: Grainstone de intraclastos, bioclastos y peloides. (C) Abundantes foraminíferos bentónicos biseriales (Lituólidos) (flecha). (D) Intraclasto de textura lodosoportada y fragmento de rudista (flechas). (E) Ostrácodo articulado, obliterado con calcita en bloque. (F) Foraminíferos bentónicos espirales. Todas las fotomicrografías fueron tomadas con nicoles paralelos y un objetivo de 2.5x.

Facies 7. Wackestone - Packstone de intraclastos, bioclastos y peloides

Estas facies se caracteriza por la abundancia de intraclastos, bioclastos y peloides en matriz lodosoportada. En afloramiento estas facies se presentan en estratos delgados a gruesos (35 – 100 cm), de color gris claro. Normalmente contienen horizontes tobáceos de pocos cm de espesor y/o planos estilolíticos paralelos a la estratificación (Fig. 4.12A). En algunos casos estos planos estilolíticos representan la base y/o cima de los estratos (Fig. 4.12C). Esta facies también presenta escasos macrofósiles silicificados de rudistas (Fig. 4.12B) y bioturbación incipiente. En lámina delgada se observan principalmente intraclastos, peloides y partículas esqueléticas en una matriz micrítica (en algunos casos el lodo calcáreo se observa parcialmente recristalizado a esparita fina) (Figs. 4.12E, 4.12F, 4.12G y 4.12H). Los intraclastos son abundantes, presentan textura lodosoportada (mudstone) y varían en tamaño de 1 a 2 mm, son subredondeados a angulosos; ocasionalmente se observan litoclastos de grainstone de peloides y grainstone de fragmentos de rudistas. Los peloides se presentan comúnmente. En cuanto al contenido bioclástico, se observa mayor cantidad y diversidad, y consiste principalmente de foraminíferos bentónicos (miliólidos, lituólidos, rotálidos), fragmentos de moluscos (rudistas y pocos gasterópodos), ostrácodos y traza de algas verdes calcáreas y algas rojas coralináceas (solenoporaceas) (Fig. 4.12E).

Interpretación: La abundancia de intraclastos y de bioclastos (incluida su diversidad) indica condiciones marinas someras. El contenido de lodo calcáreo sugiere condiciones de no muy alta energía, aunque de alguna manera los intraclastos debieron haberse formado posiblemente por la acción del oleaje (normal o asociado a mareas o tormentas) y eventualmente transportados hacia el interior de la plataforma. La cantidad de fragmentos de rudistas probablemente derivaron de un parche arrecifal o una barrera bioclástica cercana. Por lo que esta facies también se interpreta como un depósito lagunar semi-restringido.

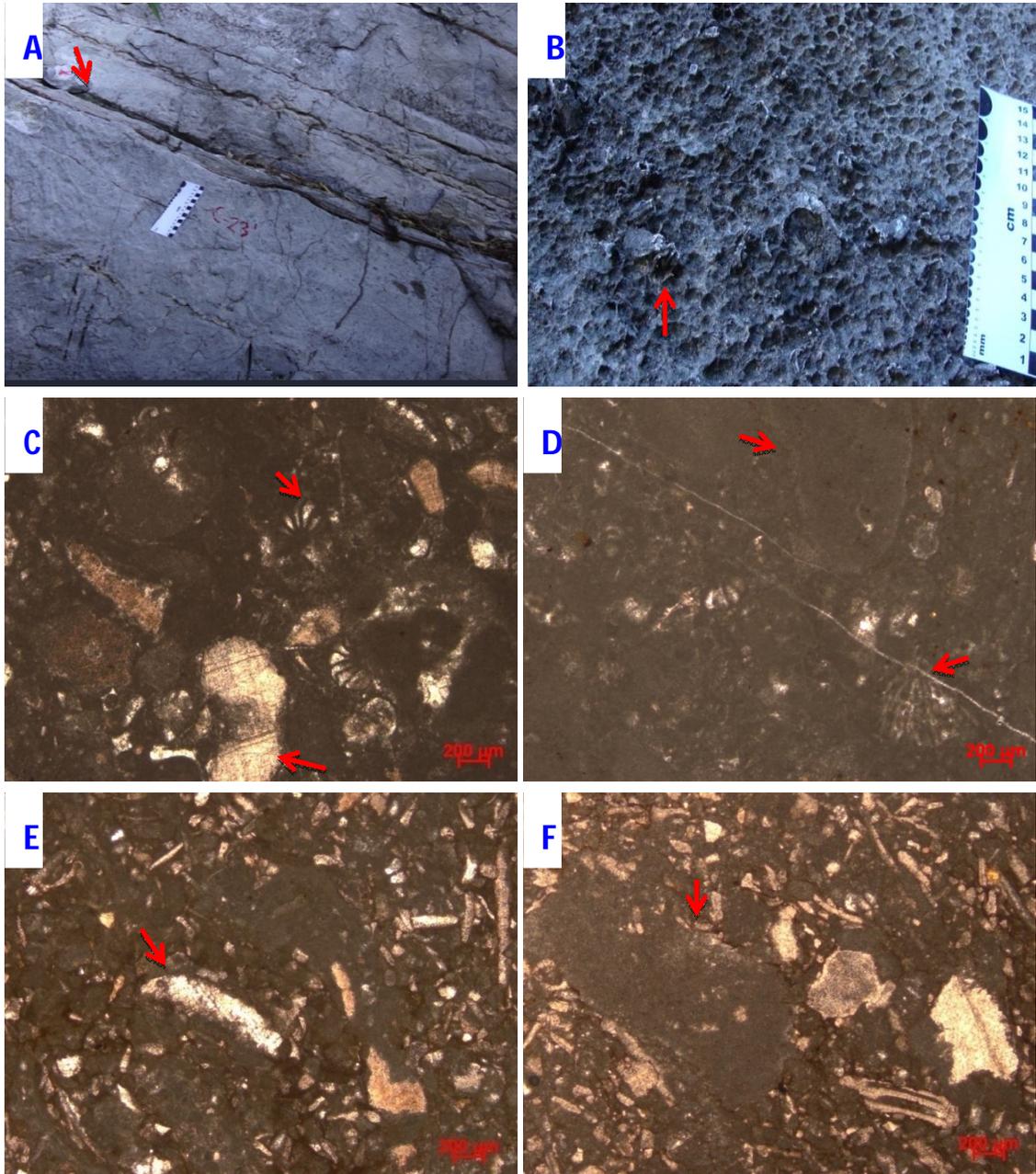


FIG. 4.12. Facies 7: Wackestone-packstone de intraclastos, bioclastos y peloides. (A) y (B), Fotos de afloramiento de esta facies. Estratificación delgada a gruesa. (A) Muestra: C-23'. Abundantes horizontes tobáceos de escala milimétrica. (B) Muestra: C-32. Estrato muy cubierto por una capa negruzca moderna de microbios, sin embargo, se observan fragmentos de rudistas silicificados (flechas). (C), (D), (E) y (F) Fotomicrografías de la facies 7: Wackestone-packstone intraclastos, bioclastos y peloides; tomadas con nicoles paralelos y un objetivo de 2.5x. En general se observan los componentes principales de esta facies: intraclastos, bioclastos (foraminíferos bentónicos y fragmentos de rudistas) y peloides, estos elementos están señalados con flechas en las fotomicrografías.

Facies 8. Mudstone - wackestone de bioclastos.

Esta facies consiste de una textura lodosoportada con escasos bioclastos. En afloramiento esta facies presenta estratificación delgada a gruesa (30 - 110 cm), color gris claro. Es frecuente que estas facies se presenten en estratos delimitados por horizontes estilolíticos u horizontes tobáceos (Figs. 4.13A y 4.13B). En algunas ocasiones esta facies en afloramiento presenta intenso fracturamiento (Fig. 4.13B). En lámina delgada la textura de esta facies varía de mudstone o wackestone de bioclastos, domina la matriz de micrita, sin embargo, en algunos casos el lodo calcáreo se observa parcialmente recristalizado a esparita fina; ocasionalmente se presentan intraclastos y peloides (Figs. 4.13C, 4.13D, 4.13E y 4.13F). Respecto al contenido bioclástico, se observa que mantiene la misma diversidad que en las facies anteriormente descritas, aunque es evidente que en esta facies se presentan en menor cantidad. Estas partículas esqueléticas consisten de fragmentos de moluscos (rudistas y ocasionalmente gasterópodos), foraminíferos bentónicos (miliólidos, lituólidos y rotálidos) y ostrácodos completos y desarticulados. Aunque los foraminíferos bentónicos y los fragmentos de moluscos son los componentes esqueléticos principales en esta facies, no siempre se presentan juntos, es común que en algunas láminas se observe únicamente uno de estos grupos.

Interpretación: La textura depositacional (mudstone a wackestone) y la asociación fósil indican condiciones de submarea somera. El depósito de lodo calcáreo indica ambientes de muy baja energía perturbados únicamente por organismos barrenadores. La presencia de fragmentos de rudistas indica transporte desde su ambiente original hasta el interior de la plataforma. La baja diversidad de los microfósiles sugiere condiciones semi-restringidas en un ambiente lagunar.

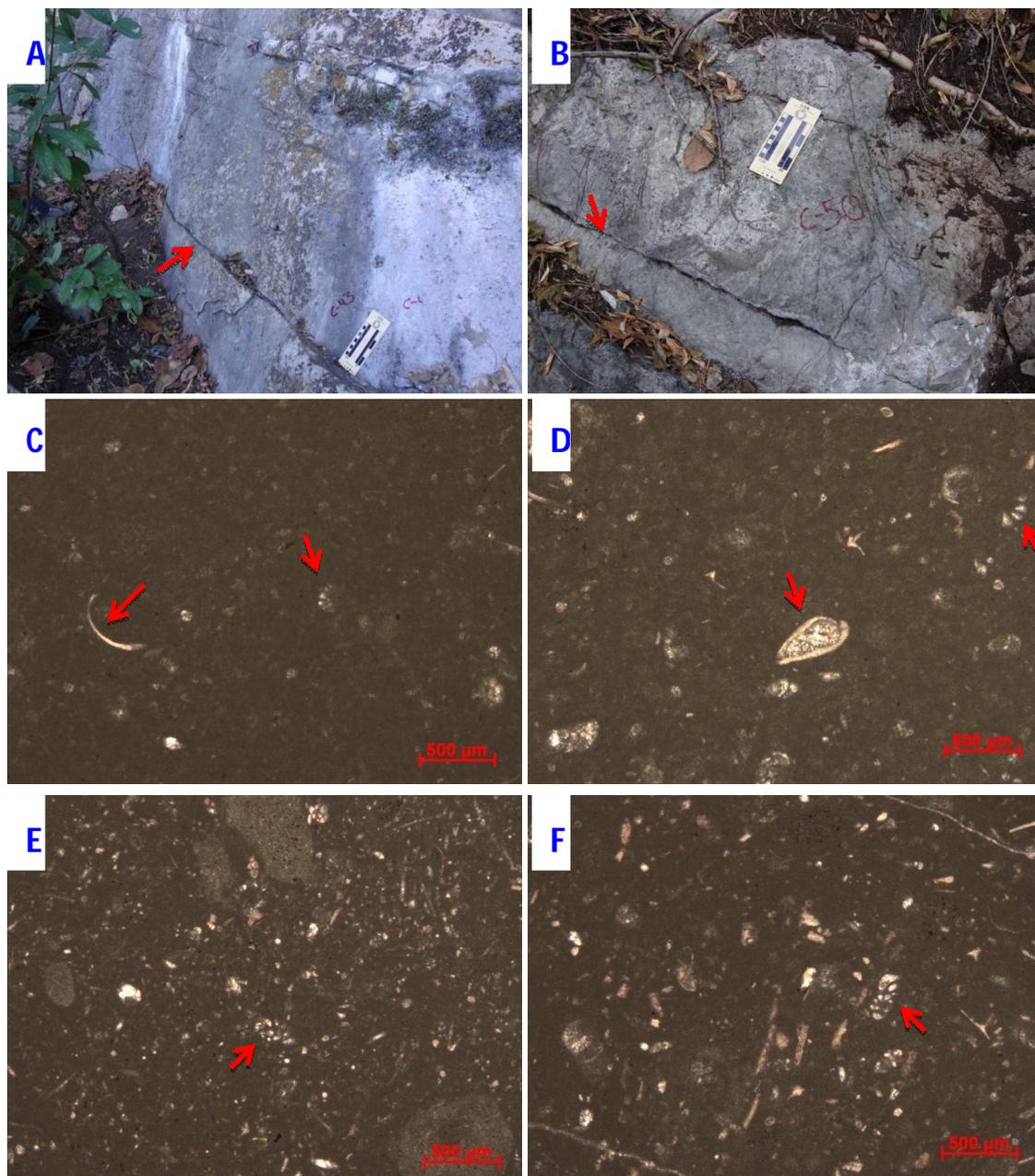


FIG. 4.13. Facies 8: Mudstone a wackestone de bioclastos. (A) y (B) Fotos de afloramiento de la facies de mudstone a wackestone de bioclastos. Nótense los horizontes tobáceos y estilolitas (flechas). C-43 y C-50 respectivamente. (C), (D), (E) y (F) Fotomicrografías de las facies 8: Mudstone a wackestone de bioclastos, tomadas con nicols paralelos y un objetivo de 2.5x. Esta facies consiste principalmente de texturas lodosoportadas con escasos bioclastos. Los bioclastos son foraminíferos bentónicos, fragmentos de moluscos y ostrácodos (flechas).

Facies 9. Wackestone-packstone de bioclastos y peloides.

Esta facies consiste de una textura lodosoportada que varía de wackestone a packstones de bioclastos y peloides. En afloramiento esta facies se presenta en estratos medianos a masivos (70 a 110 cm), color gris intermedio. Estas facies presentan fósiles silicificados de rudistas y *chondrodonta* (Figs. 4.14a y 4.14B). En el microscopio petrográfico esta facies varía de wackestone a packstone de bioclastos y peloides. Predomina la presencia de matriz micrítica, aunque en algunos casos se observa parcialmente recristalizada a esparita fina (microesparita) (Figs. 4.14C y 4.14D). Respecto al contenido bioclástico, esta facies mantiene la misma diversidad que las facies anteriormente descritas, sin embargo en esta los bioclastos son más abundantes. Las partículas esqueléticas consisten de foraminíferos bentónicos (miliólidos, lituólidos y rotálidos) (Figs. 4.14C y 4.14D), fragmentos de moluscos (rudistas, *chondrodonta* y otros gasterópodos y, ostrácodos (articulados y desarticulados) y traza de algas verdes. En general los restos de moluscos se presentan muy mal conservados y en fragmentos finos. La bioturbación también es común en lámina delgada en esta facies.

Interpretación: La asociación de la fauna fósil, la diversidad y la cantidad indican condiciones similares a la facies anterior, sin embargo, en este caso es probable que el ambiente haya estado bajo condiciones más propicias para el desarrollo de la vida marina (mayor cantidad de fauna) ya que se observan fósiles en escala de afloramiento. La cantidad de lodo calcáreo disminuye con respecto a la facies 8: Mudstone a wackestone de bioclastos por lo que se infieren condiciones de mayor energía. Estas características sugieren condiciones depositacionales semi-restringidas en un ambiente lagunar.

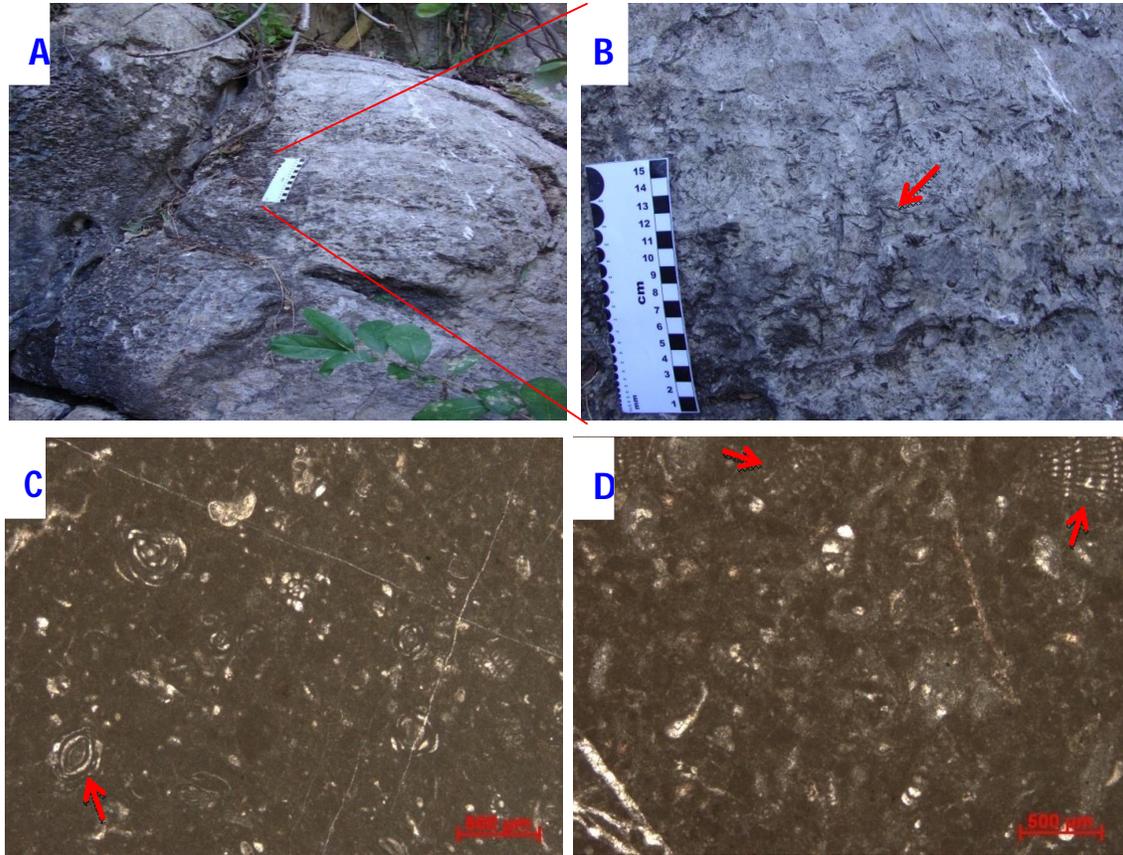


FIG. 4.14. Facies 9: Wackestone-packstone de bioclastos y peloides. (A) y (B) Fotos de afloramiento de la facies 9: Wackestone-packstone de bioclastos y peloides. Muestra C-33. Estrato masivo con abundantes macrofósiles de rudistas y *chondrodonta* silicificados (flechas). (D) y (E) Fotomicrografías de la Facies 9: Wackestone-packstone de bioclastos y peloides. Consisten de texturas lodosoportadas que varían de wackestone a packstone de bioclastos y peloides. Las partículas esqueléticas están señaladas con flechas. Fotomicrografías tomadas con nicols paralelos y un objetivo de 2.5x.

Facies 10. Grainstone - packstone de bioclastos y pellets/ peloides.

Esta facies se define por la textura que varía de packstone a grainstone, con abundantes bioclastos y peloides y/o pellets. En afloramiento estas facies se caracterizan por la abundancia de macrofósiles (tucasias, rudistas, *Chondrodonta* y otros moluscos). Son comunes las capas de rudstones de bioclastos (Fig. 4.15A). Es común observar capas bioturbadas en la textura de packstone de bioclastos y peloides (Fig. 4.15B). Esta facies contiene estilolitas sub-paralelas y/o

oblicuas a la estratificación, principalmente en las rocas de grano fino (Fig. 4.15C). Presentan color gris intermedio a gris oscuro. Esta facies se presenta en estratos medianos a gruesos (60 a 110 cm). En lámina delgada esta facies se caracteriza por la abundancia de bioclastos y peloides (en ocasiones pellets), unidos por una matriz micrítica y/o por cemento de ortoesparita (calcita en bloque). Sin embargo, es común que el lodo calcáreo se observe parcialmente recristalizado a esparita fina (microesparita) (Figs. 4.15D, 4.15E, 4.15F, 4.15G y 4.15H). Esta facies contiene mayor cantidad de bioclastos en relación al resto de las facies descritas. Estas partículas esqueléticas consisten de foraminíferos bentónicos (miliólidos, lituólidos, rotálidos), fragmentos de moluscos (rudistas y gasterópodos) y ostrácodos (articulados y desarticulados). Es frecuente que los fragmentos de moluscos sean mayores a 2 mm (rudstones). Respecto a las partículas no esqueléticas, los peloides son abundantes en esta facies y predominan las formas esféricas probablemente de origen fecal (pellets), sin embargo, frecuentemente exhiben formas irregulares. Intraclastos como los descritos en las facies anteriores se presentan esporádicamente. La bioturbación también es común en lámina delgada en esta facies.

Interpretación: En esta facies es evidente el aumento en la cantidad y diversidad de las partículas esqueléticas, por lo que se propone un ambiente lagunar semi-restringido o no restringido. El hecho de que no se depositara lodo calcáreo y las texturas granosoportadas sugiere ambientes de alta energía. El aumento en la cantidad y tamaño de fragmentos de rudistas probablemente se debe a la cercanía con el ambiente original de estos organismos (probablemente una barrera o parche arrecifal).

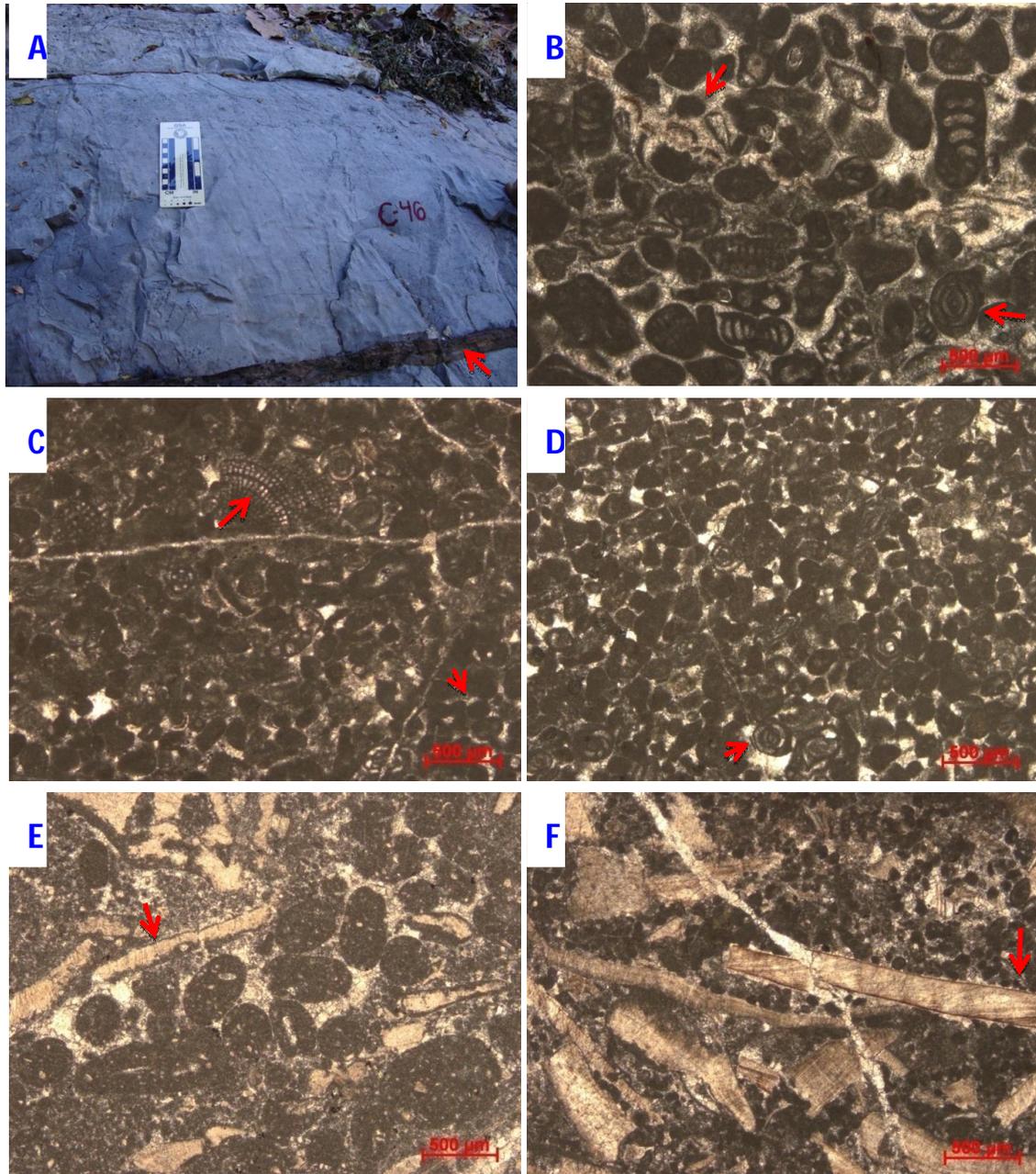


FIG. 4.15. Facies 10: Packstone – grainstone de bioclastos y pellets/peloides. (A) Foto de afloramiento de la facies 7: Packstone – grainstone de bioclastos y pellets/peloides. Muestra C-46. Es común que estas facies se presenten tanto en rocas de grano fino. (B), (C), (D), (E) y (F) Fotomicrografías de la Facies 10: Packstone – grainstone de bioclastos y pellets/peloides. Consisten de texturas granosoportadas (packstone y grainstone) con abundantes bioclastos y peloides (flechas) unidos por una matriz micrítica y/o por cemento de ortoesparita. Todas las fotomicrografías fueron tomadas con nicoles paralelos y un objetivo de 2.5x.

4.5 ASOCIACIÓN DE FACIES

Las diez facies identificadas en la Formación Morelos expuestas en el Anticlinal Cuachi fueron agrupadas en dos asociaciones de facies desarrolladas en un ambiente de plataforma interna. Se proponen la Asociación de Facies de Supramarea-Intermarea y la Asociación de Facies de Submarea (Submarea somera, "laguna" restringida).

Asociación de Facies de Supramarea-Intermarea

Esta asociación consiste de facies características de ambientes de intermarea y supramarea. Las facies 1: Boundstone de estromatolitos y la facies 2: Wackestone de oncoides corresponden a esta asociación de facies. Es común la laminación irregular en las dos facies. Las partículas bioclásticas en general son escasas y consisten principalmente de foraminíferos bentónicos, fragmentos de moluscos y ostrácodos. Las estructuras fenestrales son comunes en esta asociación de facies. No se observa dolomitización en estas facies.

Interpretación: Se infiere que la asociación de facies de Supramarea-Intermarea corresponde a un ambiente de Intermarea-Supramarea. En estas facies la actividad bacteriana es evidente, ya que tanto las criptoalgalaminillas como los oncoides se forman por adhesión y fijación de sedimento provocado por organismos microbianos. Los estromatolitos son estructuras organosedimentarias de tipo estratiformes. Las carpetas estratiformes son indicativas de ambientes de muy baja energía (con protección casi total de la acción de las olas) (Tucker y Wright, 1990). El hecho de que la laminación se haya preservado sugiere la ausencia de organismos bioturbadores, a su vez esto implica condiciones adversas para la actividad orgánica quizá con condiciones regulares de exposición subáerea.

Asociación de Facies de Submarea

Estas facies están representadas por una mezcla de texturas tanto de alta energía (packstones y grainstones) como de baja energía (mudstones y wackestones), además de incluir facies arrecifales. Respecto a las partículas bioclásticas, esta asociación de facies presenta gran abundancia y diversidad. Estos bioclastos incluyen a foraminíferos bentónicos (miliólidos, lituólidos, rotálidos), fragmentos de moluscos (rudistas, *Chondrodonta*, nerineas y otros gasterópodos), ostrácodos y algas coralináceas. Las partículas no esqueléticas presentes incluyen abundantes intraclastos (textura mudstone) y peloides. Con frecuencia los intraclastos son mayores a 2 mm, los peloides frecuentemente presentan formas esféricas. La bioturbación es común en esta asociación de facies. Se presenta raramente dolomitización incipiente.

Interpretación: La cantidad y diversidad de la fauna fósil sugieren condiciones favorables para el desarrollo de la vida marina. Sin embargo la variación de la fauna fósil presente en las facies indica que hubo ciclos con condiciones semi-restringidas o no restringidas donde el desarrollo de foraminíferos fue abundante. En contraste con ciclos más restringidos en donde únicamente se depositaron fragmentos de moluscos (partículas alóctonas). También se observan fluctuaciones del nivel del mar que cambiaban las condiciones de energía del ambiente y en consecuencia las texturas depositadas. Para texturas grano-soportadas se interpreta un nivel de mar bajo, esto implica que el nivel de energía aumentó dentro de la laguna y no permitía la depositación de lodo carbonatado; para texturas lodo-soportadas el nivel de mar era alto, las condiciones energéticas dentro de la laguna eran bajas depositándose gran cantidad de lodo carbonatado. Por lo descrito anteriormente, se determina que el ambiente de depósito fue submarea somera “laguna” restringida, quizá por un banco arrecifal, debido a los fragmentos de moluscos presentes en las diversas facies.

Las facies estudiadas en la Formación Morelos en el anticlinal Cuachi, corresponden a sedimentos depositados en un ambiente somero. En la figura 4.16

se esquematiza el modelo deposicional de las facies de la Formación Morelos durante el Cretácico Medio, inferidos para el área de estudio.

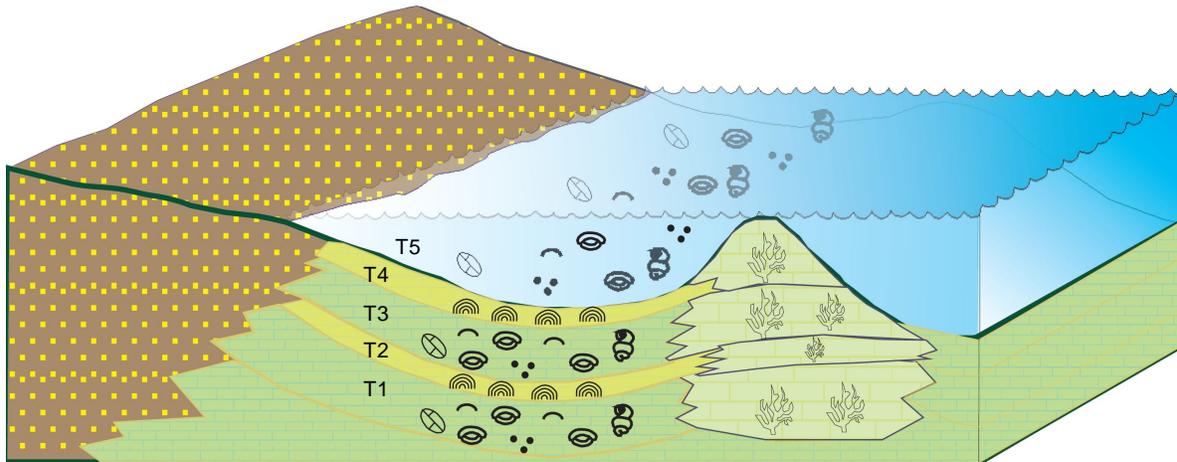


Fig. 4.16. Esquemas inferidos de los modelos deposicionales de las facies de la Formación Morelos en el anticlinal Cuachi durante el Cretácico Medio. El tiempo 1 (T1) así como T3 y T5 representan ambientes de submarea, mientras que T2 y T4 corresponden a ambientes de supra-intermarea.

4.5.1. Ciclos estratigráficos

En la sección medida se presentan secuencias de somerización ascendente como resultado de una progradación. Esto implica la migración hacia el mar de sedimentos de ambientes someros, sobre sedimentos de aguas más profundas en una cuenca sedimentaria (laguna) hasta llenar la cuenca de sedimentos (Tucker y Wright, 1990). Estas secuencias de somerización incluyen ciclos de perimarea y de submarea.

Los ciclos perimareales se caracterizan por la presencia de facies de submarea debajo de facies de intermarea-supramarea, siempre finalizadas con la Facies 1: Boundstone de estromatolitos. La estratificación típica de estos ciclos consiste de

capas delgadas (Facies 1: Boundstone de estromatolitos) a gruesas (Fig. 4.17 y Fig. 4.18).

Los ciclos de submarea consisten de facies de submarea debajo de facies de submarea somera. Las facies que culminan estos ciclos consisten de la facies 3: Boundstone de toucasias y la facies 4: Boundstone de *Chondrodonta* y rudistas, estas facies se identifican por una estratificación delgada. En general los ciclos perimareales se caracterizan por una estratificación gruesa a masiva culminando con capas delgadas (Fig. 4.19). Estos ciclos de somerización indican el ahogamiento periódico de las plataformas por medio de eventos transgresivos (Tucker y Wright, 1990).

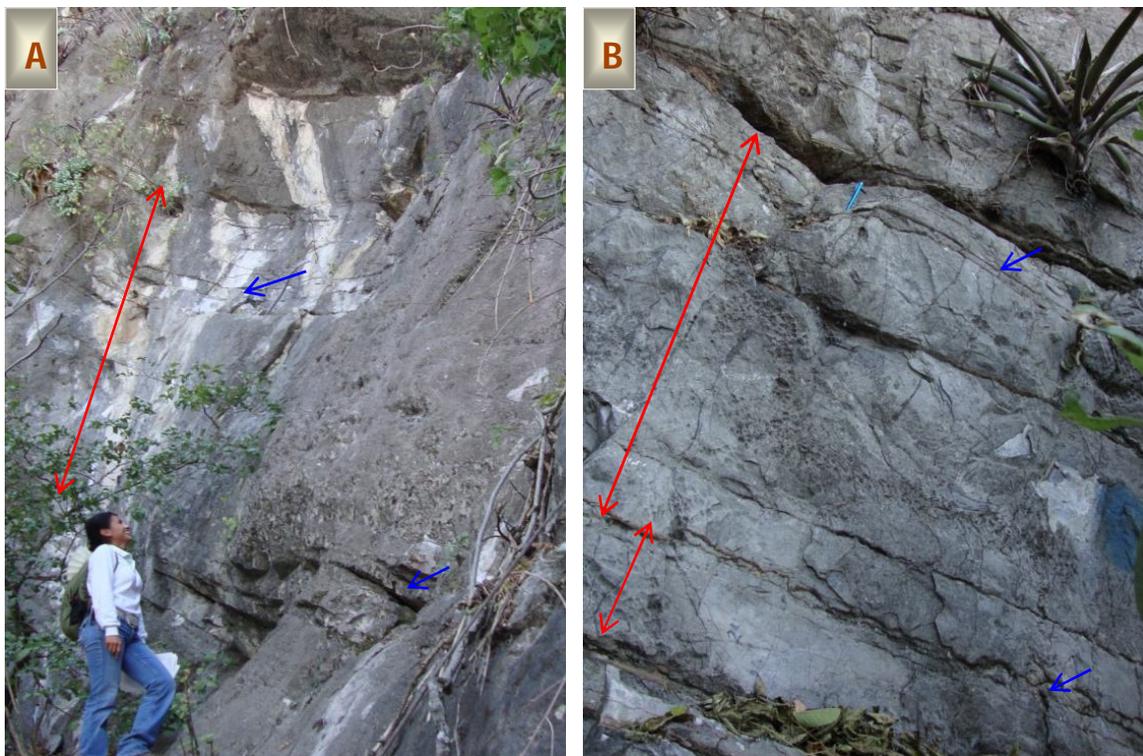


Fig. 17. Fotos de afloramiento de los ciclos estratigráficos de perimarea (flechas rojas). Note la estratificación gruesa a masiva de las facies de submarea, y las capas delgadas de la Facies 1: Boundstone de estromatolitos (flechas azules).

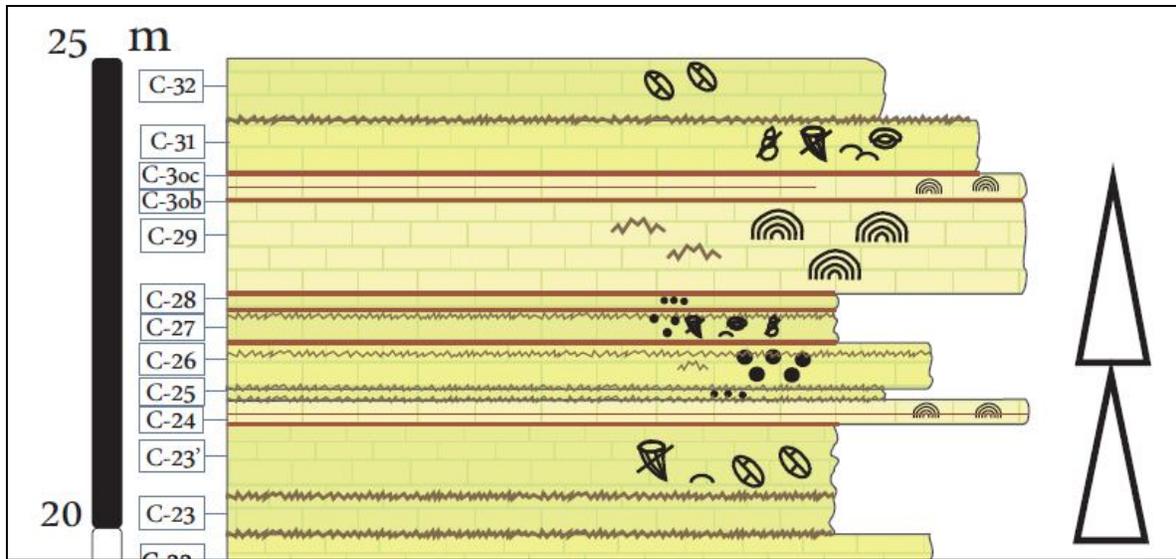


Fig. 4.18. Sección Estratigráfica 2: Ciclos estratigráficos de perimarea. Note la estratificación delgada de las facies que finalizan cada ciclo. Los triángulos representan los ciclos de somerización, la base corresponde con las facies más profundas.

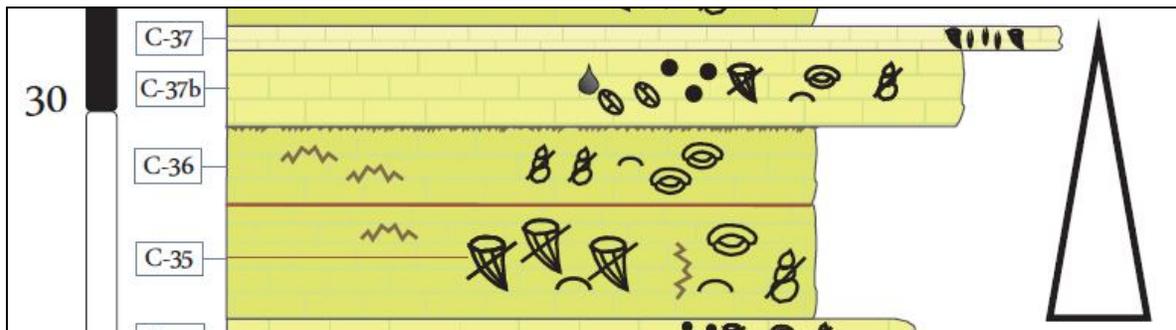


Fig. 4.19. Sección Estratigráfica 2: Ciclos estratigráficos de submarea. Note la estratificación gruesa de facies de submarea, culminando con facies delgadas de Boundstone de Chondrodonta y rudistas. Los triángulos representan los ciclos de somerización, la base corresponde con las facies más profundas.

4.6 PRINCIPALES RASGOS DIAGENÉTICOS EN LAS FACIES DE LA FORMACIÓN MORELOS

Las facies de la Formación Morelos en el Anticlinal Cuachi, presentan diferentes rasgos diagenéticos que sugieren una historia compleja. Estos procesos fueron

analizados en las mismas láminas delgadas utilizadas para el estudio de análisis de facies. La información diagenética se obtuvo únicamente en base al estudio petrográfico. Se mencionarán aquellos procesos más sobresalientes y comunes en estas facies.

4.6.1 Conceptos generales

La diagénesis comprende todos los procesos que afectan al sedimento después del depósito hasta un punto antes del metamorfismo en condiciones de elevadas temperaturas y presiones (Tucker y Wright, 1990). Estos procesos se presentan tanto tempranamente (eodiagénesis), inmediatamente después del depósito durante el sepultamiento de la roca (mesodiagénesis), así como tardíamente, durante su exposición al ambiente vadoso (telodiagénesis). Los procesos diagenéticos de acuerdo a Fuchtbauer (1974), y Folk (1974) se clasifican en destructivos y constructivos. En la tabla 4.5 se resumen algunas características de estos procesos.

4.6.2. Principales rasgos diagenéticos durante la eodiagénesis

Los principales rasgos diagenéticos en esta etapa es el desarrollo de cementos primarios, principalmente en facies soportadas por granos. En ellas se presenta un cemento de calcita isopaca alrededor de los granos sedimentarios (Fig. 4.20A y 4.20B), indicando condiciones marinas. La bioturbación se presenta regularmente en las Facies 7: Wackestone - packstone de bioclastos, intraclastos y peloides y Facies 10: Packstone - grainstone de bioclastos y peloides/pellets. La micritización también es frecuente, principalmente en la Facies 6: Grainstone de intraclastos, bioclastos y peloides y en la Facies 10: Packstone - grainstone de bioclastos y peloides/pellets. En estas facies se observan fragmentos de rudistas perforados, por actividad microbiana (algas endolíticas, bacterias y hongos), esta porosidad intrapartícula posteriormente fue obstruida por micrita (Tucker y Wright, 1990) (Fig. 4.20C). También se presenta frecuentemente en los bordes de los fragmentos de rudistas estos crecimientos micríticos (Fig. 4.20D).

DIAGÉNESIS CONSTRUCTIVA	
ISOQUÍMICA	
Procesos diagenéticos que no alteran la composición química original	
Cementación	Temprana: Alrededor o entre los granos sedimentarios en forma de micrita o en forma acicular (fibroso, espadas, isopaco).
	Tardía: Se forma después de la consolidación del sedimento o compactación bloqueando porosidad primaria inter o intragranular y se presenta en forma granular o en bloques, en mosaico (ortoesparita), o por crecimientos sintaxiales.
Neomorfismo (Folk, 1965)	Recristalización: referido solo al cambio en el tamaño del cristal, sin cambio en la mineralogía. Pueden ser del tipo Coalesivo o agradante y Degradante.
	Inversión: Los procesos de reemplazamiento de un mineral por otro.
Compactación química	Disolución de granos meta-estables por presión litostática, generando superficies tridimensionales de disolución sobre planos menos resistentes a la presión y compactación (estilolitas y costuras de disolución).
Compactación mecánica o física	Produce una reducción en la porosidad y en el espesor de las capas sedimentarias. Incluyen deshidratación y deformación o reorientación de los granos.
ALOQUÍMICA	
Procesos diagenéticos que modifican la composición química original	
Minerales autigénicos	Crecen después del depósito. Incluye tanto minerales de reemplazo como cementantes. Los minerales de reemplazo se forman por una sobresaturación del agua intersticial o de la alteración de granos detríticos primarios (e.g Silicificación).
Dolomitización	El sedimento calcáreo se convierten parcial o totalmente a dolomita, por un reemplazamiento de CaCO ₃ por carbonato magnésico, a través de la acción de un fluido rico en el ion Mg ²⁺ .
Dedolomitización	Es el proceso en el que ocurre el reemplazamiento de dolomita por calcita o disolución y oclusión.
DIAGÉNESIS DESTRUCTIVA	
Degradación o fragmentación del carbonato.	
Actividad biológica	Actividad biológica en el caso de bioturbación o micritización por acción bacteriana.
Actividad mecánica	El rasgo característico es el fracturamiento
Disolución	Lixiviación de minerales inestables, originando porosidad secundaria.

Tabla 4.5. Clasificación de los procesos diagenéticos. Resumen de acuerdo a Fuchtbauer (1974), Millan (1974), Folk (1974) y Scholle (2003).

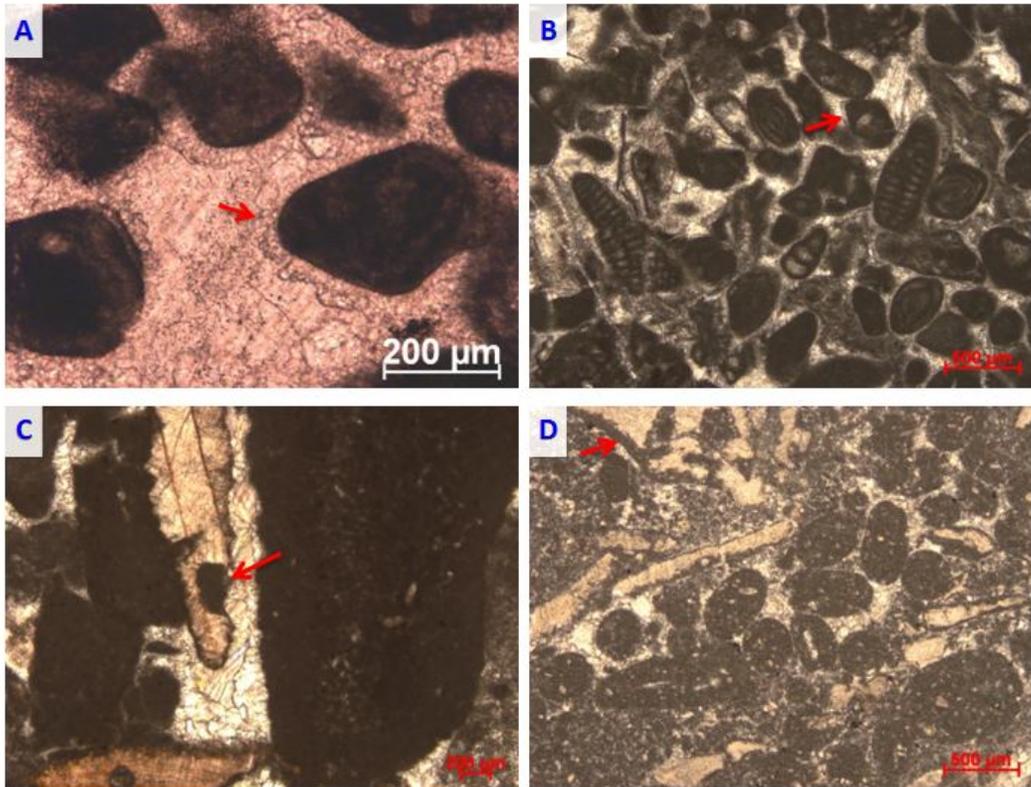


Fig. 4.20. Rasgos o procesos diagenéticos generales observados en la Formación Morelos. A) y B) Cemento de calcita isopaca cubriendo los granos carbonatados (flechas) posiblemente de origen marino somero. C) Fragmentos de rudistas micritizados por actividad de algas endolíticas (flechas), además se distingue fragmentación de algunos intraclastos debido a compactación física temprana. D) Granos esqueléticos fuertemente micritizados en los bordes (flechas) debido a microorganismos. Todas las fotomicrografías fueron tomadas con nicoles paralelos.

4.6.3. Principales rasgos diagenéticos durante la mesodiagénesis

Durante el sepultamiento somero se generaron rasgos diagenéticos evidentes en las rocas de la Formación Morelos. La compactación provocada por la continua depositación de sedimentos sobre los estratos débilmente consolidados originó fracturamiento en los componentes esqueléticos y no esqueléticos, debido a la carga litostática generada por los sedimentos depositados sobre la Formación Morelos (Fig. 4.20C). Estos rasgos de compactación mecánica se observan con

mayor abundancia en los fragmentos de rudistas (Fig. 4.21A). La disolución de la aragonita es común en los fragmentos de moluscos en ambientes profundos y en algunos casos, cuando el ambiente de sepultamiento es más profundo, también la capa calcítica se disuelve generando porosidades móldicas obliteradas con cementos secundarios (calcita en bloque) (Fig. 4.21B).

Durante esta etapa de sepultamiento profundo se inicia un proceso de compactación de tipo químico entre los granos (disolución por presión), produciendo suturas de disolución y estilolitas paralelas a la estratificación (Fig. 4.21C y 4.21D). También en estas condiciones se puede presentar reemplazamiento de algunos componentes carbonatados por sílice, en la figura 4.21E se observa un reemplazamiento incipiente por sílice, posiblemente proveniente de las tobas intercaladas entre las capas calcáreas. Durante la Orogenia Laramide se inició un proceso de plegamiento de la Plataforma Guerrero-Morelos, que generó otro proceso de disolución química, produciendo estilolitas verticales y oblicuas a la estratificación (perpendiculares a los esfuerzos compresivos), también se produjo un intenso fracturamiento en algunas facies (Ver capítulo V). Se identificó dolomitización incipiente, en general, en las facies ricas en lodo calcáreo. Los cristales de dolomita son subhedrales a euhedrales, la dolomita se presentan en forma dispersa (Fig. 4.21G). Durante el sepultamiento también se precipitó cuarzo autigénico con bordes euhedrales (Fig. 4.21H). Este cuarzo autigénico se presenta esporádicamente.

Se presenta posteriormente un proceso de neomorfismo de la roca, el neomorfismo es probablemente el rasgo diagenético más frecuente en las facies estudiadas en este trabajo en la Formación Morelos. Este proceso de recristalización es atribuido principalmente a la cercanía de la roca con cuerpos ígneos, Intrusivos Terciarios (Fig. 4.21F).

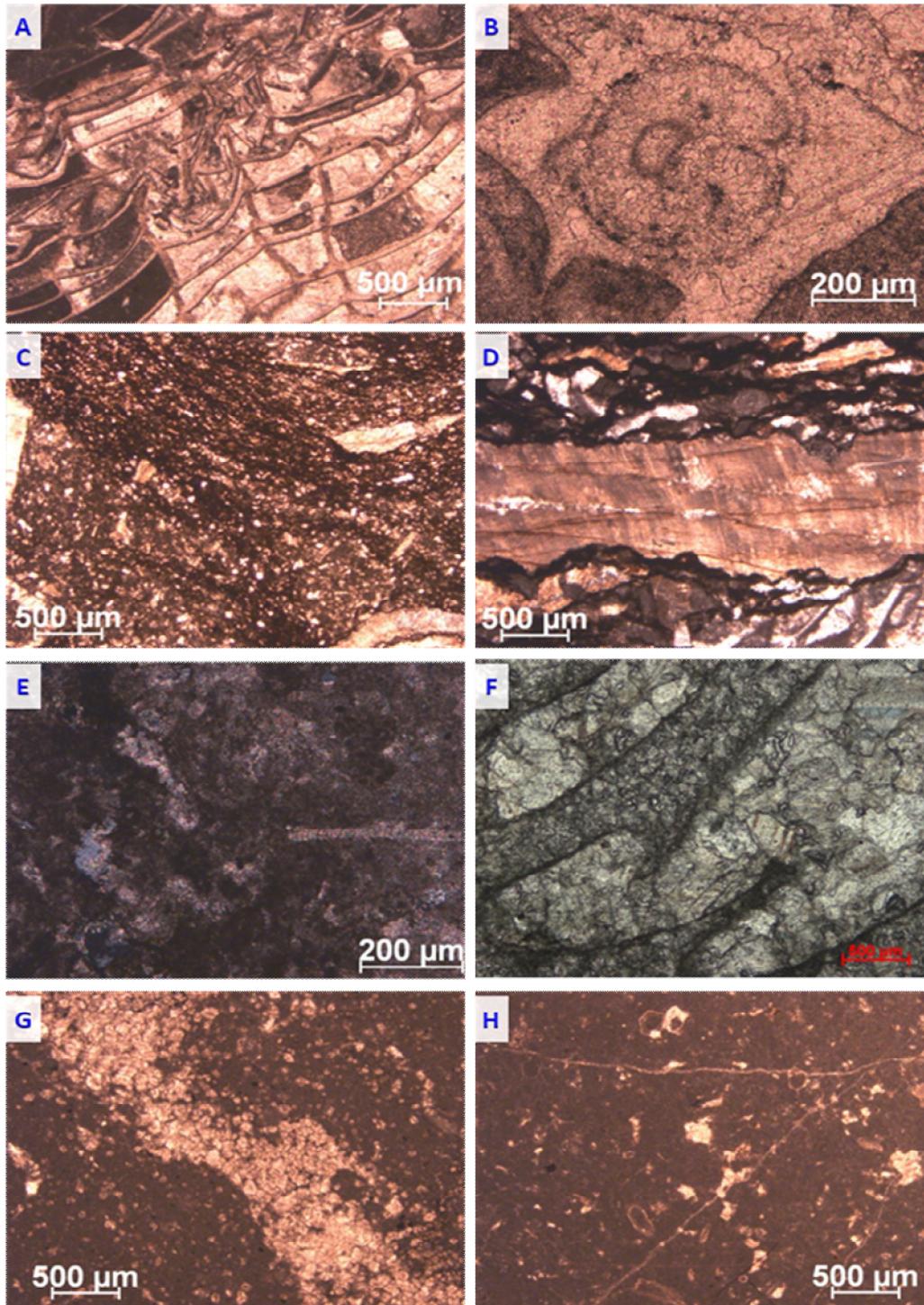


Fig. 4.21. Rasgos o procesos diagenéticos generales observados en la Formación Morelos. A) Compactación mecánica de rudistas. Note la porosidad primaria intraparticular obliterada con cemento de calcita en bloque o micrita. B) Observe el cemento isopaco alrededor de los granos, posiblemente calcita marina; sobresale cemento de calcita en bloque, la cual destruyó completamente la porosidad primaria de la roca. Además se

distingue un molde de gasterópodo resultante de la disolución del organismo y la subsecuente precipitación de cemento de calcita en bloque. C) Costuras de disolución. D) Abundantes estilolitas. E) Reemplazamiento no selectivo de sílice. F) Roca de contacto entre los estratos calcáreos y los cuerpos intrusivos de la zona de estudio. Note la recristalización intensa. G) Dolomitización incipiente. H) Minerales de cuarzo autigénico disperso. Todas las fotomicrografías fueron tomadas con nicoles paralelos y un objetivo de 2.5x, excepto E) objetivo de 10x, nicoles cruzados.

4.6.4. Principales rasgos diagenéticos durante la telodiagénesis

Actualmente, la formación ha estado sujeta a procesos de disolución modernos debido al clima semi-húmedo de la región. Esto es evidente por la presencia de algunos rasgos kársticos entre los que se puede mencionar la formación de lápiaz y formación de pequeñas cavidades o dolinas en las rocas.