

MÓDULO 4



MODELOS SEDIMENTARIOS CARBONÁTICOS

Características sedimentarias generales



CARACTERÍSTICAS DE LA FORMACIÓN DE CARBONATOS

1. Precipitan y se conservan en aguas cálidas de mares tropicales (Fig. 4.1).
2. Es necesaria la ausencia de turbidez generada por sedimentos terrígenos aportados por los ríos y deltas.
3. Debe haber saturación o sobresaturación de CaCO_3 en las aguas.
4. Los grandes depósitos de carbonatos se desarrollan en arrecifes y extensas áreas en aguas someras situadas en la plataforma continental.
5. Fuera de las plataformas, en las cuencas oceánicas tropicales, el carbonato de calcio se deriva de organismos flotadores como los foraminíferos planctónicos, cocolitofóridos y pterópodos.
6. Principales características ambientales: a) energía cinética variable, desde muy alta a baja; b) dependencia de la temperatura y profundidad del agua; c) parámetros físico-químicos de las aguas (salinidad, $\% \text{CO}_2$, pH); d) la biota es predominante en la formación de los sedimentos, incluyendo la variación y la evolución de la misma.



FACTORES QUE ACTÚAN EN EL AMBIENTE SEDIMENTARIO CARBONÁTICO

FACTORES FÍSICOS

Condiciones hidrodinámicas: corrientes, oleaje, mareas, profundidad

Tamaño y forma de la cuenca de depositación

Clima, meteorización, erosión

Origen de los sedimentos (tipos de rocas)

Tectónica

Nivel relativo del mar

Características texturales del sedimento

Estructuras sedimentarias

Facies características

FACTORES QUÍMICOS

pH, eH, temperatura de las aguas, salinidad, contenido de CO₂ y geoquímica de sedimentos

Minerales autigénicos, diagénesis, precipitación química y evaporitas

FACTORES BIOLÓGICOS E INORGÁNICOS

Organismos

Ooides, Peloides y Agregados

Horadaciones

Bioturbaciones

Acción bacterial

Información paleoecológica derivada de: profundidad, temperatura, salinidad, tasa de sedimentación, edad geológica



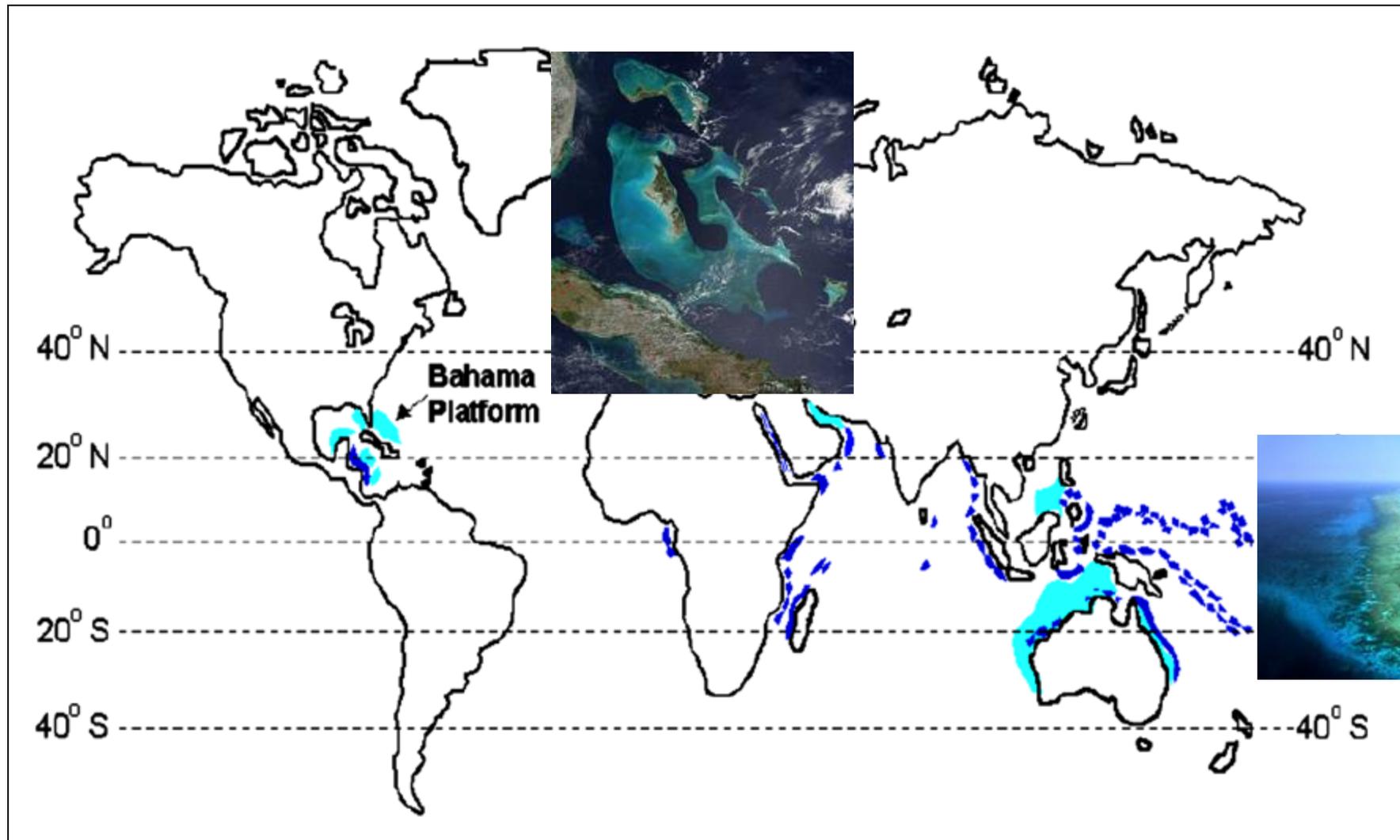
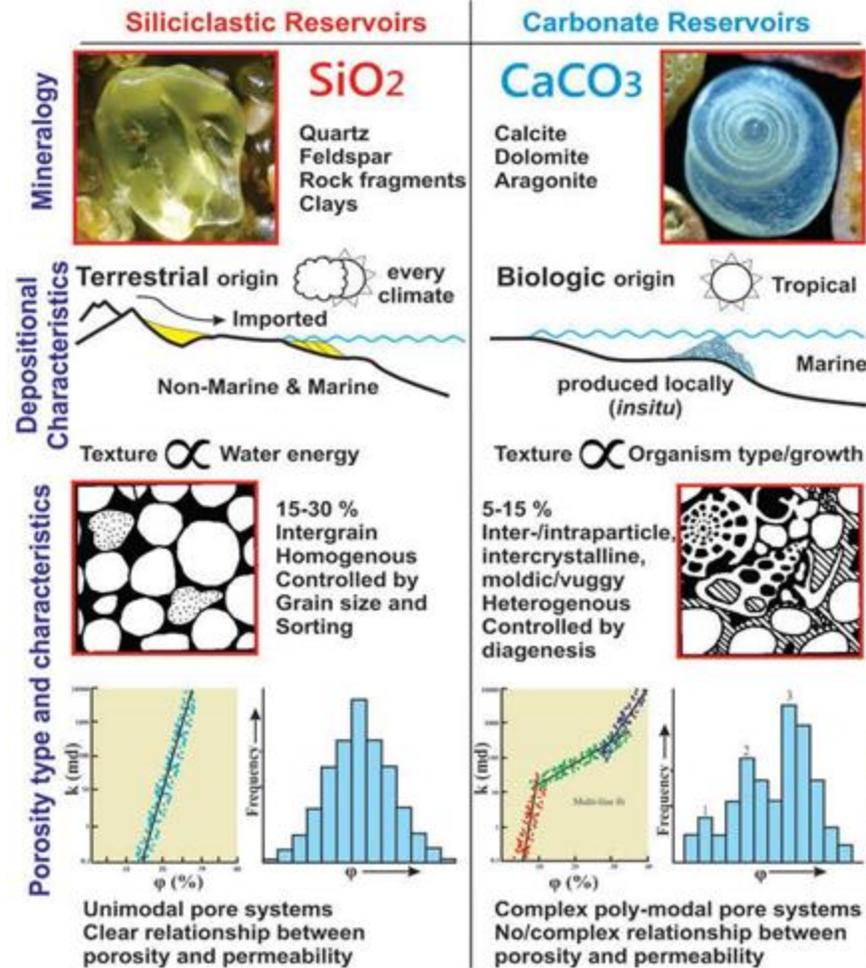


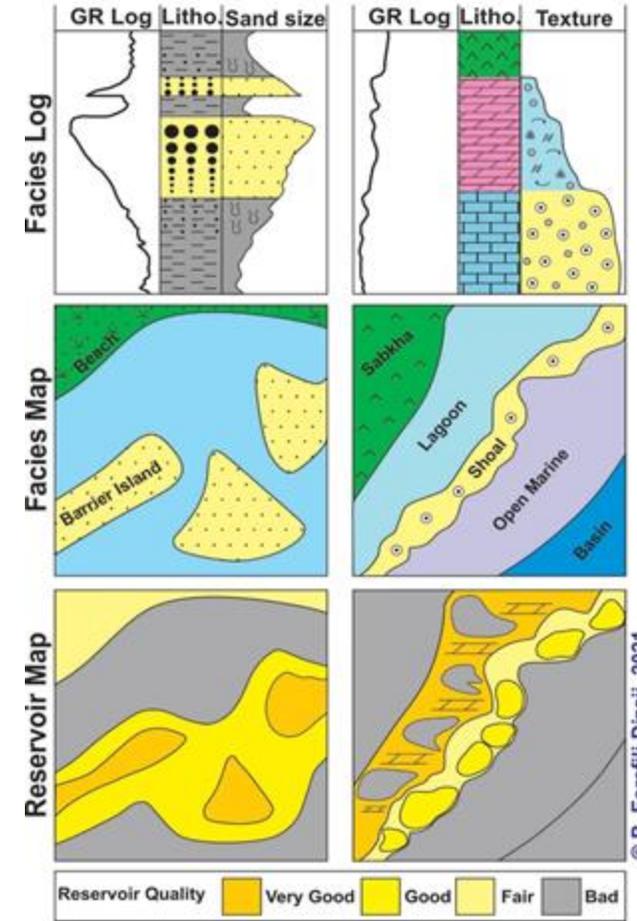
Fig. 4.1. Distribución de arrecifes y plataformas de carbonatos durante el Holoceno, siendo las regiones más importantes el Caribe occidental, Yucatán, Golfo de México, Bahamas, Mar Rojo, Madagascar, Golfo Pérsico, Indonesia y Australia . (Tomado de https://sivea.uson.mx/docentes/tareas/17_rocas_carbonatadas)





© B. Esrafil-Dizaji, 2021

Sandstone Reservoir vs. Carbonate Reservoir



© B. Esrafil-Dizaji, 2021

Fig. 4.2. Principales diferencias sedimentarias entre yacimientos clásticos y carbonáticos. (Tomado de Claude Morgan (2021), Mexico Petroleum Geoscience Group. <https://www.facebook.com/groups/430159417618680>)



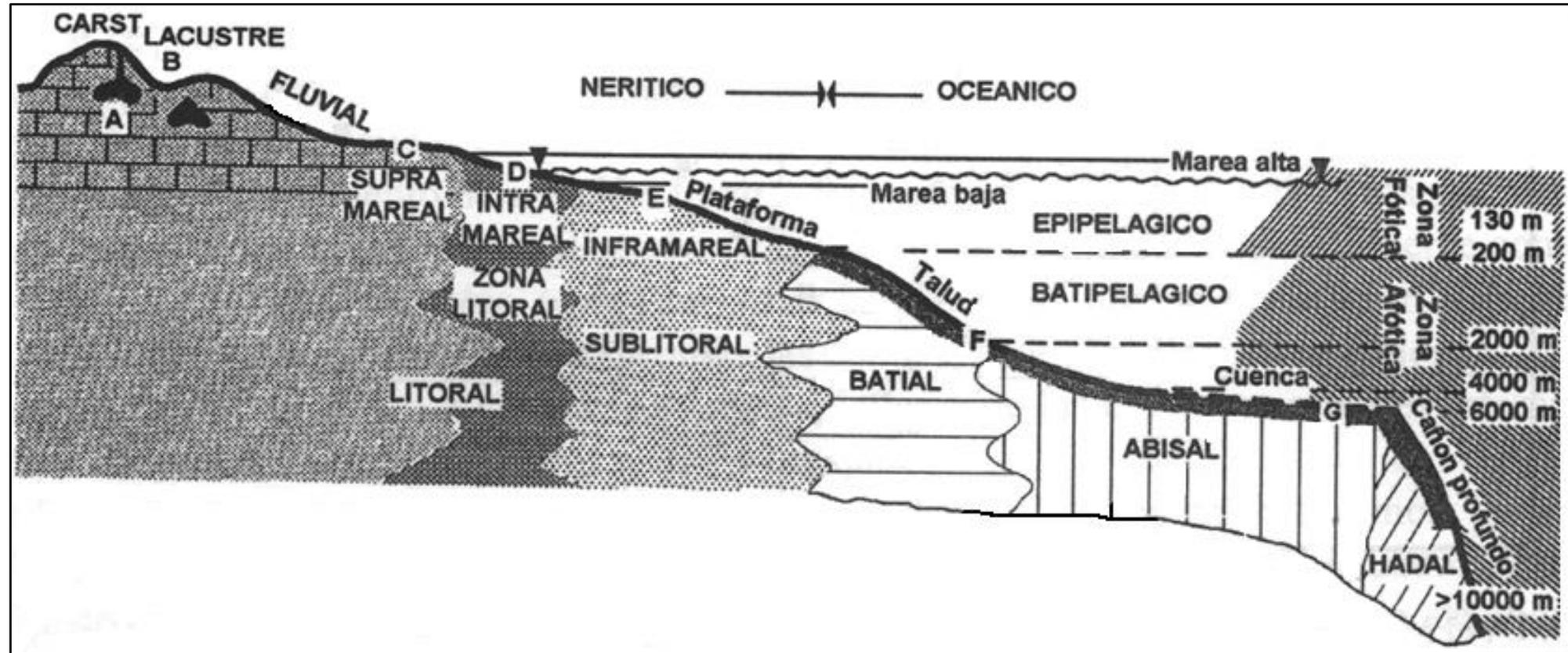


Fig. 4.3. Clasificación oceanográfica del medio marino, con la distribución de las diversas zonas oceánicas. (Méndez, 2009)



Mineral	Fórmula química	Estabilidad bajo condiciones de p y T bajas (diagenéticas)	Cristalización por organismos Precipitación Cemento
Calcita	CaCO ₃	estable	<i>Crinoides (lirios de mar)</i> <i>Coccolitos (nanoplankton)</i> <i>Lamelibranchios (Ostreas)</i> <i>Foraminíferos</i> Precipitación de aguas dulces Cemento en la diagénesis tardía
Mg-Calcita	CaCO ₃ (> 4 mol% MgCO ₃)	metaestable	<i>Algas rojas</i> <i>Foraminíferos</i> <i>Equinodermos (erizos)</i> Algunos cementos marinos (diagénesis temprana)
Aragonito	CaCO ₃	metaestable	<i>Lamelibranchios (la mayoría)</i> <i>Gasterópodos (la mayoría)</i> <i>Foraminíferos</i> <i>Lodo calcáreo (gran parte)</i> Cemento en aguas marinas someras (rocas de playa ("beach rocks") durante la diagénesis temprana)
Sr-Aragonito	CaCO ₃ (> 0.7 mol% SrCO ₃)	metaestable	<i>Corales</i> <i>Algas verdes sésiles (Halimeda)</i> <i>Lamelibranchios</i> <i>Ooides (biomineralizado)</i>
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	estable	Procesos diagenéticos (diagénesis temprana y tardía)
Siderita	FeCO ₃	estable	Procesos diagenéticos (diagénesis tardía)
Anquerita	Mg(CaFe)(CO ₃) ₂	estable	Procesos diagenéticos (diagénesis tardía)
Ópalo	SiO ₂ x aq (amorfo)	metaestable	<i>Diatomeas</i> <i>Radiolarios</i> <i>Esponjas</i>

Fig. 4.4. Minerales de origen biogénico y químico. (Modificado de Méndez, 2006)



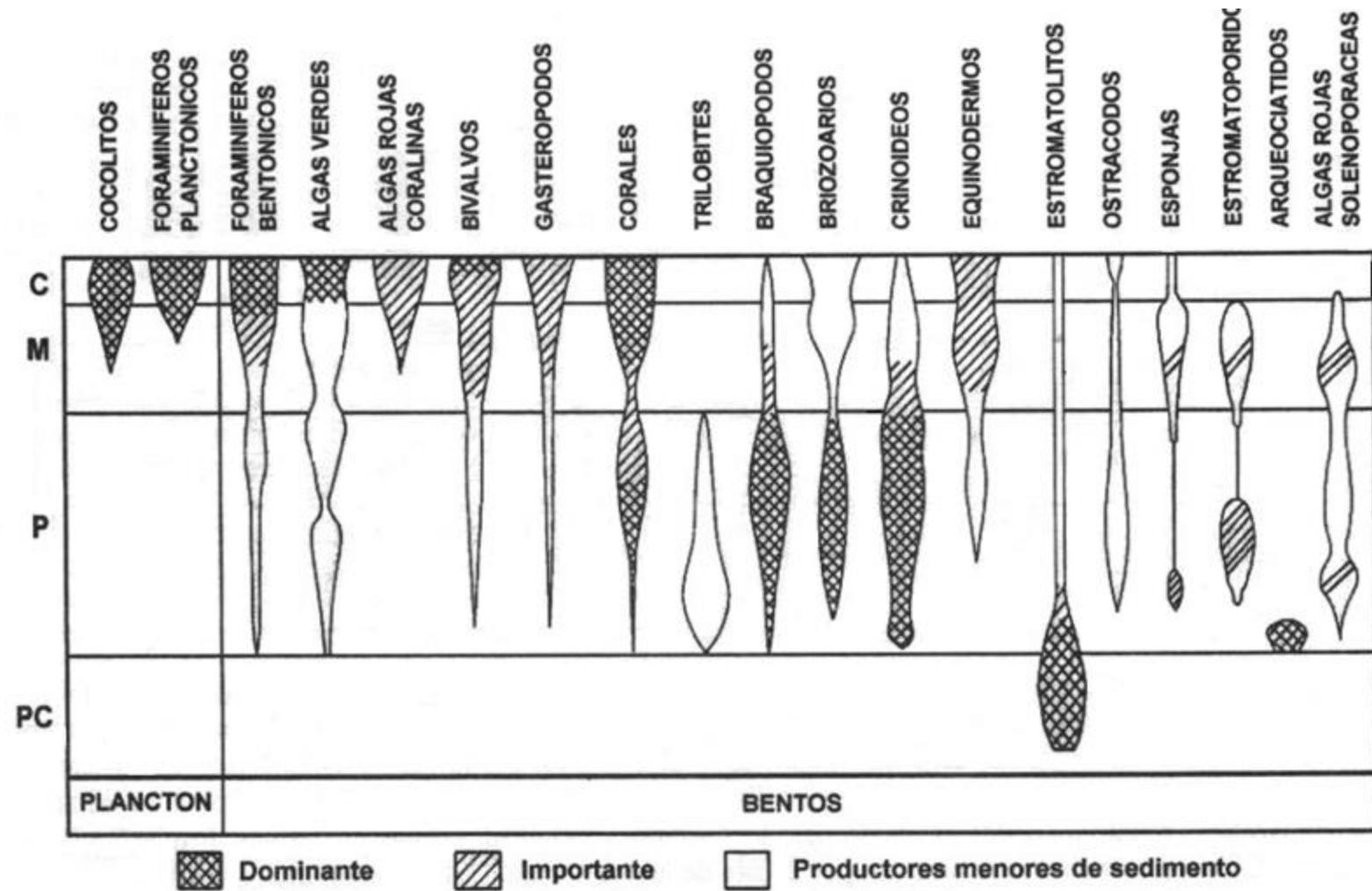


Fig. 4.5. Distribución en el tiempo geológico, de la diversidad y la abundancia de los principales organismos calcáreos productores de sedimentos de carbonatos. (Tomado de Méndez, 2009)



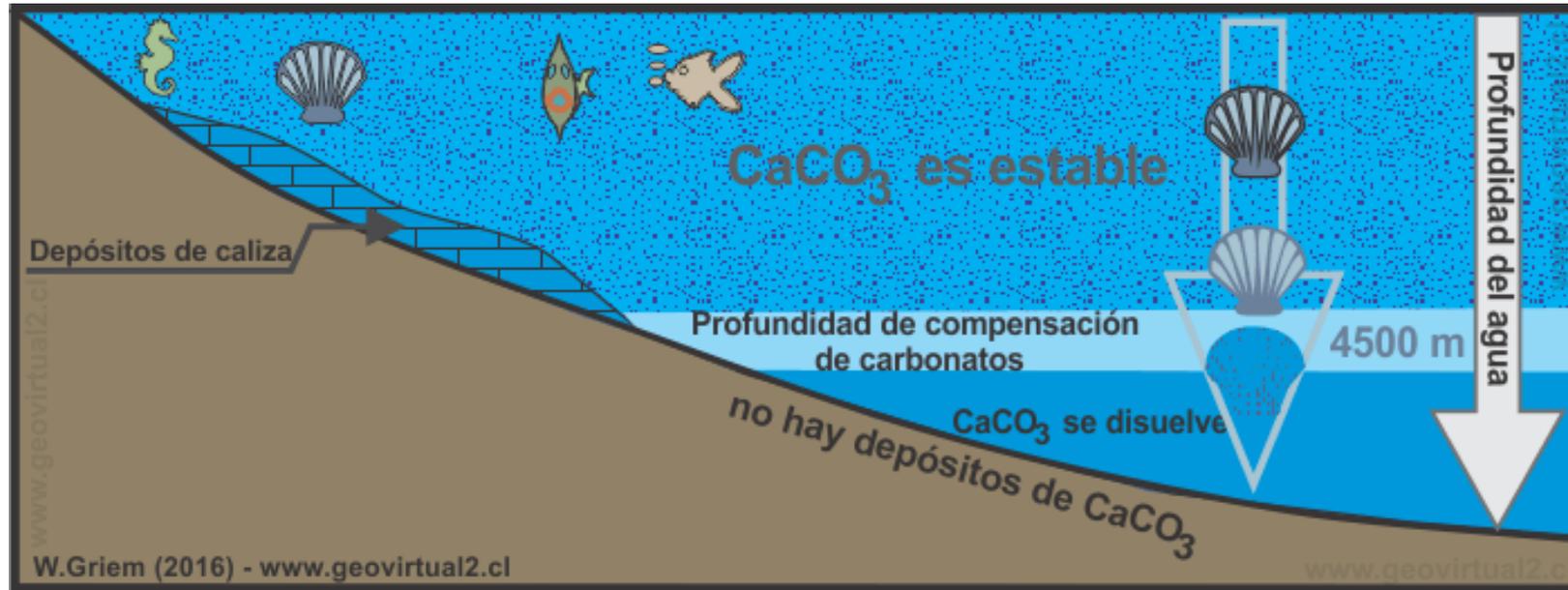


Fig. 4.6. En el mar profundo, aproximadamente 4500 - 5000 m de profundidad, el "nivel de compensación de la calcita" (CCD: *Calcite Compensation Depth*), es la profundidad por debajo de la cual la totalidad de los carbonatos se disuelven completamente. A esa profundidad no se acumulan restos orgánicos calcáreos como foraminíferos planctónicos y nanoplancton, pero sí de composición silíceo como los radiolarios. Tomado de <https://www.geovirtual2.cl>



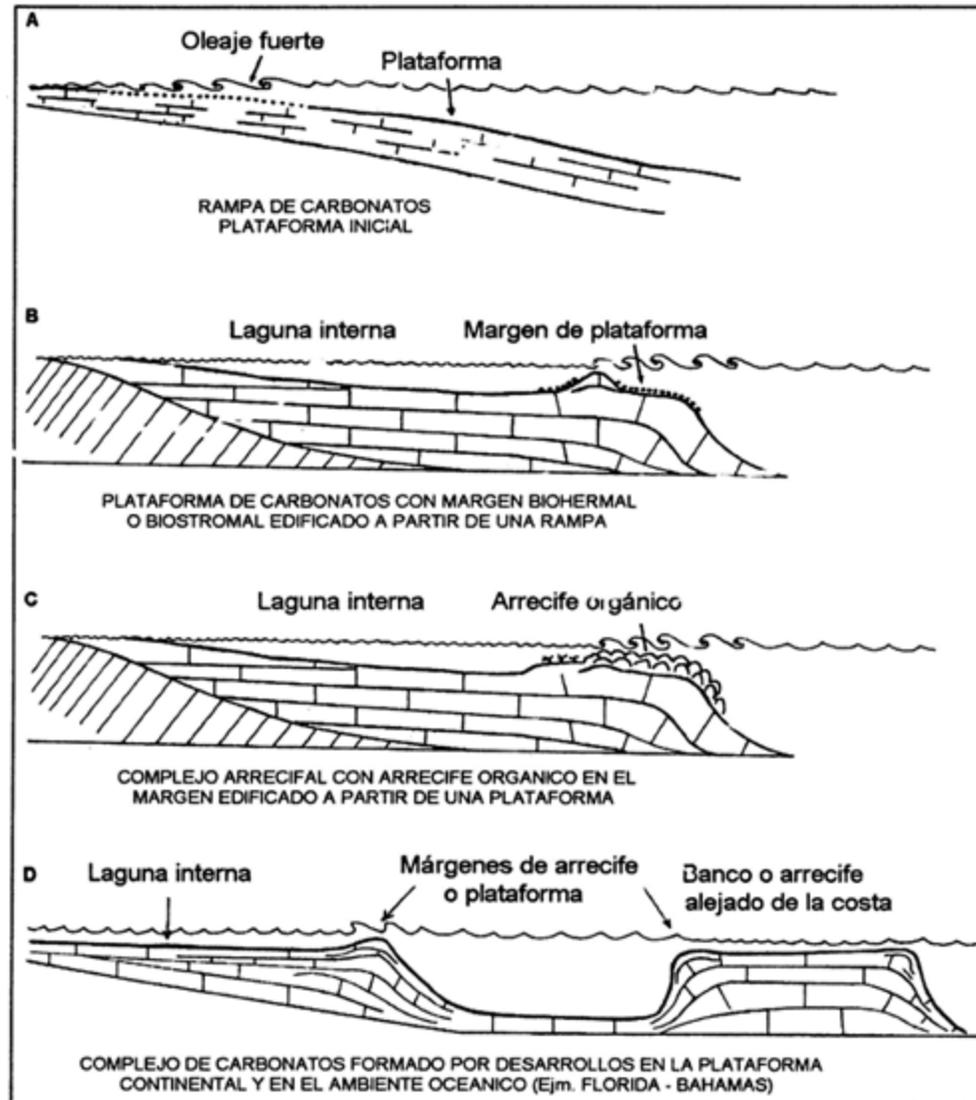
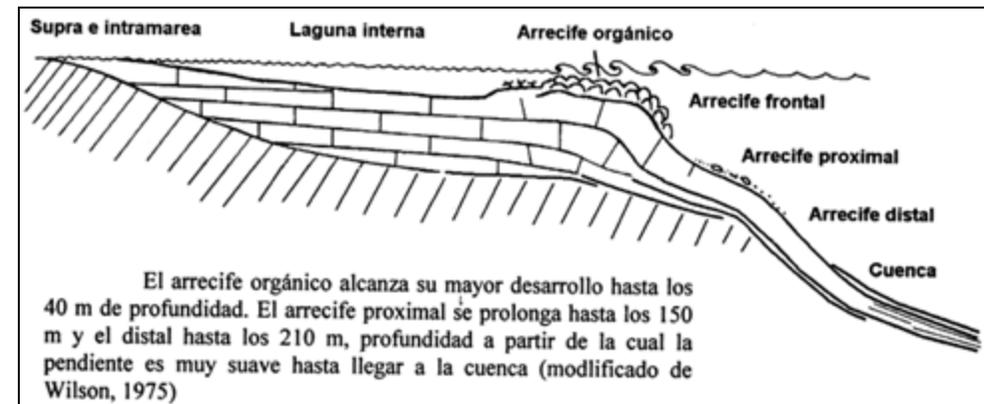


Fig. 4.7. Evolución de un complejo de carbonatos desde el estado inicial de una rampa (A), el desarrollo de una plataforma (B), la formación de un arrecife orgánico asociado a la plataforma (C) y un modelo formado por una plataforma y un banco alejado de la costa (D). Modificado de Méndez (2009).



Rampa carbonática

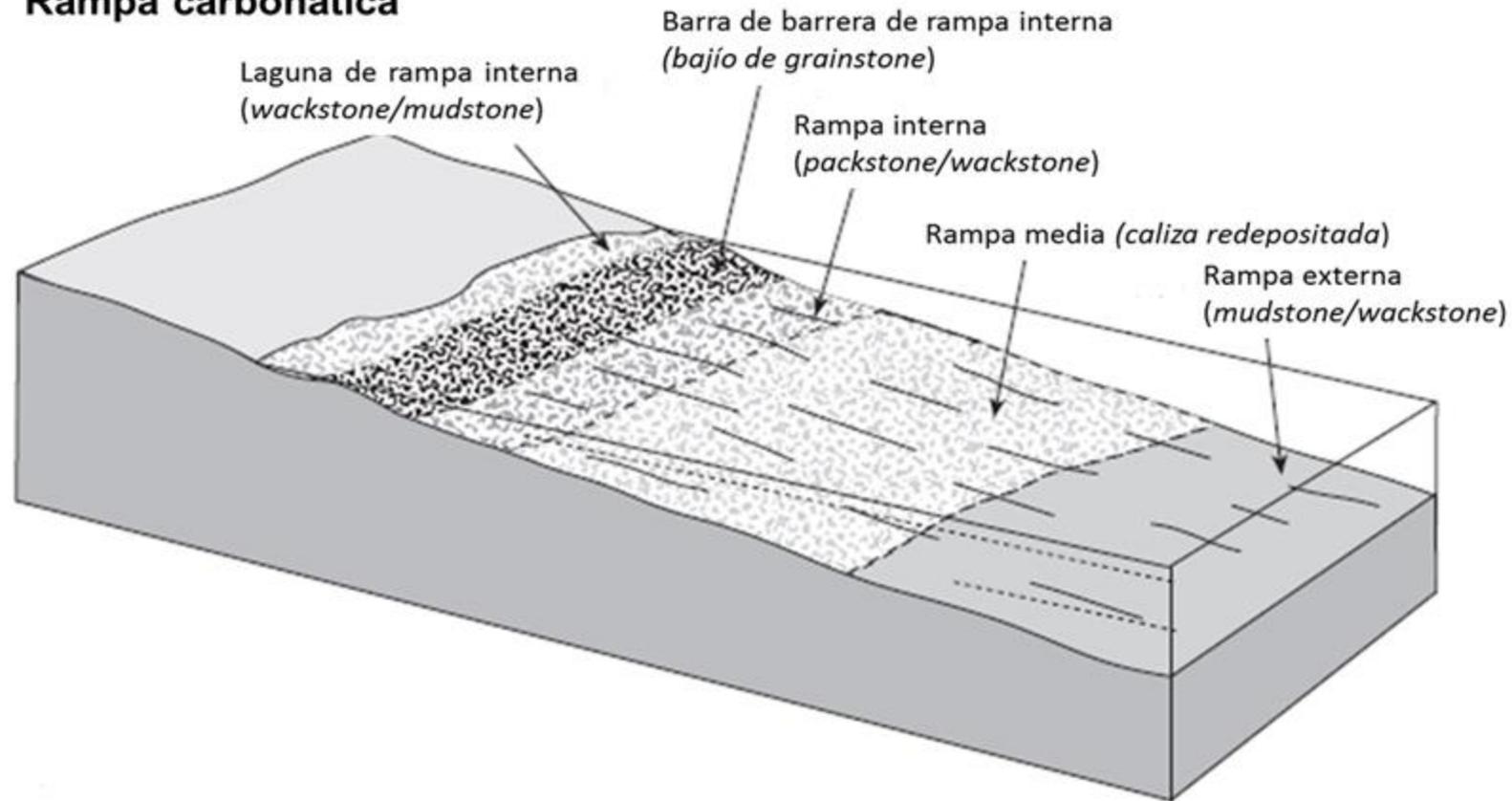


Fig. 4.8. Distribución generalizada de facies en una rampa carbonática (modificado de Nichols, 2009)



Plataforma carbonática no bordeada

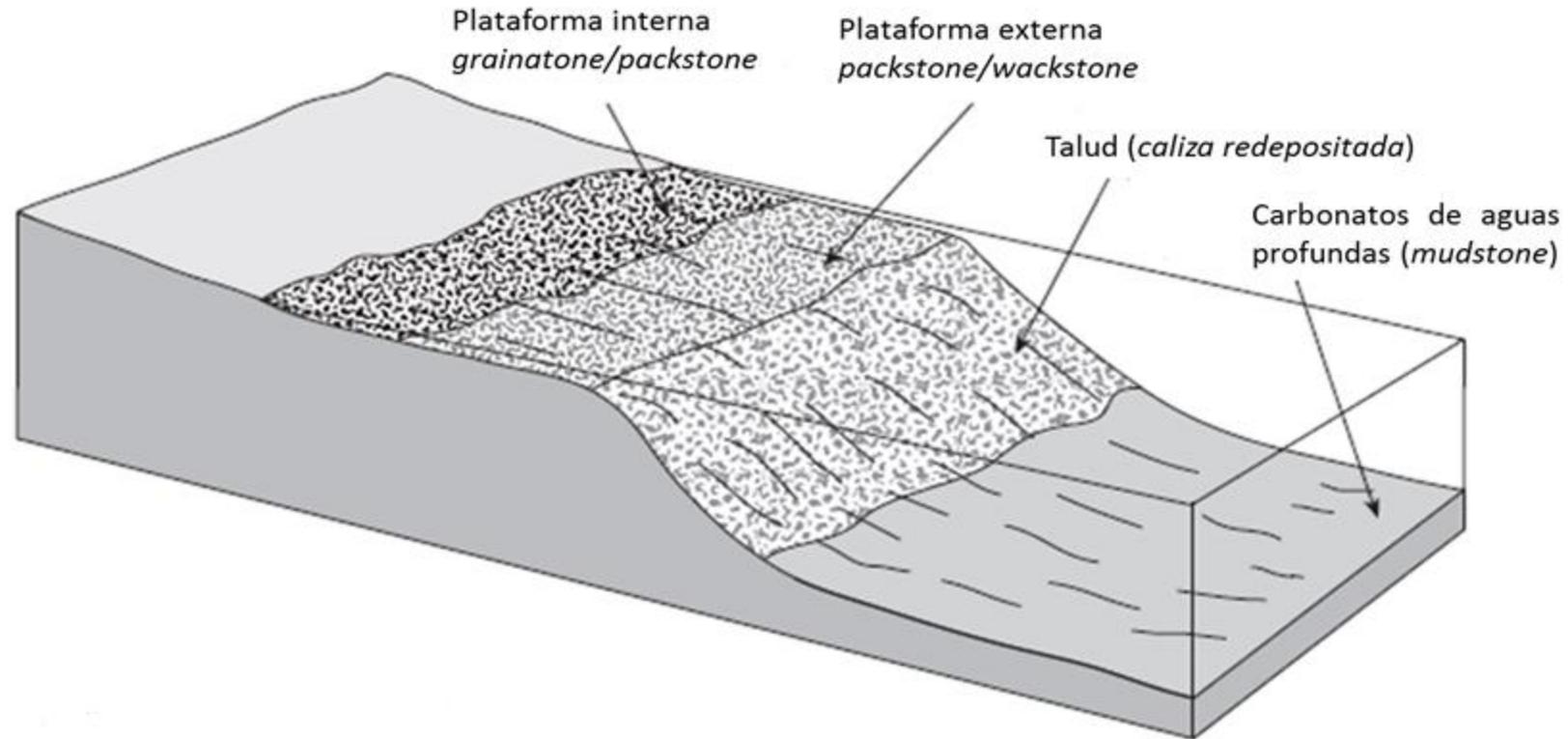


Fig. 4.9. Distribución generalizada de facies en una plataforma carbonática no bordeada .(modificado de Nichols, 2009)



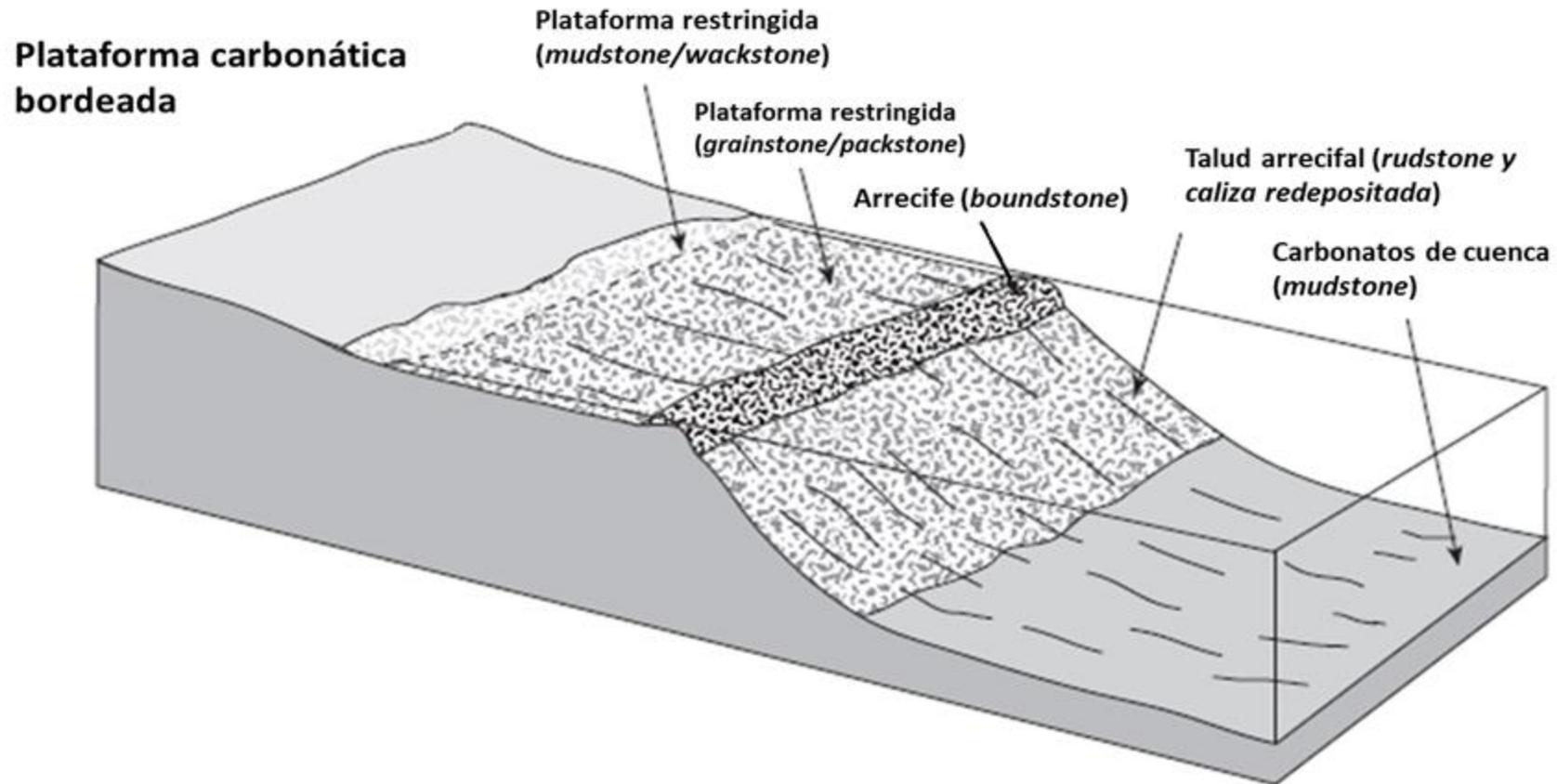
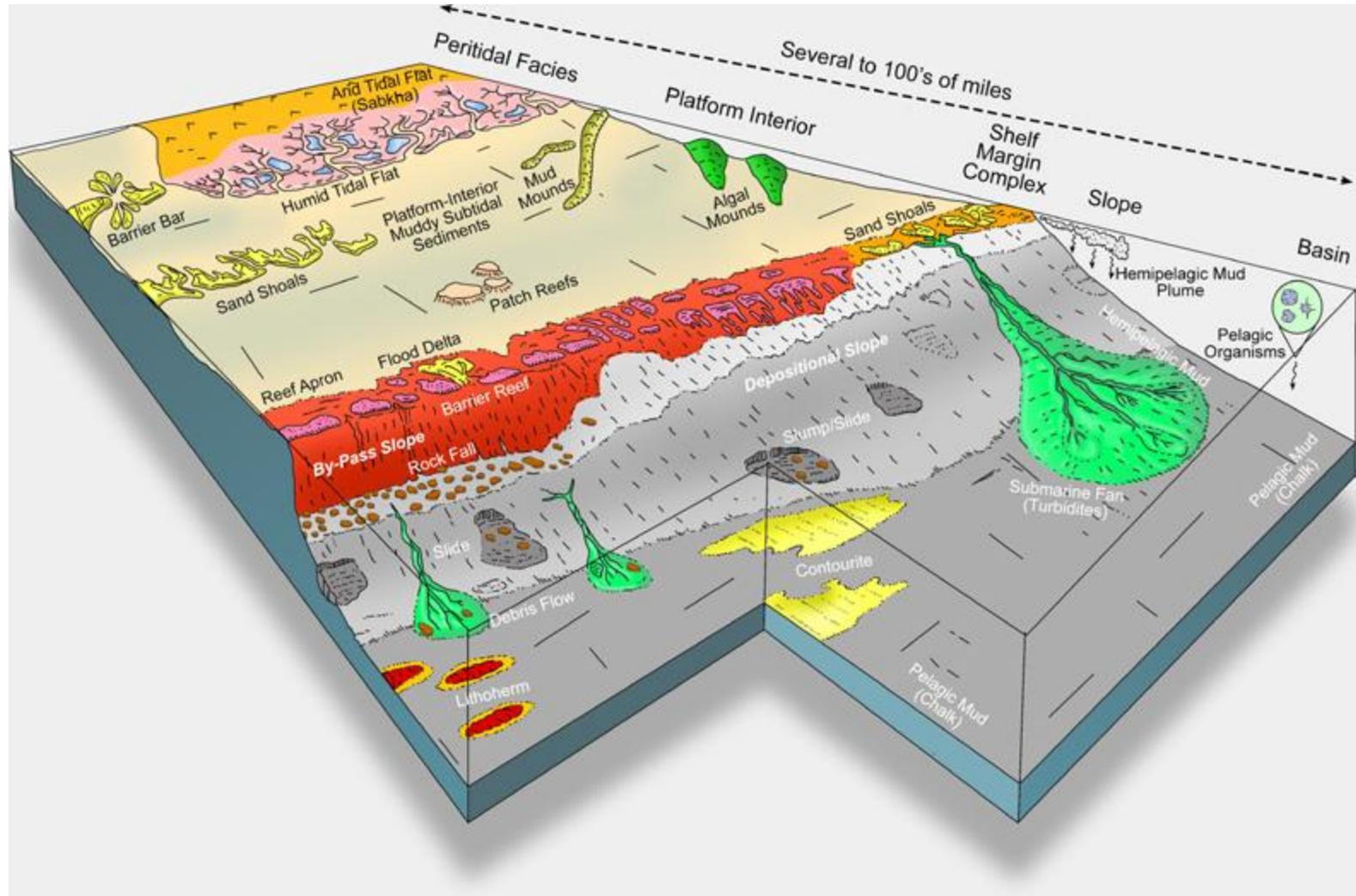


Fig. 4.10. Distribución generalizada de facies en una plataforma carbonática bordeada. (modificado de Nichols, 2009)





4.11. Modelo deposicional de una plataforma carbonática somera y la distribución de importantes elementos arquitecturales y facies. Modificado de Loucks *et al.* (2003).



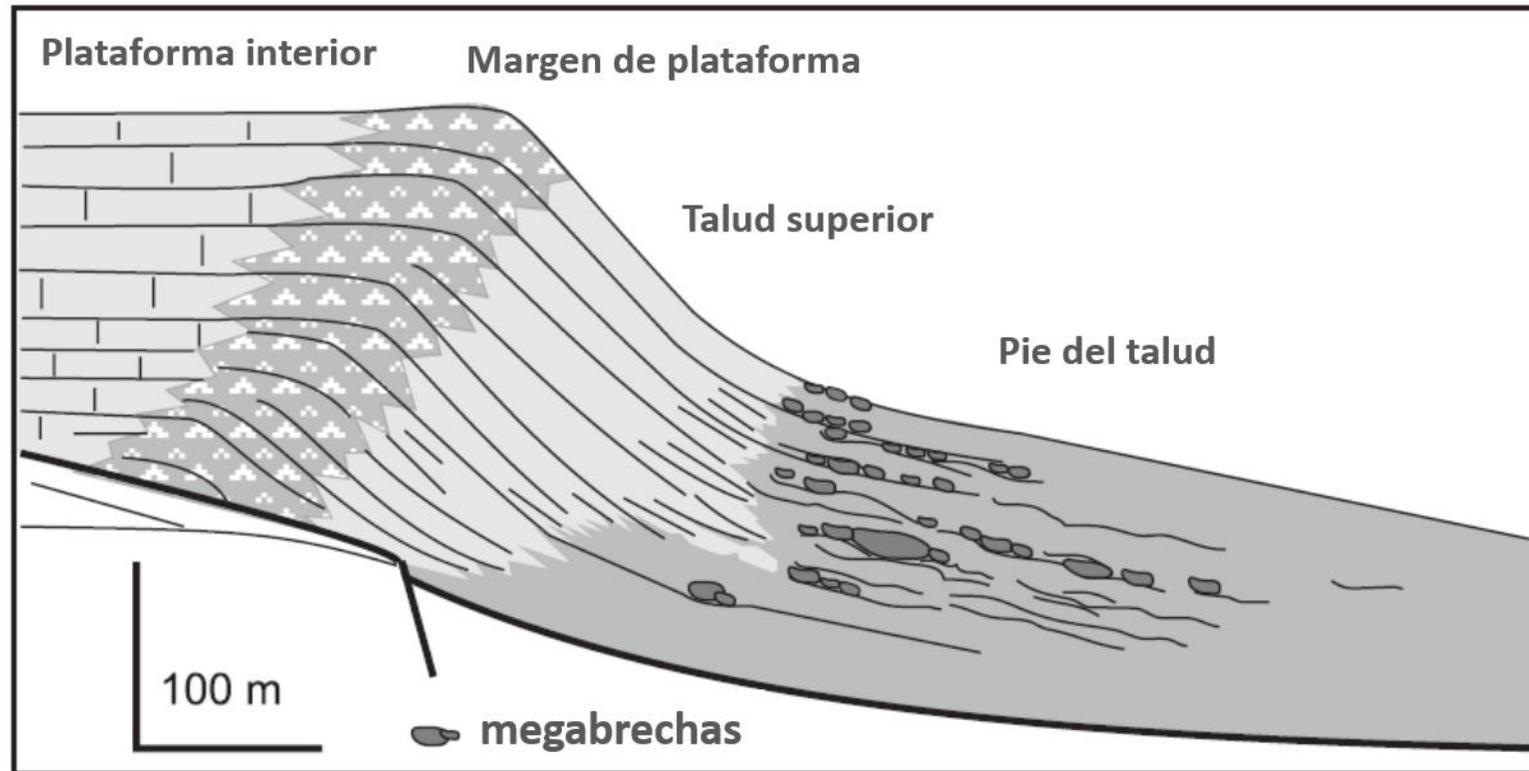
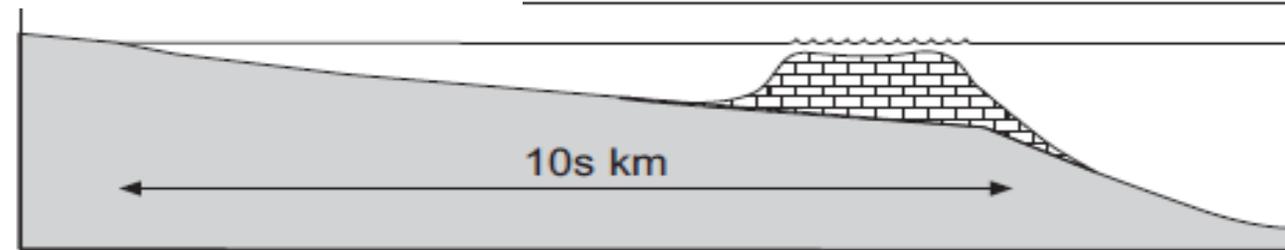


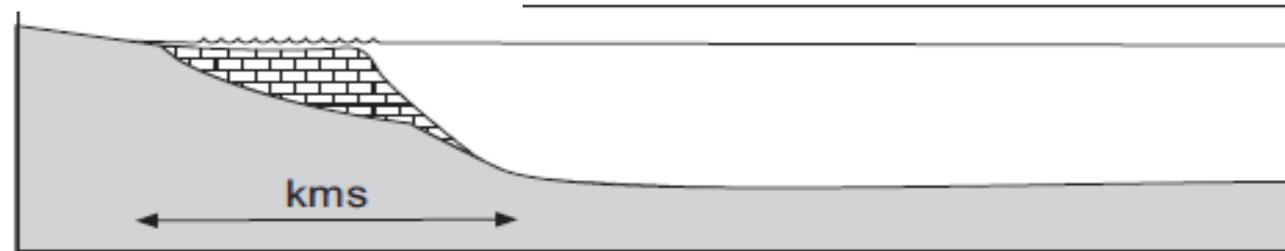
Fig. 4.12. Sección transversal de la etapa agradacional de una sección del Albiano Inferior de la cuenca Vasca-Cantábrica (de Gómez-Pérez et al., 1999)



(a) Arrecife de barrera



(b) Arrecife franjeante



(c) Parche arrecifal

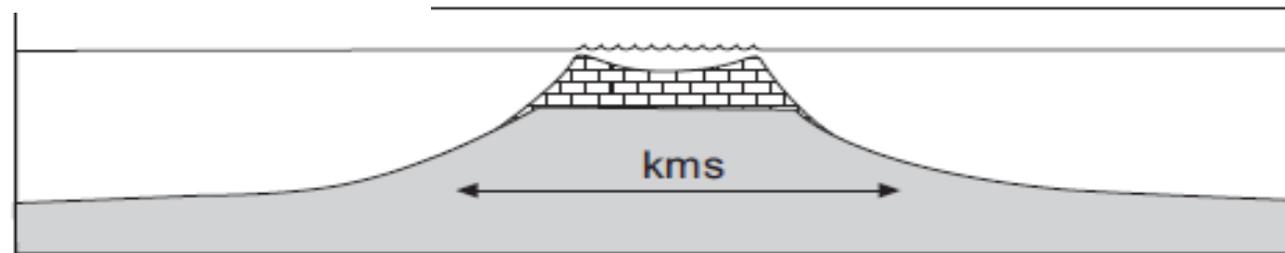


Fig. 4.13. Forma de presentarse los arrecifes: (a) arrecifes de barrera en el borde de la plataforma externa y protegiendo una laguna detrás de ellos. (b) arrecifes franjeantes construídos en la línea costera. (c) parches arrecifales y atolones, localizados aislados en zonas internas de las lagunas (parches) y costa afuera usualmente encima de un alto o montículo marino (atolones). (Nichols, 2009)



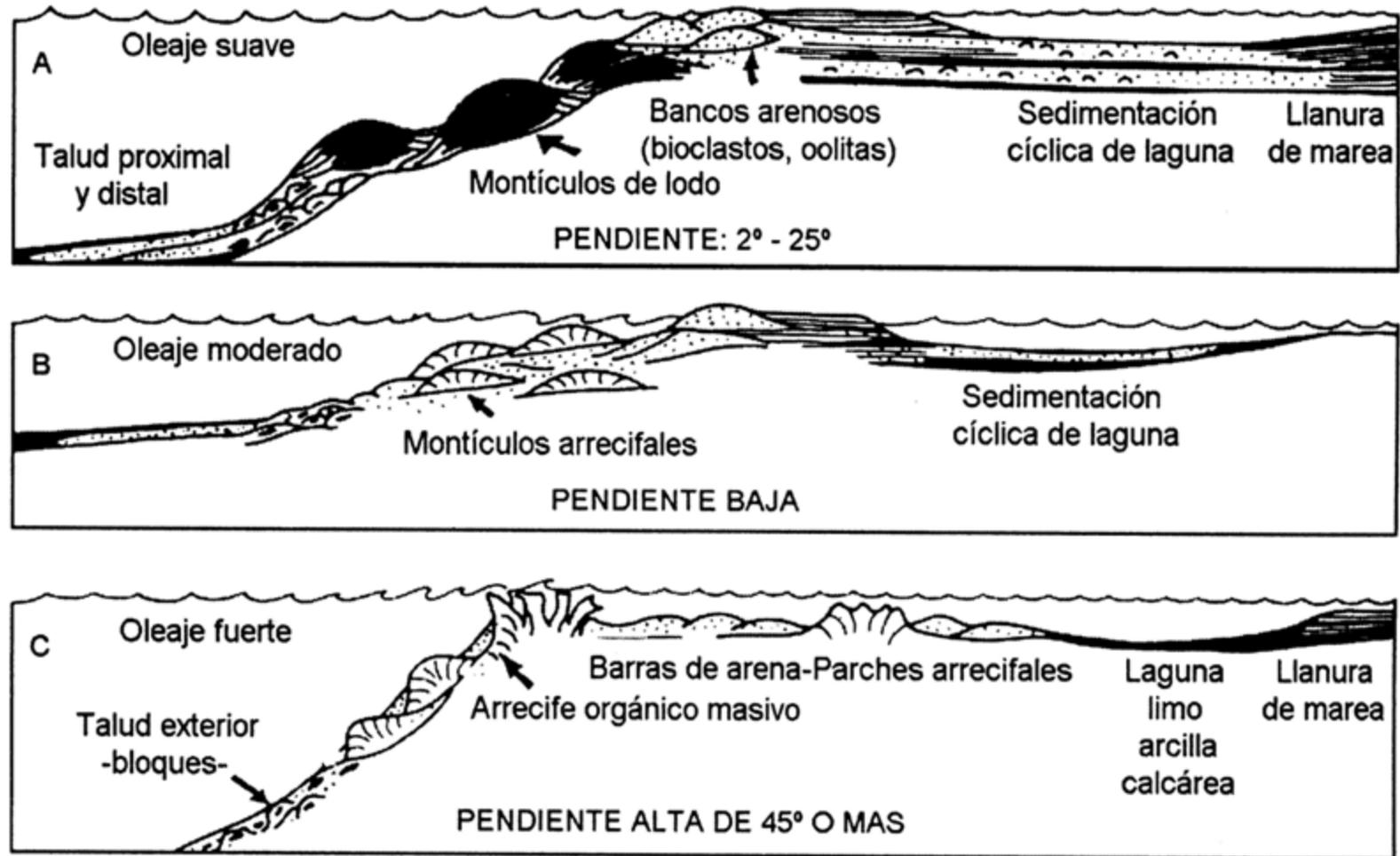


Fig. 4.14. Tipos de márgenes de plataformas de carbonatos con relación a la pendiente y a las características del depósito en el margen. (Méndez, 2009)



ESTRUCTURA Y BIOTA	ARRECIFE ORGANICO	MONTICULO	
		ARRECIFAL	MICROBIANO
	Corales Estromatopóridos Algas rojas Estromatolitos	Briozoarios Algas Filoides Esponjas	Codeáceas Crinoideos Cianobacterias
FUNCION DEL ORGANISMO			
Constructor			
Productor de sedimentos			
Obstáculos			
Incrusta y enlaza			
Estimula la precipitación			

Fig. 4.15. Características y variaciones generales entre un arrecife orgánico y un montículo (arrecifal y bacteriano). El arrecife orgánico edifica una estructura por el desarrollo de grandes colonias de organismos. Un montículo puede formar una estructura relativamente rígida tipo arrecifal por la acumulación de pequeños organismos. Un montículo microbiano presenta un dominio de lodo calcáreo derivado de la disgregación de organismos muy pequeños, por la precipitación inorgánica y por la acción de aglutinamiento de cianobacterias formando estromatolitos. (Tomado de Méndez, 2009)



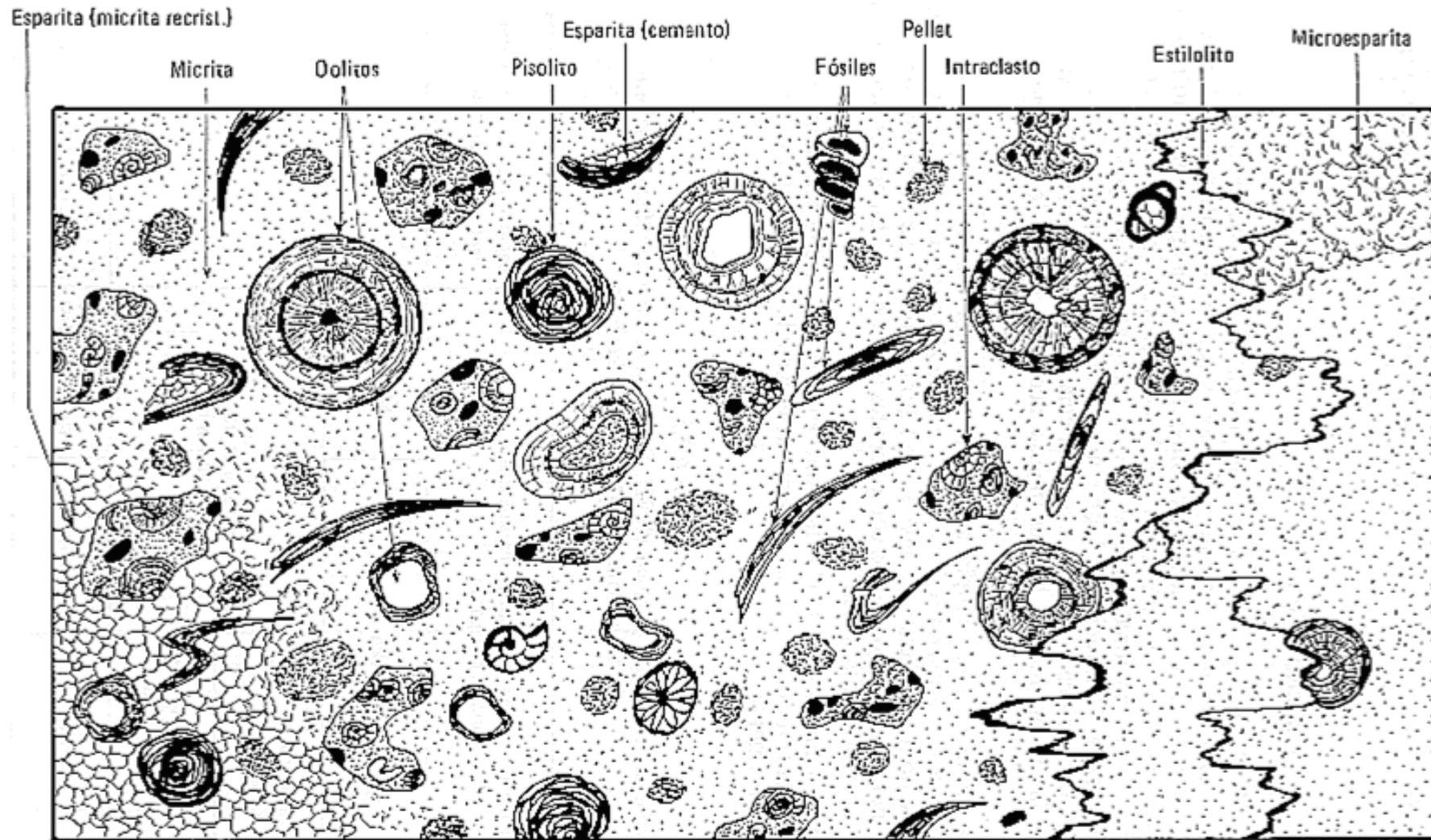


Fig. 4.16. Componentes aloquímicos y ortoquímicos de una roca carbonatada.
Tomado de https://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm



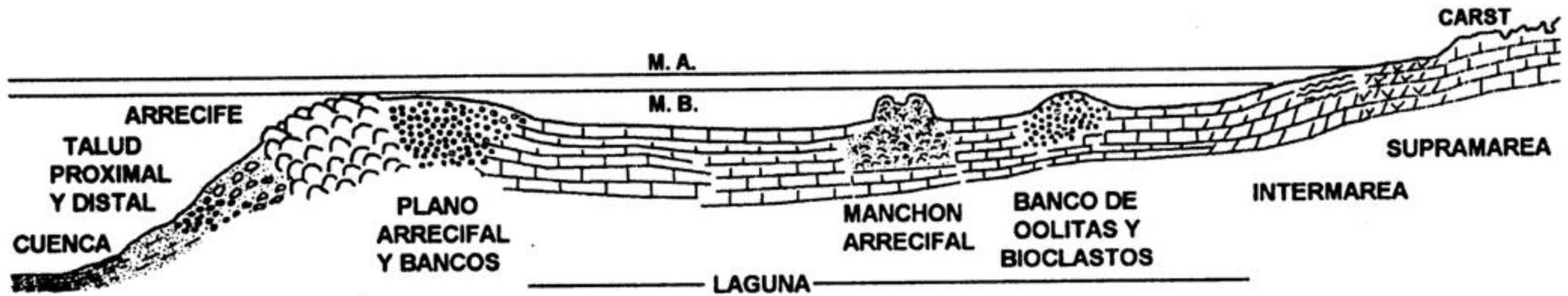


Fig. 4.17. Ambientes generales en un sistema de arrecife y de plataforma de carbonatos. (Modificado de Méndez, 2009)



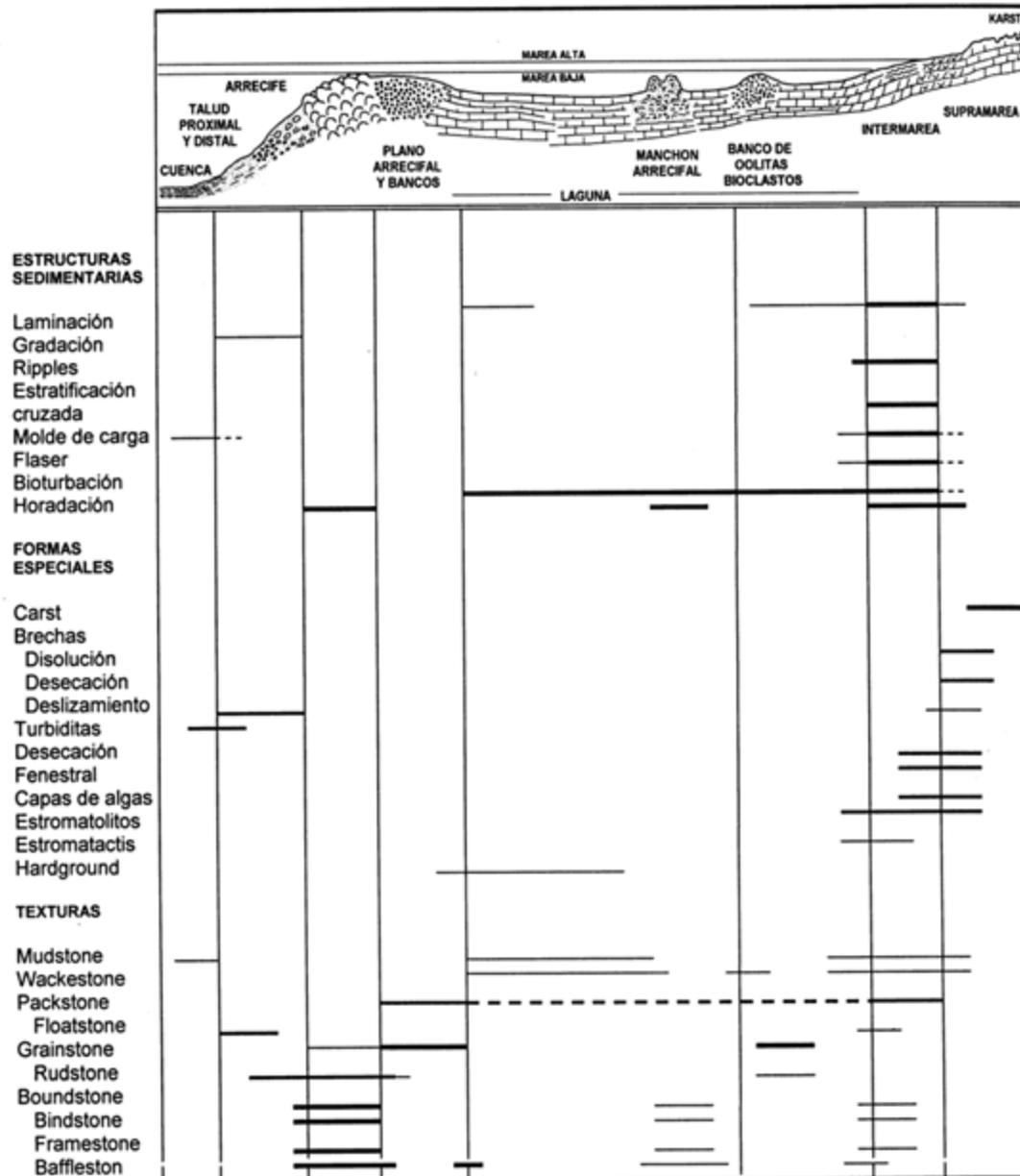


Fig. 4.18. Distribución de estructuras sedimentarias, formas especiales y texturas depositacionales en un complejo de carbonatos. (Méndez, 2009)



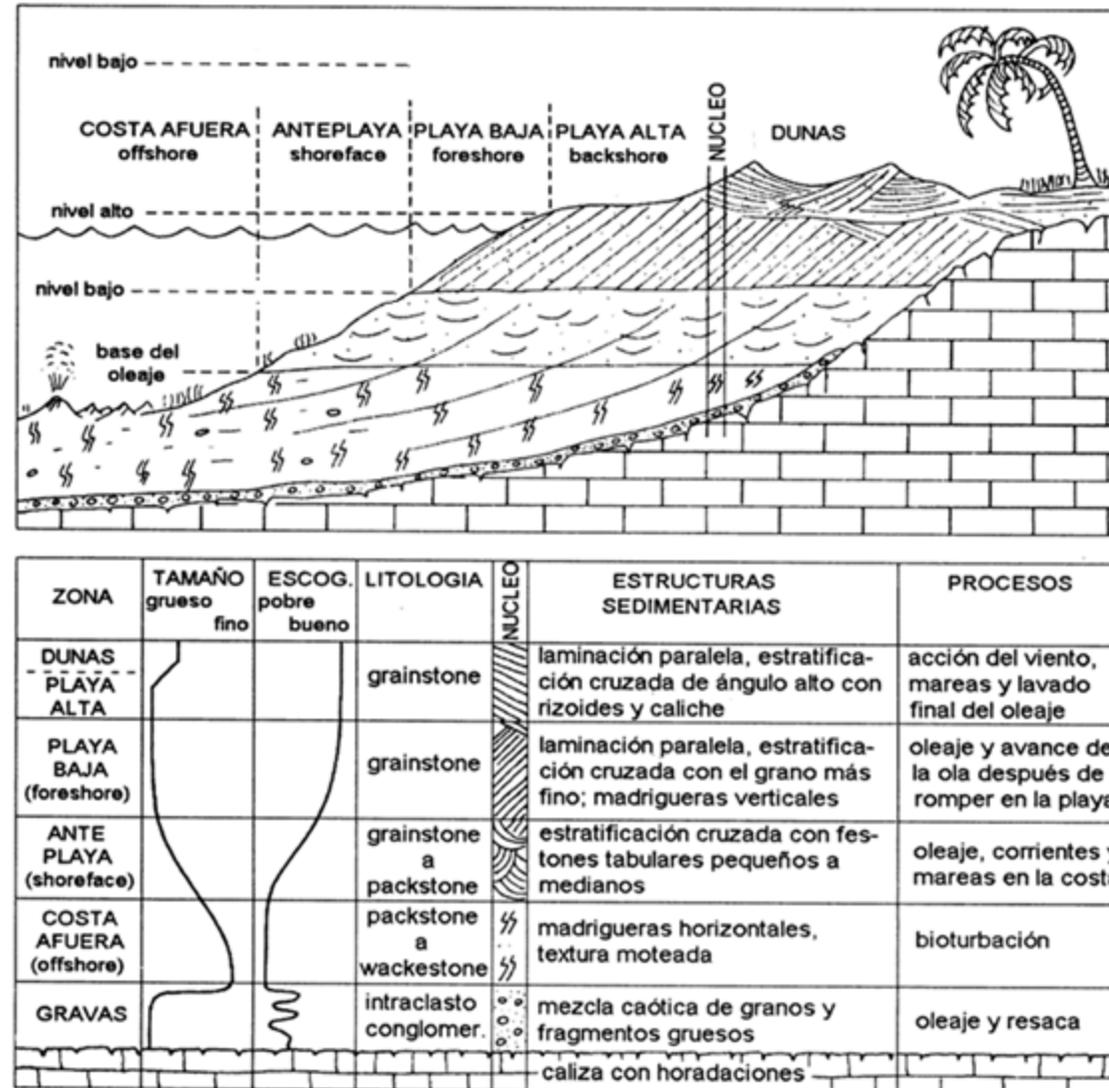


Fig. 4.19. Modelo de estructuras sedimentarias comunes, texturas y sedimentos carbonáticos en ambientes de playa, así como los diversos procesos mecánicos y biológicos que intervienen. (Méndez, 2009)



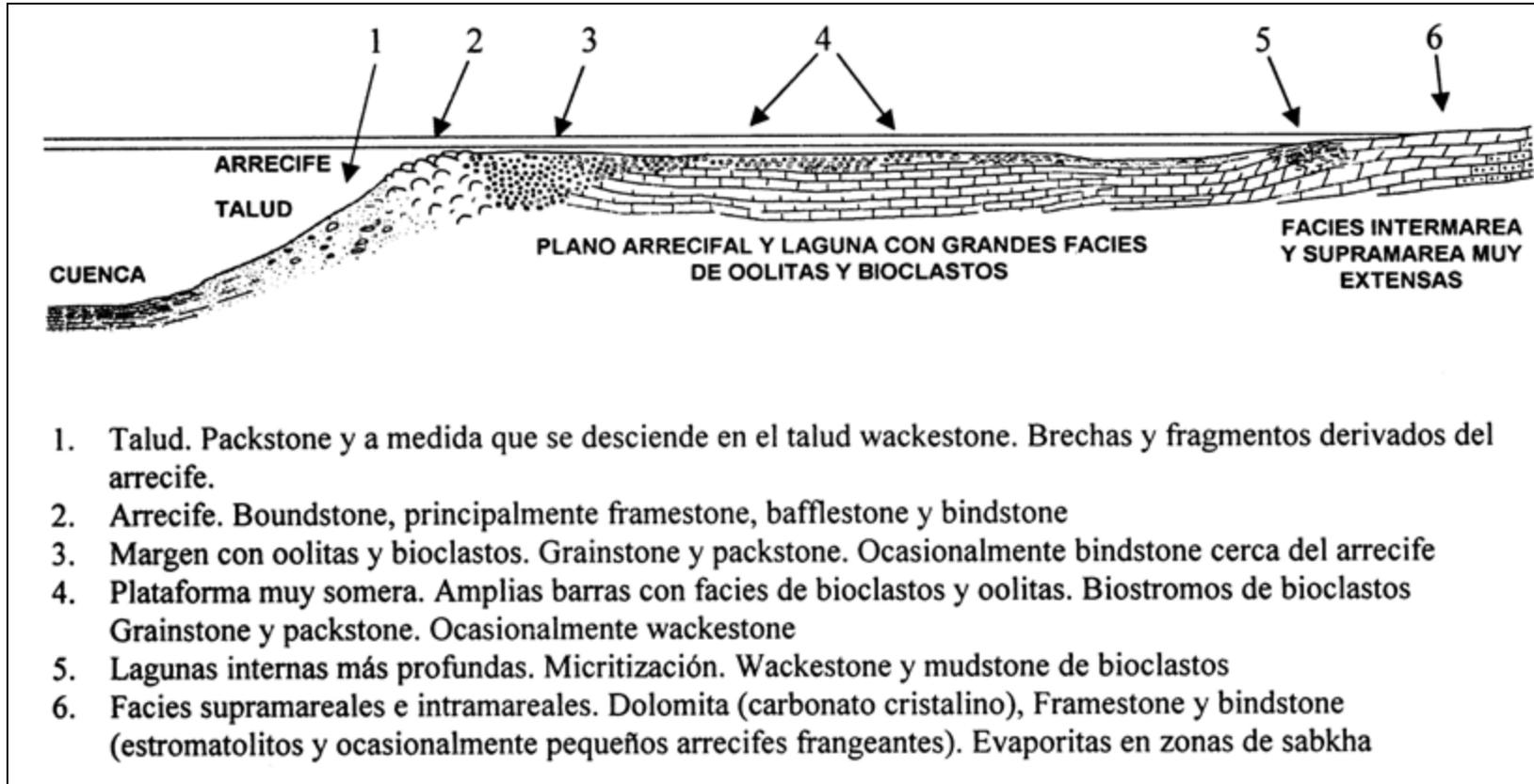
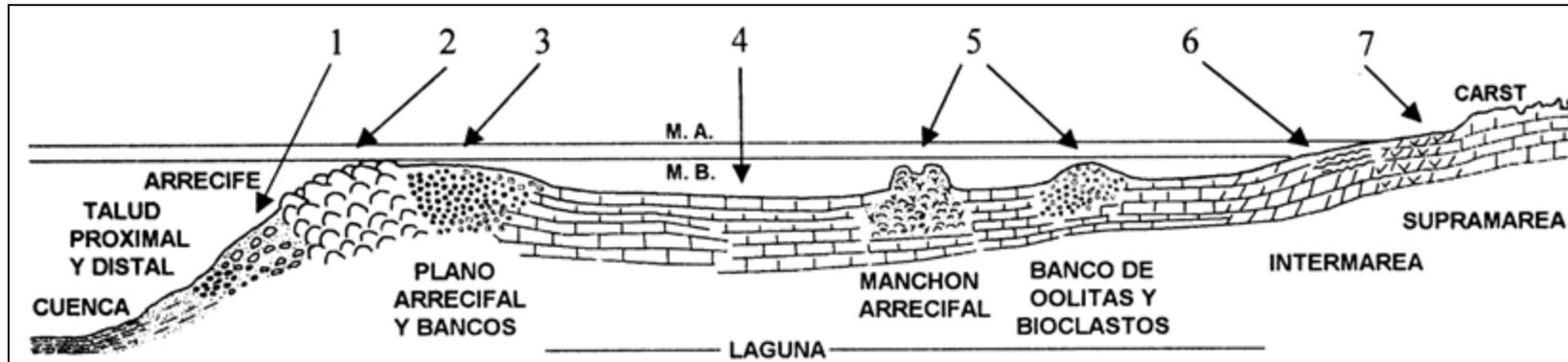


Fig. 4.20. Texturas comunes durante la sedimentación en una plataforma muy somera con un pequeño arrecife y margen de oolitas con bioclastos. (Méndez, 2009)





1. Talud. Grandes bloques. Brechas derivadas del arrecife. Packstone y ocasionalmente wackestone
2. Arrecife orgánico. Boundstone. Framestone, bafflestone y bindstone. Grandes crecimientos de corales
3. Plano arrecifal. Grainstone de biclastos; ocasionalmente oolitas; boundstone tipo bindstone con algas incrustantes.
4. Lagunas de la zona detrás del arrecife algo más profundas que en una plataforma somera (ejemplo anterior). Wackestone, mudstone y algo de packstone. Micritización.
5. Manchones arrecifales. Boundstone principalmente framestone y bafflestone. Algo de grainstone. En los bancos de oolitas o bioclastos la textura es de grainstone o packstone.
6. Facies supramareales e intramareales. Algo de dolomita y ocasionalmente boundstone de estromatolitos.
7. Carbonatos cristalinos con pérdida de la textura original por la extensa diagénesis. Dolomitas.

Fig. 4.21. Texturas comunes durante la sedimentación en una plataforma con un arrecife bien desarrollado y lagunas internas ligeramente profundas. (Méndez, 2009)



1. Boundstone coralino
2. Boundstone coralino
3. Grainstone ooidal
4. Grainstone bioclástico
5. Mudstone bioclástico
6. Wackstone bioclástico
7. Packstone bioclástico
8. Rudstone bioclástico
9. Packstone bioclástico
10. Packstone bioclástico con miliólidos
11. Mudstone dolomitizado
12. Wackstone de bioclastos e intraclastos
13. Dolomudstone arenoso
14. Bounstone estromatolítico

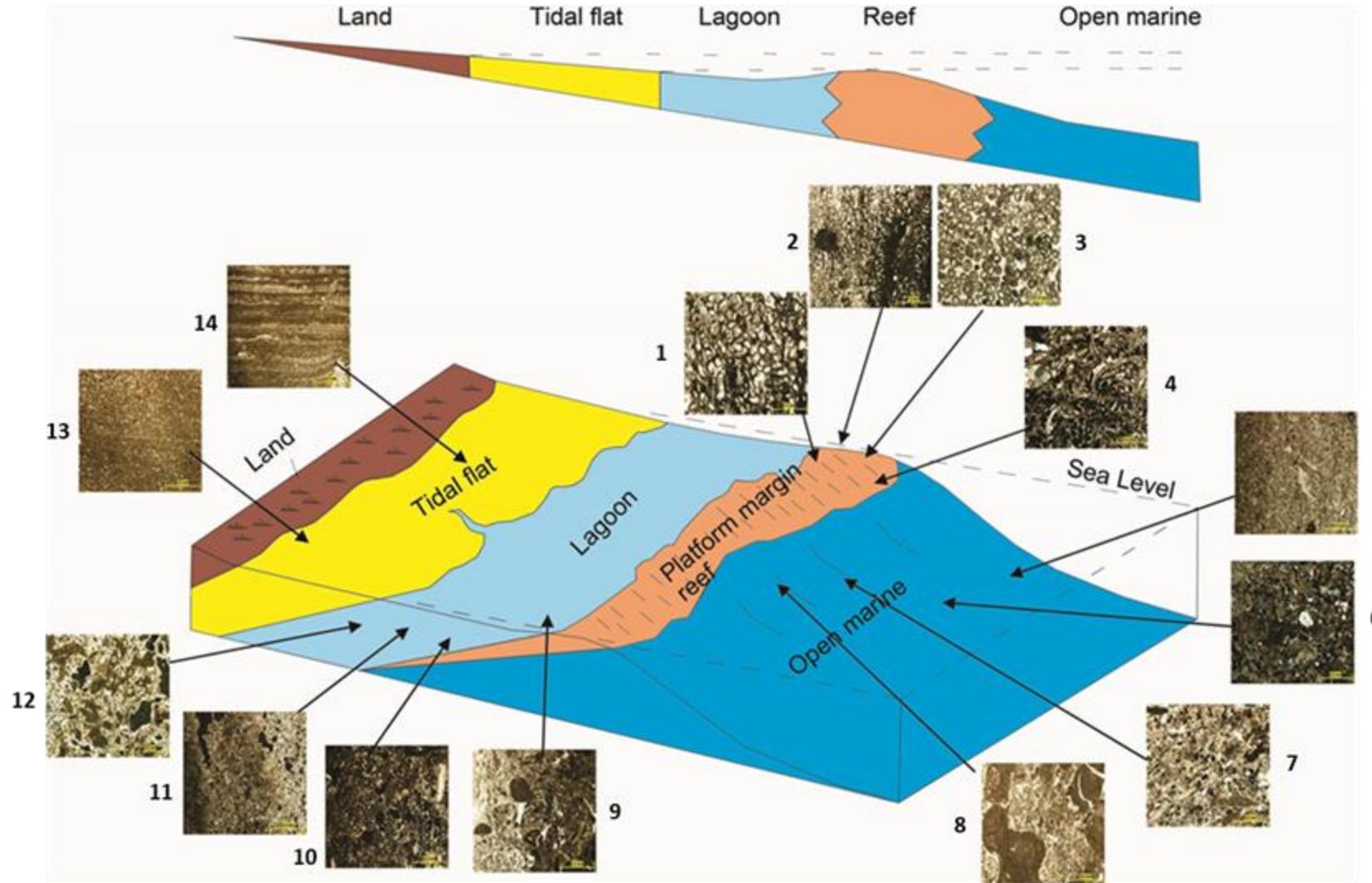


Fig. 4.22. Modelo deposicional de las facies carbonatadas de la Formación Qom (Irán), que muestra la formación de las facies en: mar abierto, arrecife, banco, laguna y planicie de marea en la plataforma carbonatada. Tomado de Sardarabadi *et al.* (2016).



MODELOS SEDIMENTARIOS CARBONÁTICOS

Sistemas Deposicionales Carbonáticos



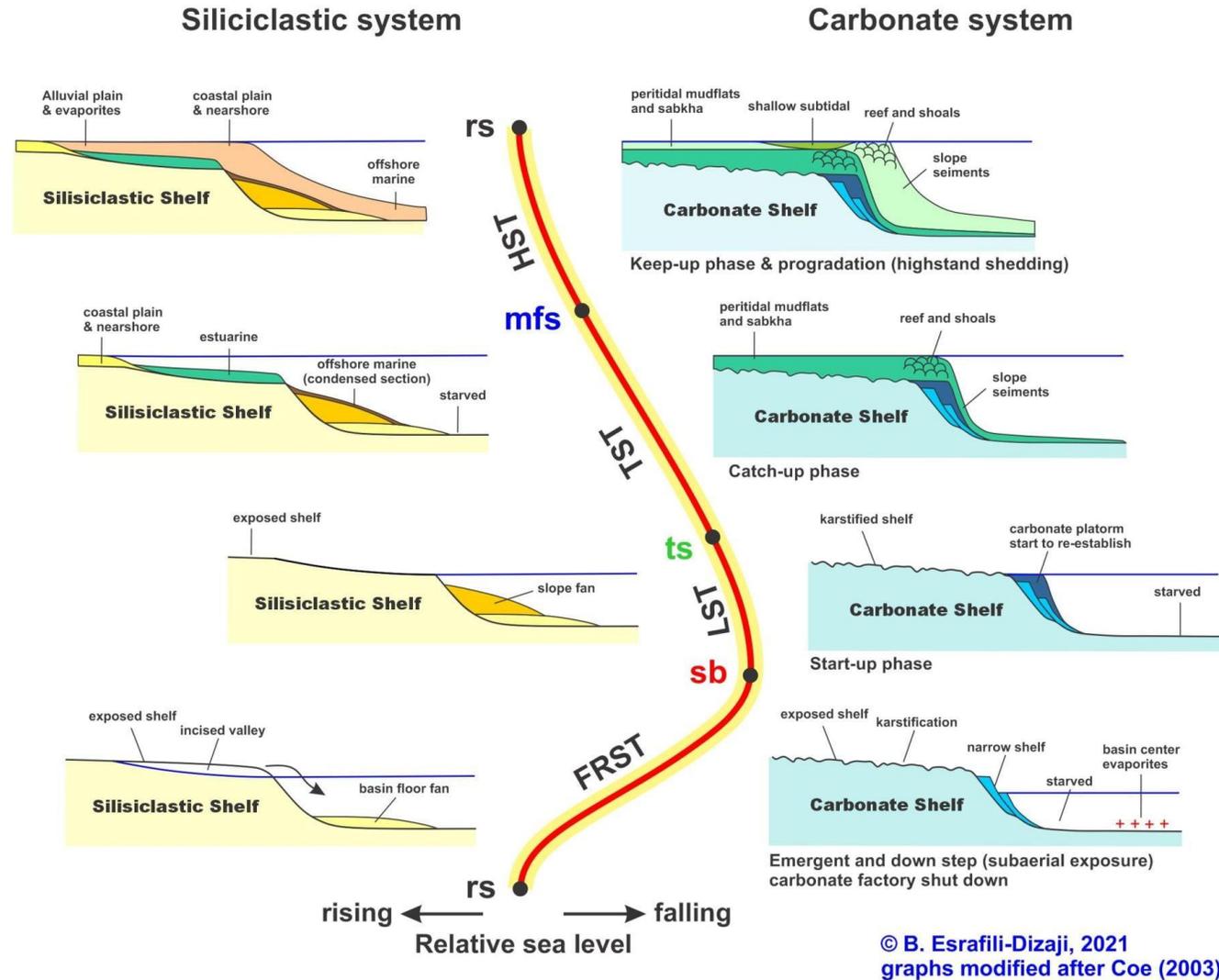


Fig. 4.23. Diferencias estratigráficas secuenciales entre sistemas siliciclásticos y carbonáticos.
(Tomado de Claude Morgan (2021), Mexico Petroleum Geoscience Group. <https://www.facebook.com/groups/430159417618680>)



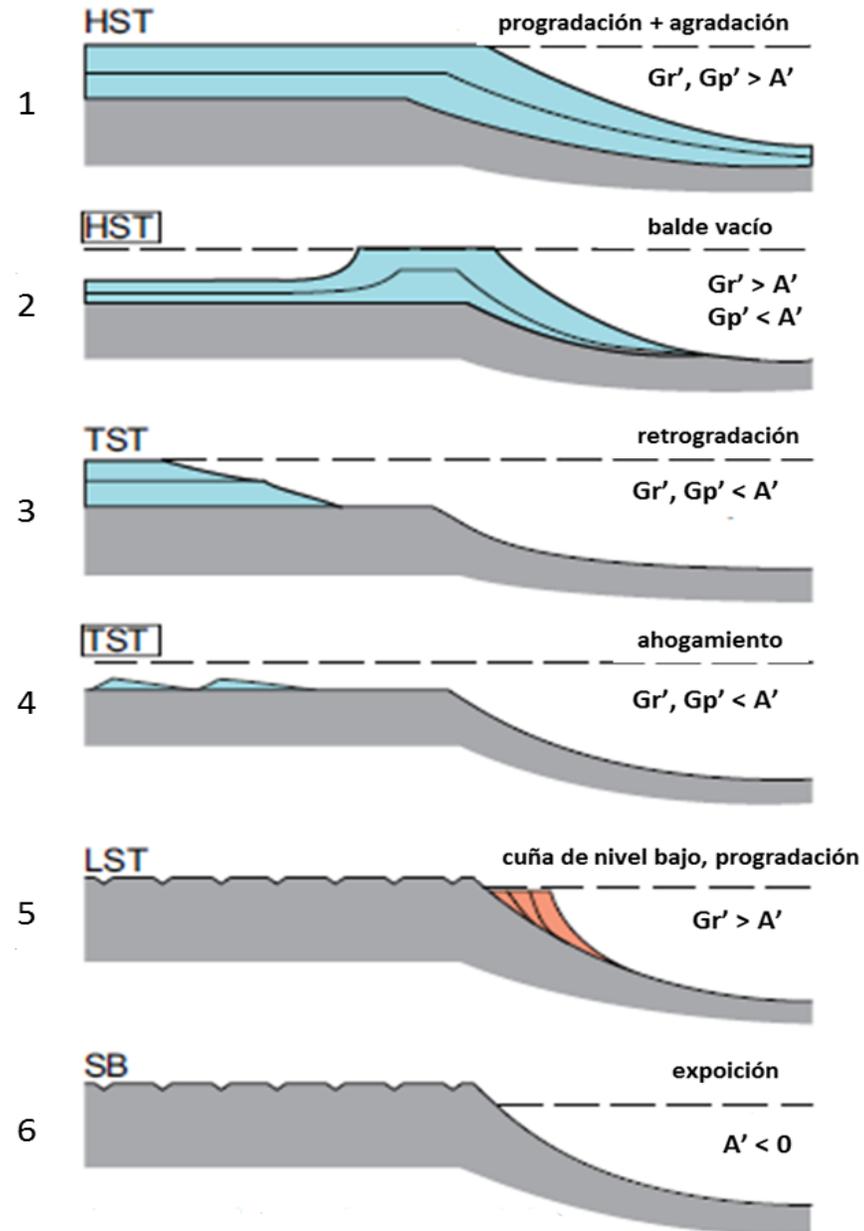


Fig. 4.24. Geometrías básicas de plataformas tropicales y su interpretación en términos de tasa de cambio en la acomodación, A' , y tasa de suministro de sedimentos, G' . La letra G representa el crecimiento de carbonatos, lo que indica que la mayor parte del material se produce dentro del entorno de depósito, aunque el transporte lateral puede ser significativo. Los paneles 1, 3, 5 y 6 son estrictamente análogos a los sistemas encadenados del modelo estándar para siliciclásticos. Los paneles 2 y 4 son específicos de los carbonatos tropicales. El balde vacío y el ahogamiento completo ilustran la importancia del potencial de crecimiento de los diversos elementos del sistema. La inmersión por debajo de la zona eufótica significa que se apagan partes o todo el sistema de producción. (modificado de Schlager, 2005)

A' = tasa de cambio de acomodación
 Gp = tasa de crecimiento de la plataforma
 Gr = tasa de crecimiento del borde de plataforma
 HST, TST, LST = sistemas depositacionales encadenados
 SB = límite de secuencia



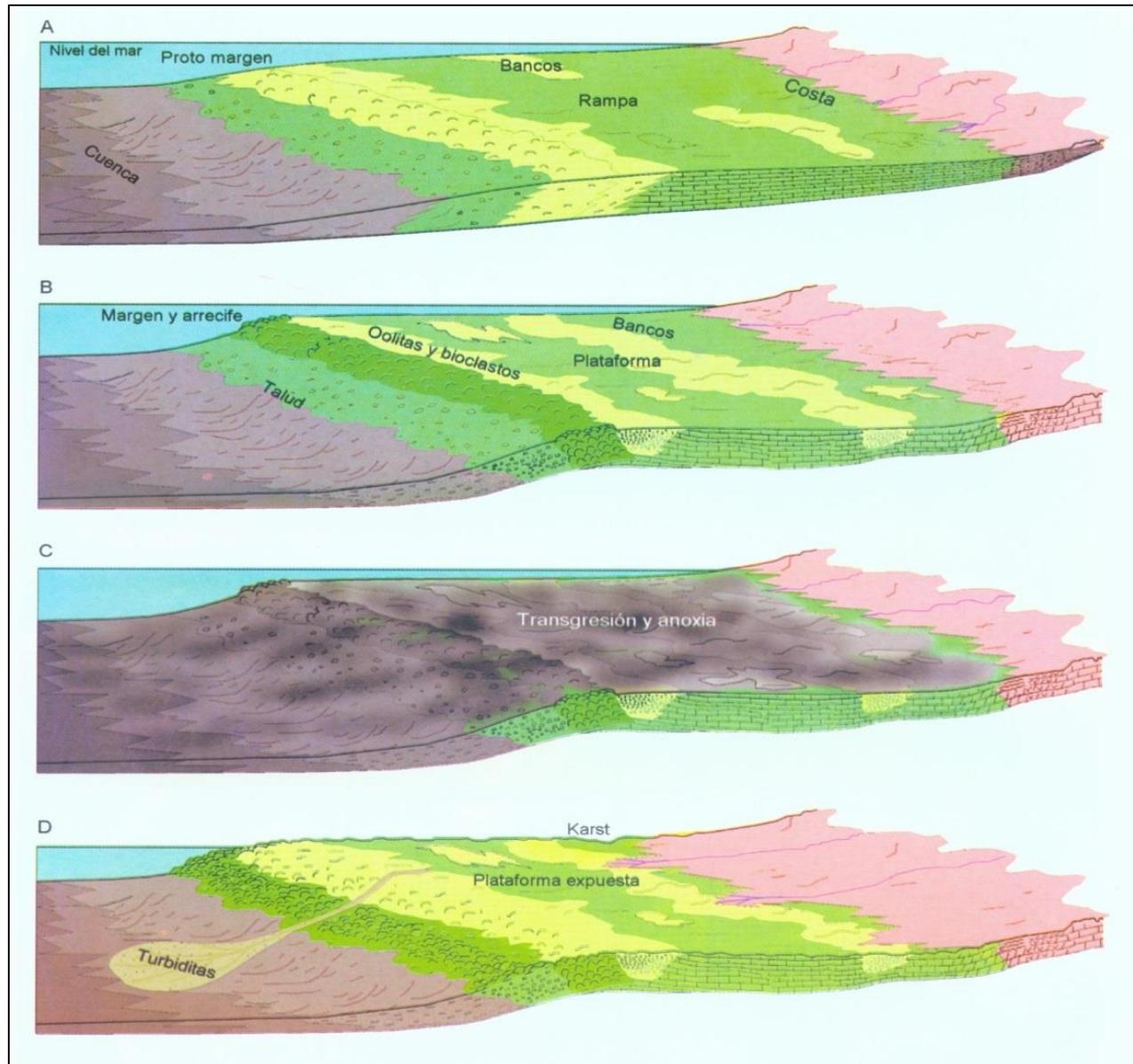


Fig. 4.25. Regresiones y transgresiones en plataformas carbonáticas. (Méndez, 2009).

- A. Etapa de transgresión. Sistema de carbonatos tipo rampa con solapamiento de las facies en dirección de la costa. Aumento del espesor cerca del proto margen debido a una mayor subsidencia.
- B. Etapa de regresión normal. Se aprecia un sistema de plataforma que evolucionó a partir de la rampa anterior. El margen, formado por un arrecife o bancos de bioclastos y oolitas, progresa en dirección de la cuenca. En la plataforma interna se forman bancos de oolitas y biostromos de bioclastos. Progradación de la llanura de marea.
- C. Etapa de transgresión. Un aumento rápido del nivel del mar y posibles corrientes de surgencia, hacen trasladar las características anóxicas del talud y la cuenca a la plataforma somera, ocasionando así el enriquecimiento y la preservación de la materia orgánica en la plataforma.
- D. Etapa de regresión forzada. El nivel del mar desciende y expone parcial o totalmente la plataforma. Erosión, diagénesis activa, formación de canales en la plataforma y cañones submarinos con turbiditas hacia el talud y cuenca. Avance de la línea de costa hacia la cuenca.

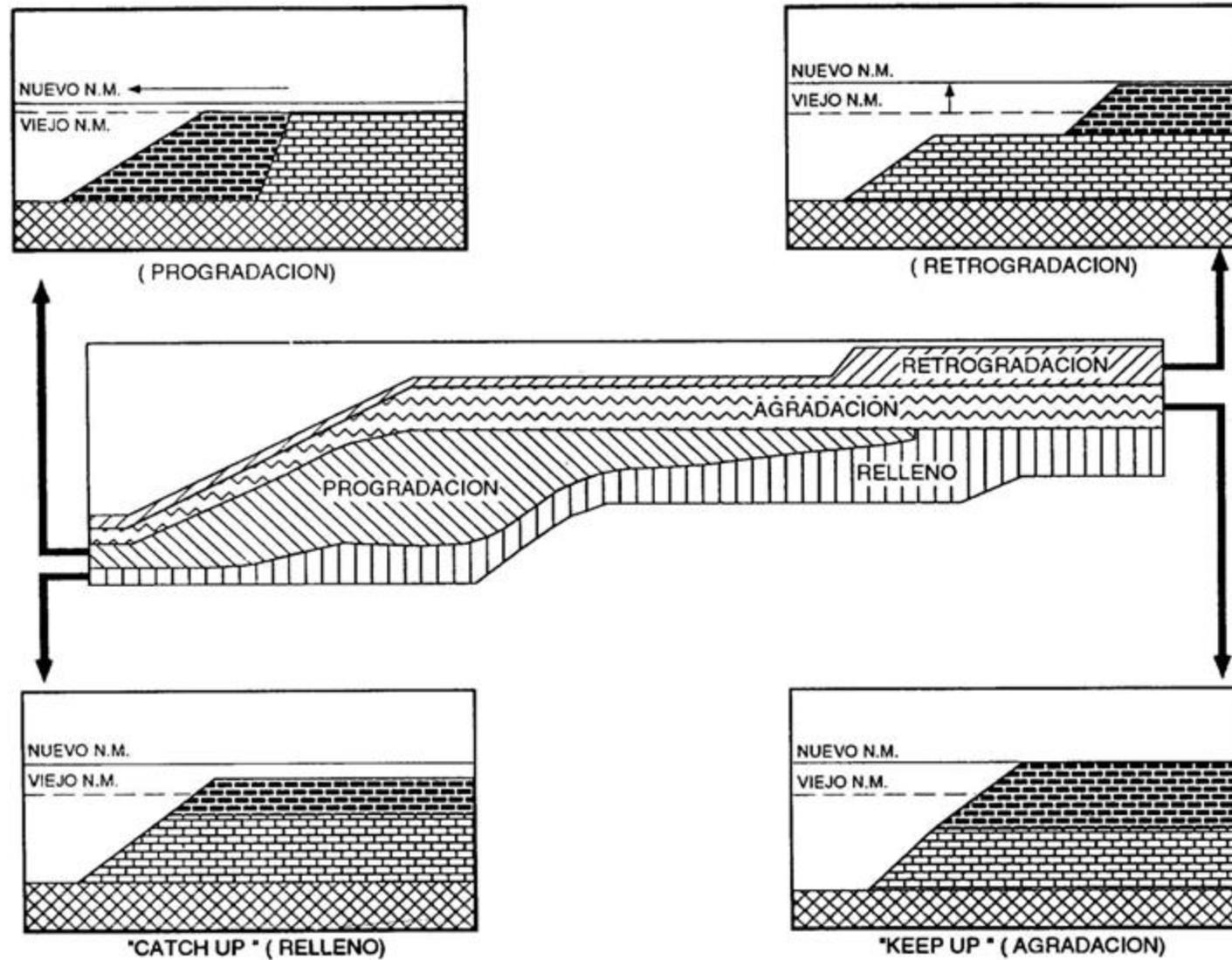


Fig. 4.26. Etapas genéticas en la depositación y desarrollo de rocas carbonáticas. (Murat y Azpiritzaga, 1995)



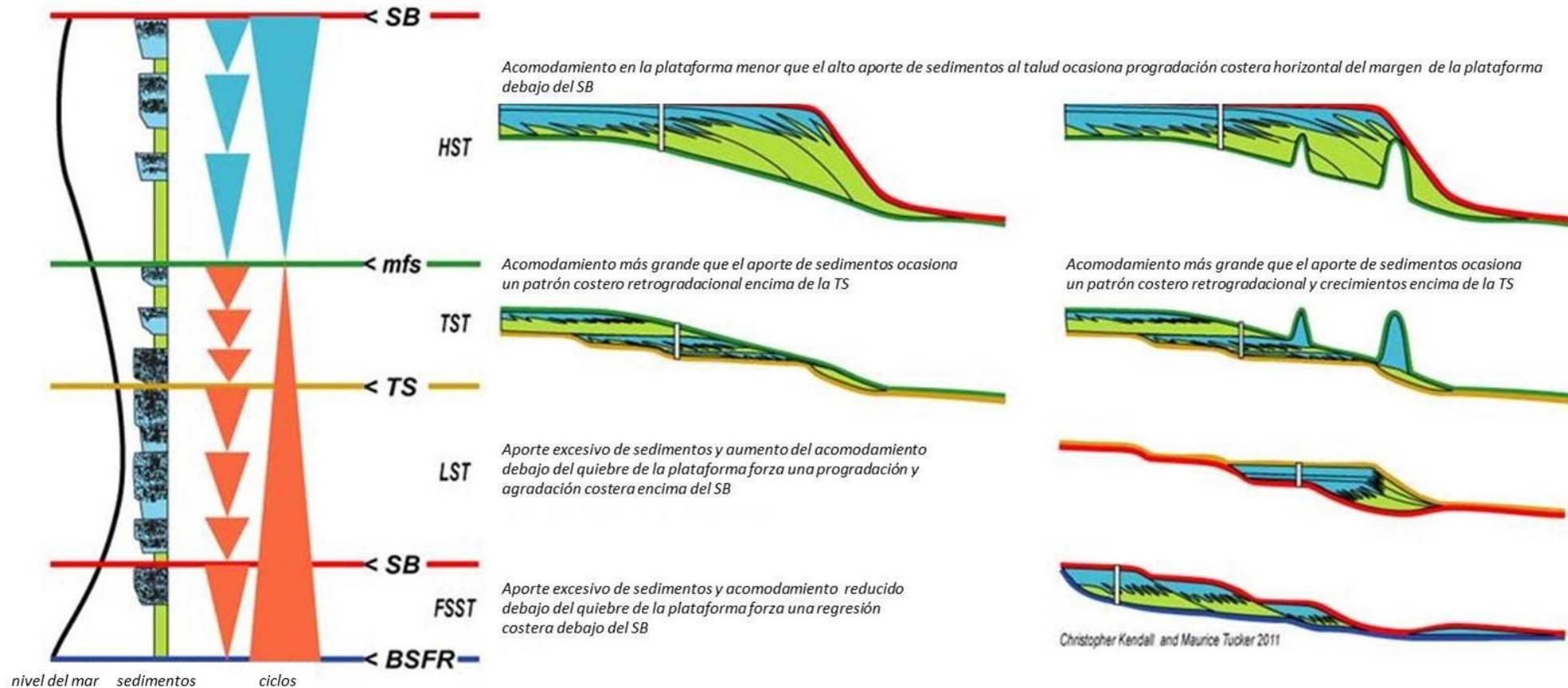
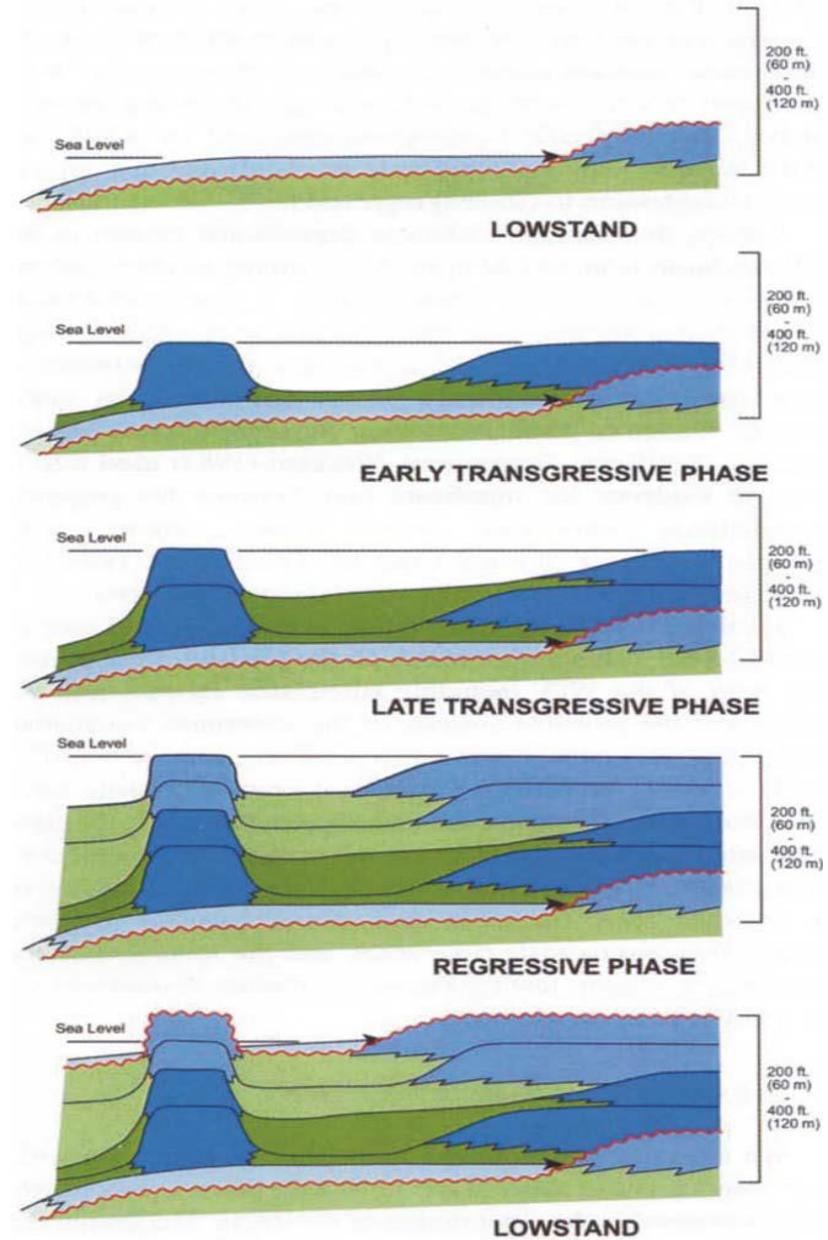


Fig. 4.27. Cambios relativos del nivel del mar, relaciones de acomodación de sedimentos y los sistemas depositacionales correspondientes y sus límites, durante el desarrollo y evolución de un margen continental dominado por depositación carbonática. (Modificado de <http://strata.geol.sc.edu/>)



Fig. 4.28. Evolución esquemática de un conjunto de sistemas arrecifales, Devónico de Alberta, Canadá. (Tomado de Potma *et al.*, 2001, en Miall, 2010)



MODELOS SEDIMENTARIOS CARBONÁTICOS

Superficies estratigráficas claves



LÍMITES DE SECUENCIAS ESTRATIGRÁFICAS

Las secuencias depositacionales comprenden principalmente dos tipos de límites estratigráficos (SB):

1. **Discordancias como límites de secuencia (SB)**
 - ✓ superficies de exposición subaéreas (“discordancias”)

2. **Superficies de cambio de sistema depositacional**
 - ✓ superficies de máxima regresión (MRS)
 - ✓ superficies de transgresión (TS)
 - ✓ superficies de máxima inundación (MFS)



SUPERFICIES ESTRATIGRÁFICAS CLAVES

Superficies de exposición subaérea y de alta evaporación:

- superficies kársticas
- superficies de brechas por disolución
- niveles dolomíticos y/o evaporíticos infrayacentes
- niveles de caliche
- niveles altamente bioturbados

Superficies de cambios abruptos de litofacies (textura depositacional), de biofacies y presencia de hardgrounds.

- superficies de transgresión y/o máxima regresión
- superficies de máxima inundación
- superficies de ahogamiento
- niveles endurecidos (hardgrounds)



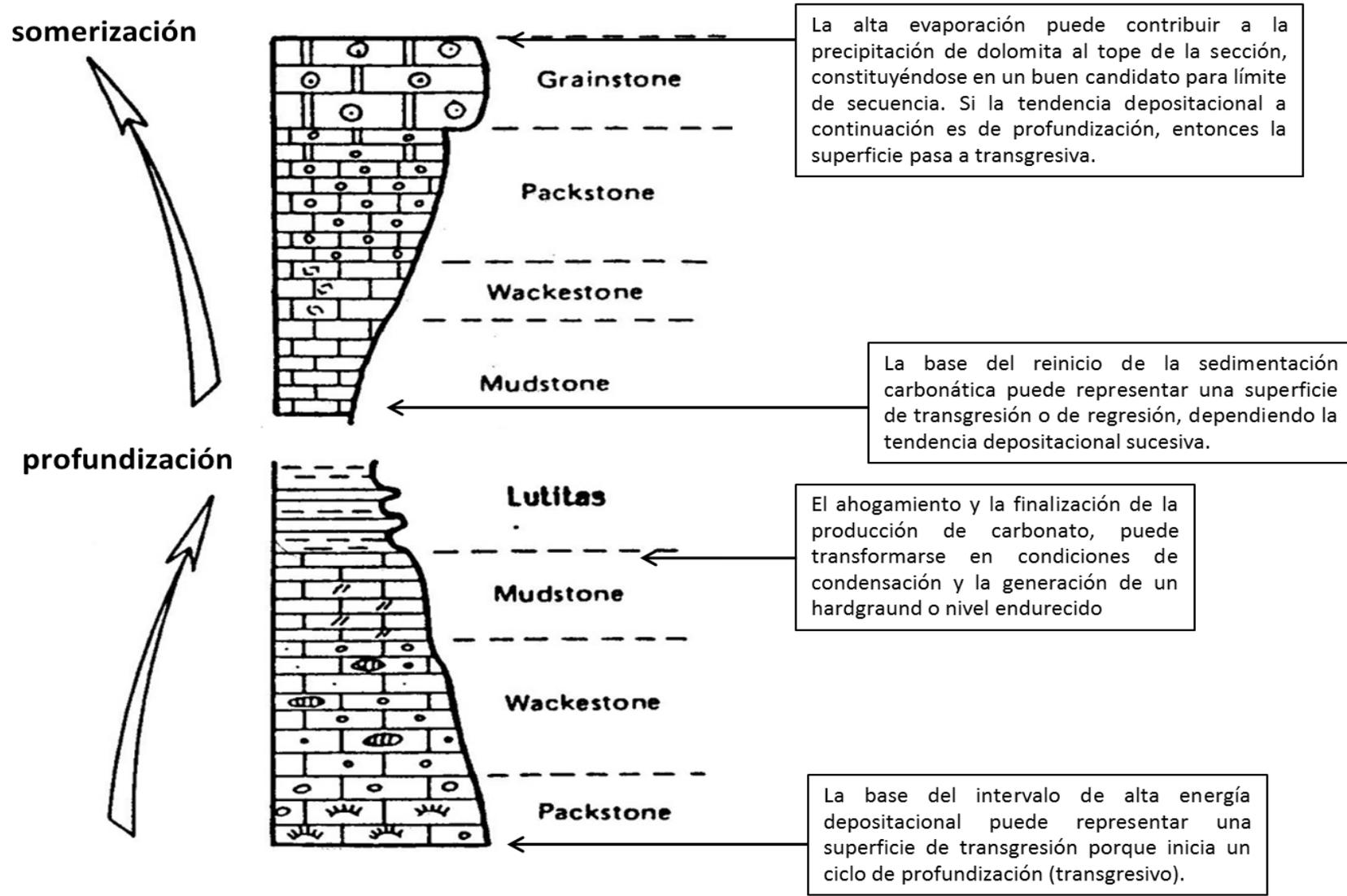


Fig. 4.29. Ciclos carbonáticos y superficies estratigráficas claves



Fig. 4.30. Ejemplos de dos típicos hardgrounds (A y B) cuyo tope está señalado en la punta del martillo. (<https://www.aventurasgeologicas.com/2015/06/mas-conceptos-molones-hoy-el-hardground.html>)



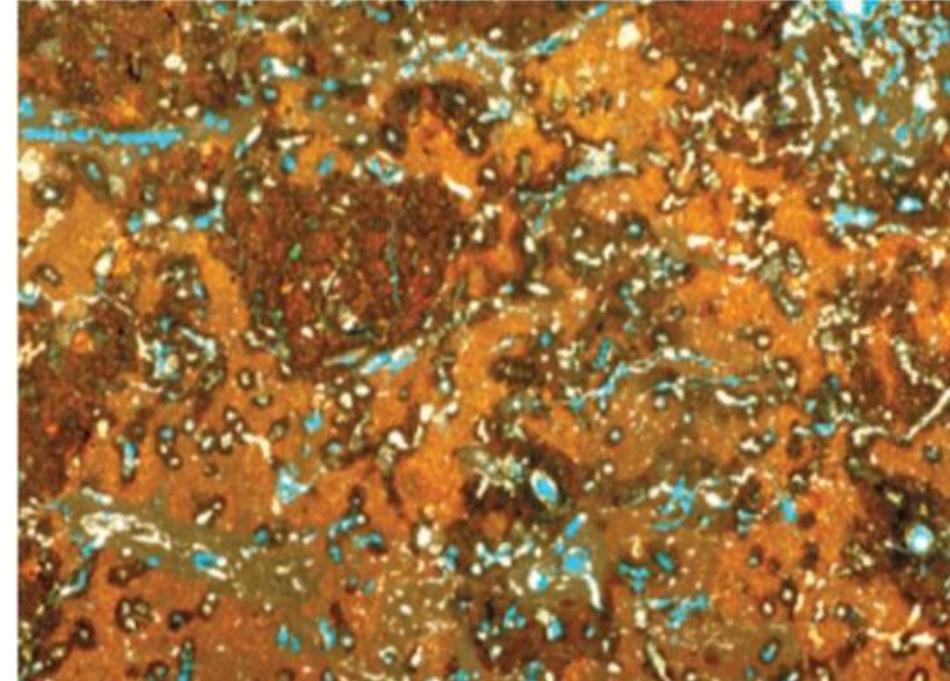
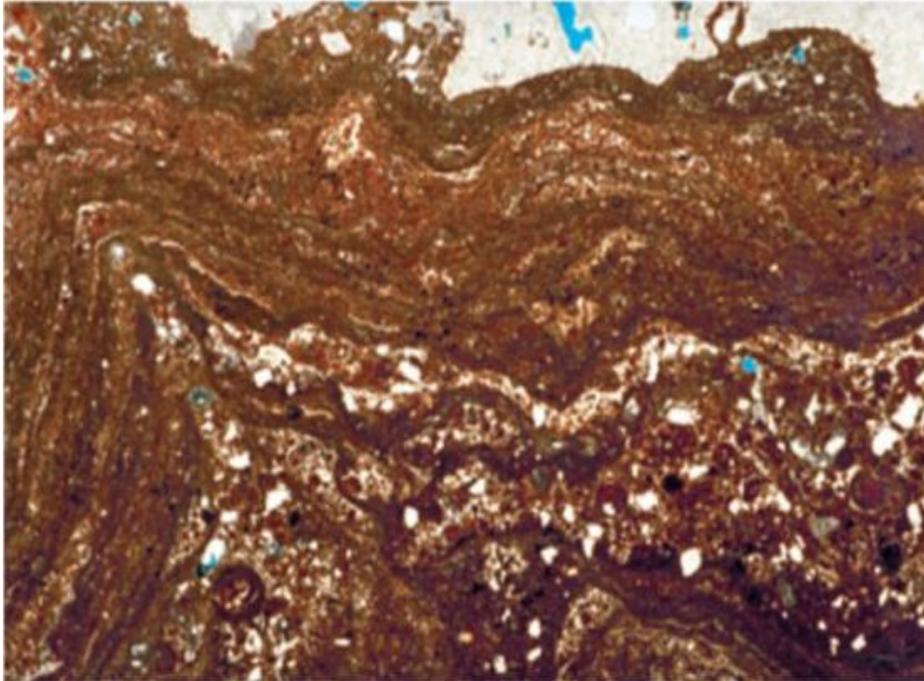


Fig. 4.31. Fotomicrografías de rocas carbonatadas indicativas de exposición subaérea y generación de paleosuelos (calcretas o caliches). Izquierda: costra laminada superficial característica en o cerca de la parte superior de la zona de infiltración meteórica, especialmente en entornos subhúmedos a áridos. Rizolitos de manganeso, guijarros ennegrecidos, glaebulas y pisoides (pisolitos) comúnmente acompañan a tales costras. Ancho de la imagen: 12.5 mm

Derecha: sección de suelo (calcreta) en la que el carbonato pedogénico de tamaño micrita ha engullido carbonatos y detritos clásticos terrígenos. Se notan túbulos radiculares bien desarrollados y revestidos de carbonato (rizolitos) de diferentes tamaños y nódulos incipientes (glaebules) de color marrón oscuro. Ancho de la imagen: 11 mm

Tomado de Scholle y Ulmer-Scholle (2003)



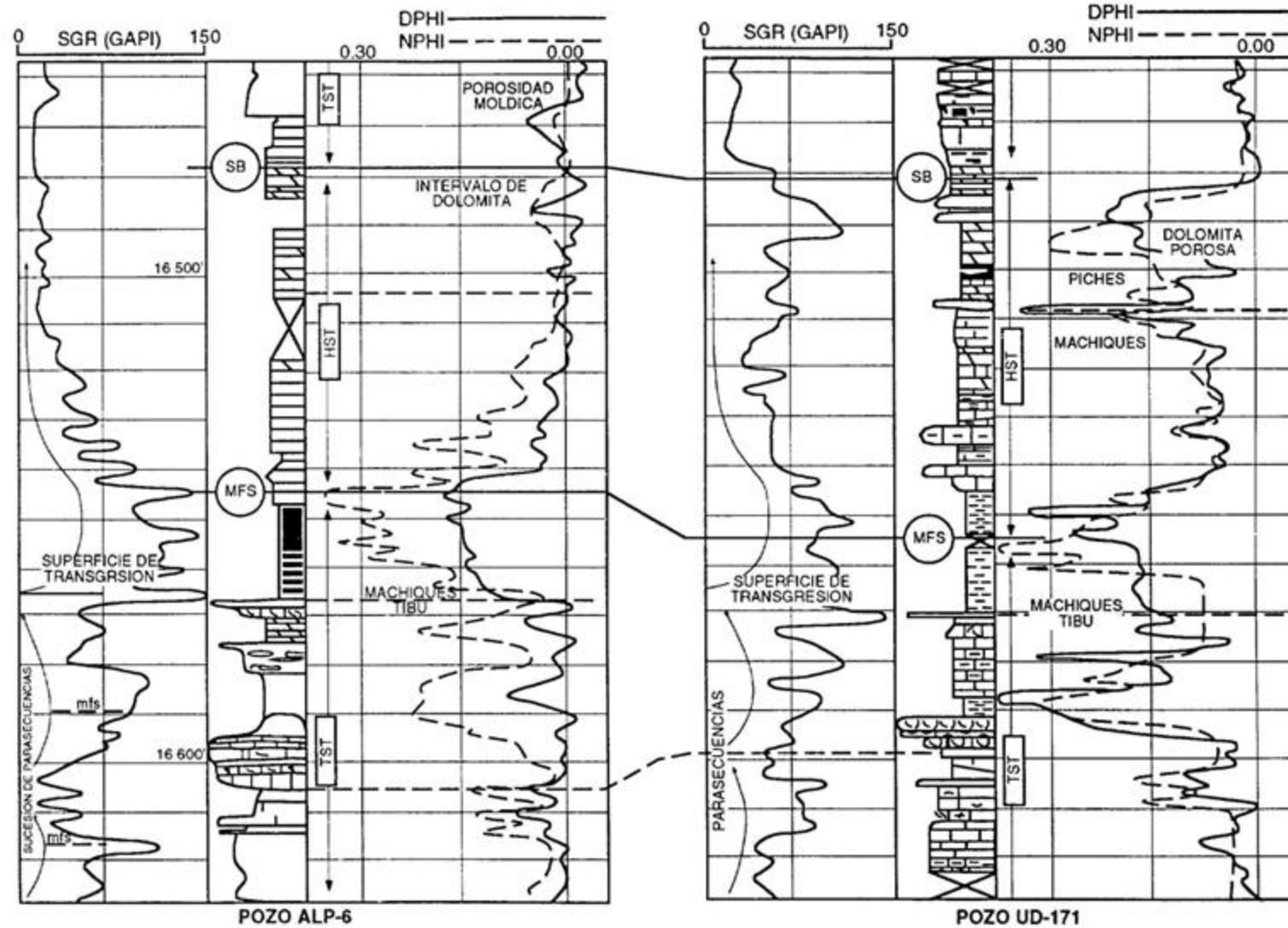


Fig. 4.32. Ejemplo de identificación de secuencias, superficies de transgresión e inundación (mfs) y límites de secuencias (sb) en las rocas carbonáticas del Cretácico Inferior de la Cuenca de Maracaibo, Venezuela. (Figura tomada de Murat y Azpirixaga, 1995)



