

Roma 28-29 Aprile 2011

**Caratterizzazione sedimentologico-paleoambientale delle successioni
carbonatiche tramite l'analisi delle facies e dei processi diagenetici:
esempi evolutivi di sistemi deposizionali carbonatici mesozoici e terziari
dell'area circummediterranea**

lezioni curate da Flavio Jadoul

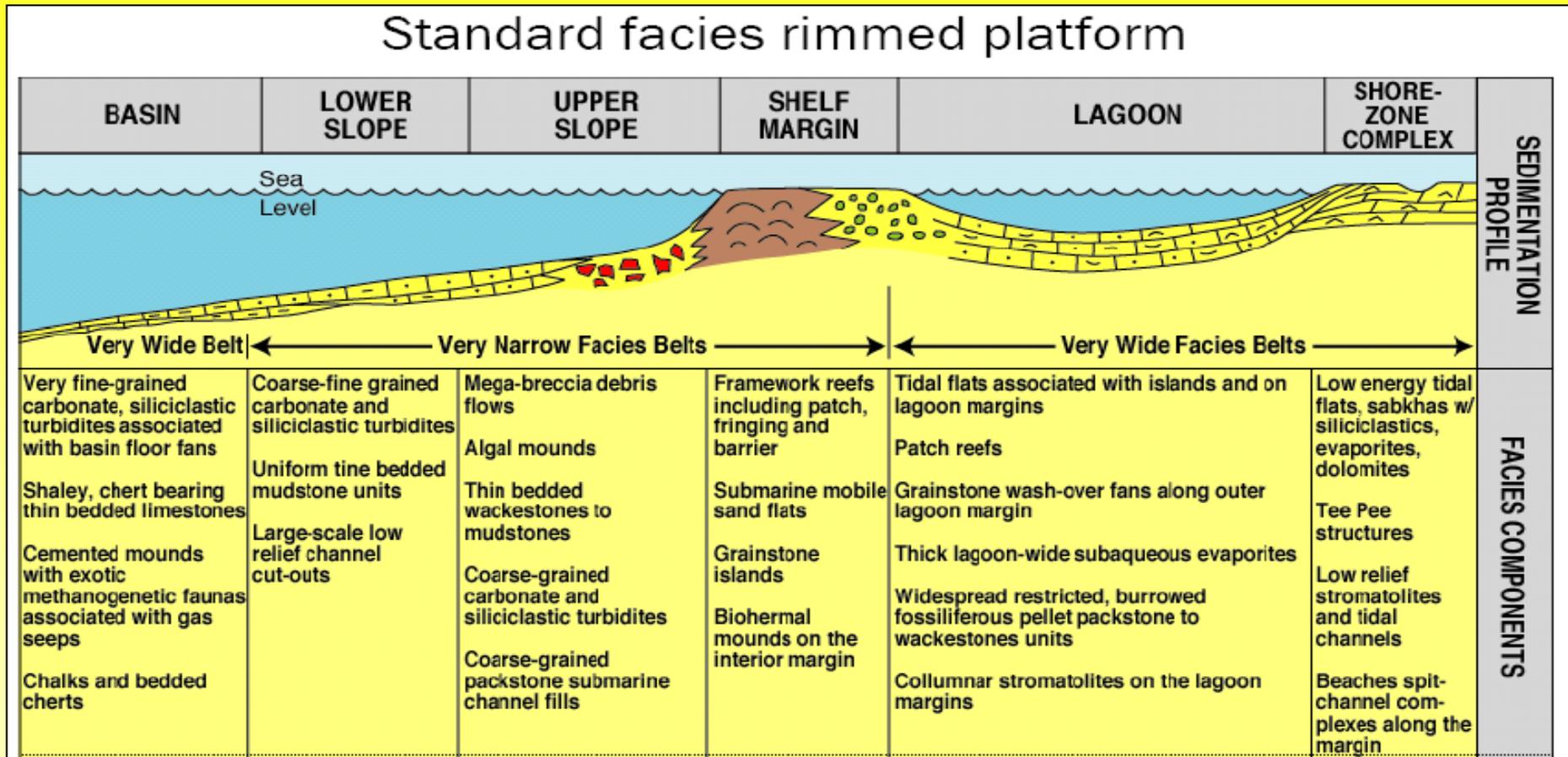
Dipartimento Scienze della Terra Università degli Studi di Milano

28 Aprile pomeriggio ore 14.00

2 L'analisi di facies delle piattaforme e delle rampe carbonatiche:

- a) La piattaforma interna,
- b) Le facies di alta energia : spiagge, barre e margini sabbiosi
- c) Lo shelf subtidale e le facie smarginali biocostruite
- d) Le facies di scarpata e pendio

L'analisi di facies delle piattaforme e rampe carbonatiche



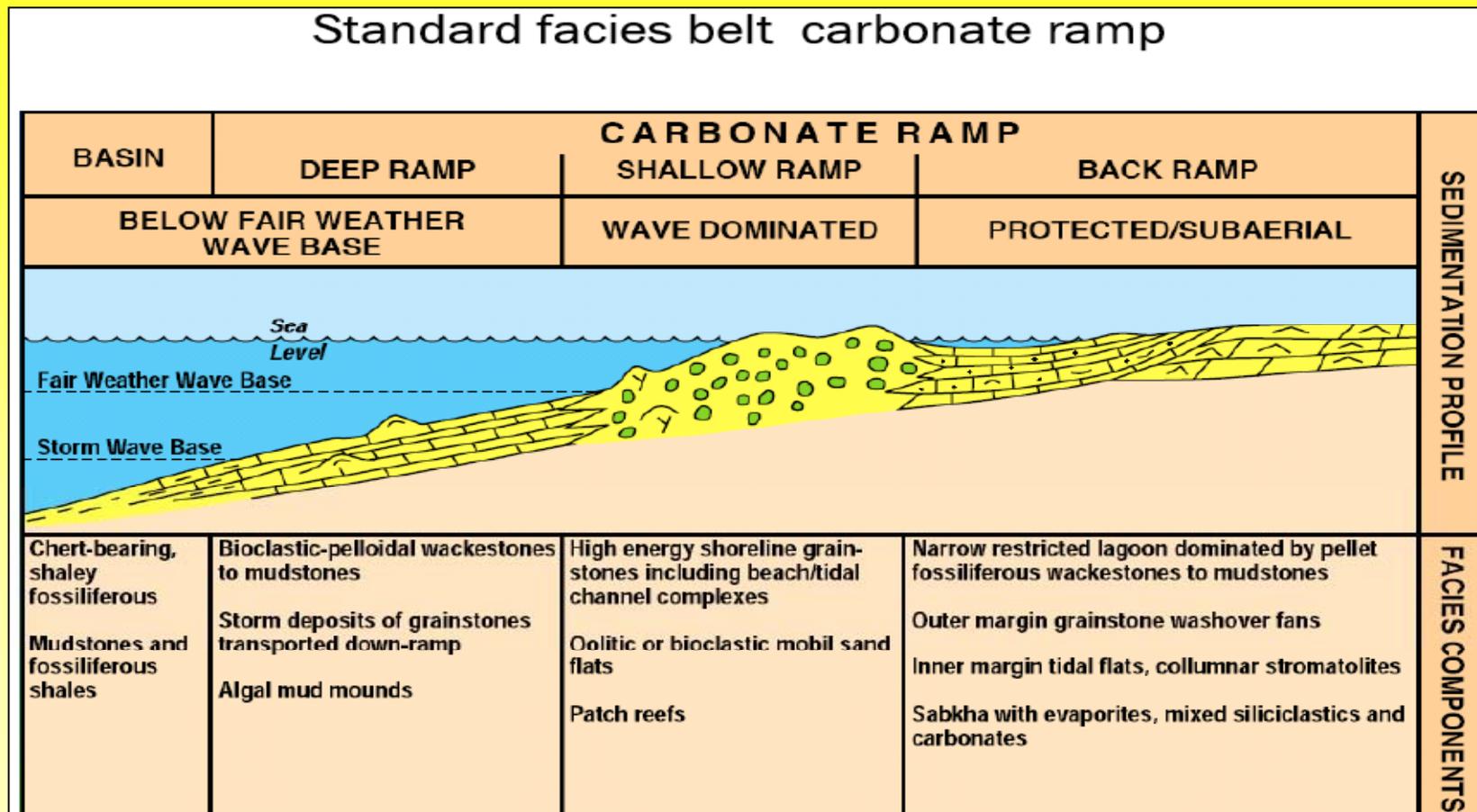
Wilson, 1975

Fattori di controllo della piattaforma interna: batimetria, idrodinamismo, barriere di protezione, distanza dal margine, ampiezza fluttuazioni maree, clima umido o arido. A grande scala le facies della piattaforma interna interna **risultano sempre stratificate**, in particolare quelle più interne tidali (vedi cicli peritidali)

Idealized sequence of Standard Facies Belts (from Wilson, 1975)

re-drawn by Nassir Alnaji (2002)

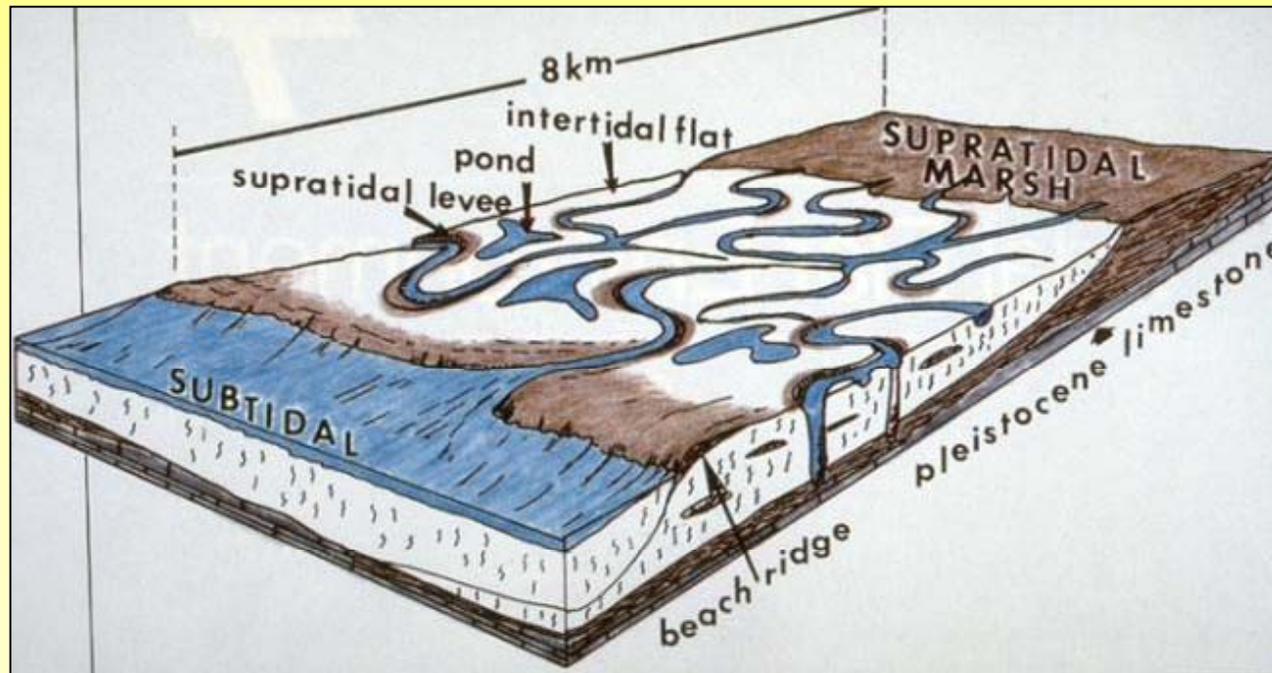
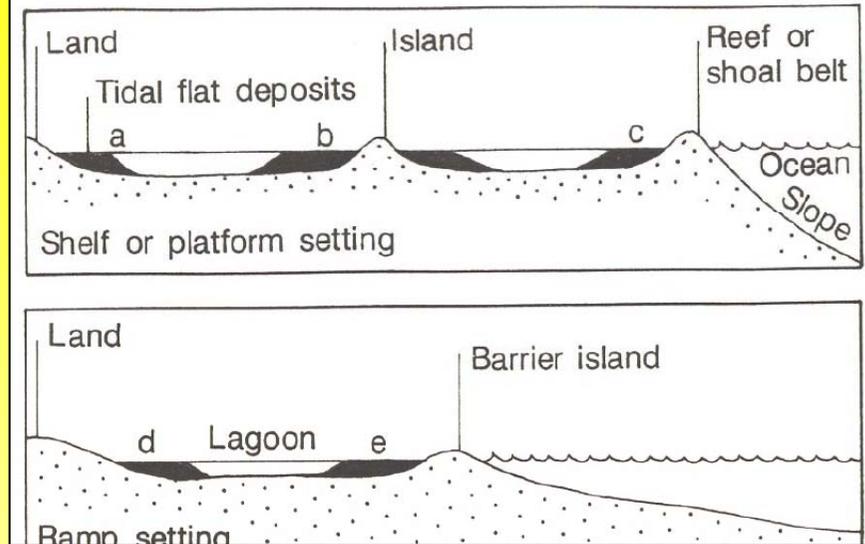
Belt	BASIN	OPEN SEA SHELF	DEEP SHELF MARGIN	FORESLOPE	ORGANIC BUILD UP	WINNOWERD EDGE SANDS	SHELF LAGOON OPEN CIRCULATION	RESTRICTED CIRCULATION SHELF & TIDAL FLATS	EVAPORITES ON SABKHAS - SALINAS
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diagrammatic cross section & Facies Number									
Facies	a) Fine Clastics b) Carbonates c) Evaporites	a) Carbonates b) Shale	Toe of Slope carbonates	a) Bedded fine grain & slumps b) Foreset debris & lime sands c) Lime mud masses	a) Boundstone b) Crust on accumulations of debris lime mud; bindstone c) Bafflestone	a) Shoal lime sands b) Islands w. dune sands	a) Lime sand bodies b) Wackestone-mudstone areas, bioherms c) Areas of clastics	a) Bioclastic wackestone, lagoons and bays b) litho-bioclastic sands in tidal channels c) Lime mud-tide flats d) Fine clastic units	a) Nodular anhydrite & dolomite on salt flats. b) Laminated evaporites in ponds
Lithology	Dark shale or silt, thin limestones (starved basin); evaporite fill w. salt	Very fossiliferous limestone interbedded with marls; well segregated beds.	Fine grain limestone; cherty in some cases.	Variable, depending on water energy upslope; sedimentary breccia and lime sands	Massive limestone-dolomite	Calcarenitic-oolite lime sand or dolomite	Variable carbonate and clastics	Generally dolomite and dolomitic limestone	Irregularly laminated dolomite and anhydrite, may grade to red beds
Color	Dark brown, black, red	Gray, green, red, brown	Dark to light	Dark to light	Light	Light	Dark to light	Light	Red, yellow, brown
Grain type and depositoinal texture	Lime mudstone; fine calcisiltites	Bioclastic and whole fossil wackestone; some calcisiltites	Mostly lime mudstone with some calcisiltites	Lime silt and bioclastic wackestone-packstone; lithoclastics of varying sizes	Boundstones and pockets of grainstone; packstone	Grainstones well sorted, rounded	Great variety of textures; grainstone to mudstone	Clotted, pelleted mudstone & grainstone; laminated mudstone; coarse lithoclastic wackestone in channels	
Bedding and sedimentary structure	Very even mm laminations; rhythmic bedding; ripple cross lamination	Thoroughly burrowed; thin to medium; wavy to nodular beds; bedding surfaces show diastems	Lamination may be minor; often massive beds; lenses of graded sediment; lithoclasts & exotic blocks. Rhythmic beds	Slump in soft sediments; sofeset bedding; slope bioherms; exotic blocks	Massive org. structure or open framework with roofed cavities; Lamination contrary to gravity	Medium to large scale crossbedding; festoons common	Burrowing traces very prominent	Birdseye, stromatolites, mm lamination, graded bedding, dolomite crusts on flats. Cross-bedded sand in channels	Anhydrite after gypsum; nodular, rosettes, chickenwire, and blades; irregular lamination; carbonate caliche
Terrigenous clastics admixed or interbedded	Quartz silt & shale; fine grain siltstone; cherty	Quartz silt, siltstone, & shale; well segregated beds	Some shales, silt, & fine grained siltstone	Some shales, silt, & fine grained siltstone	None	Only some quartz sand admixed	Clastics and carbonates in well segregated beds	Clastics and carbonates in well segregated beds	Windblown, land derived admixtures; clastics may be very important units
Biota	Exclusively nektonic-pelagic fauna preserved in abundance on bedding planes	Very diverse shelly fauna preserving both infauna & epifauna	Bioclastic detritus derived principally from upslope	Colonies of whole fossil organisms & bioclastic debris	Major frame building colonies with ramose forms in pockets; in situ communities dwelling in certain niches	Worn and abraided coquinas of forms living at or on slope; few indigenous organisms	Open marine fauna lacking; mollusca, sponges, forams, algae abundant; patch reefs present	Very limited fauna, mainly gastropods, algae, certain foraminifera & ostracods	Almost no indigenous fauna, except for stromatolitic algae



Nei sistema deposizionale di rampa le facies e gli ambienti deposizionali possono essere comparabili a quelli delle piattaforme carbonatiche, ma la loro estensione è generalmente più ridotta (soprattutto le lagune) (vedi situazioni del Golfo Persico).

Le associazioni di facies della piattaforma carbonatica e della rampa prossimale le associazioni di facies di piana tidale, laguna, pond, canali tidali

Location of peritidal deposits in shelves and ramps



Il record sedimentario documentato dalle litofacies di piattaforma interna nel contesto della Stratigrafia Sequenziale

CARBONATE COASTAL, SHELF & MARGINAL SETTINGS

PROXIMAL

PROGRADATIONAL TRAJECTORY - KEEP-UP RESPONSE TO STILL-STANDS AT HIGH & LOW SEA LEVEL POSITIONS

DISTAL

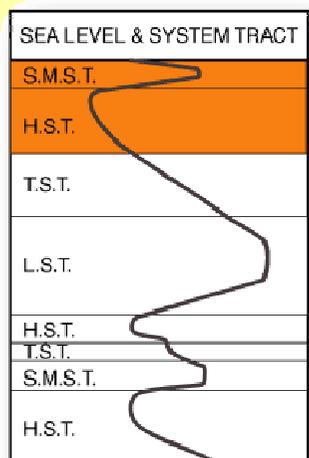
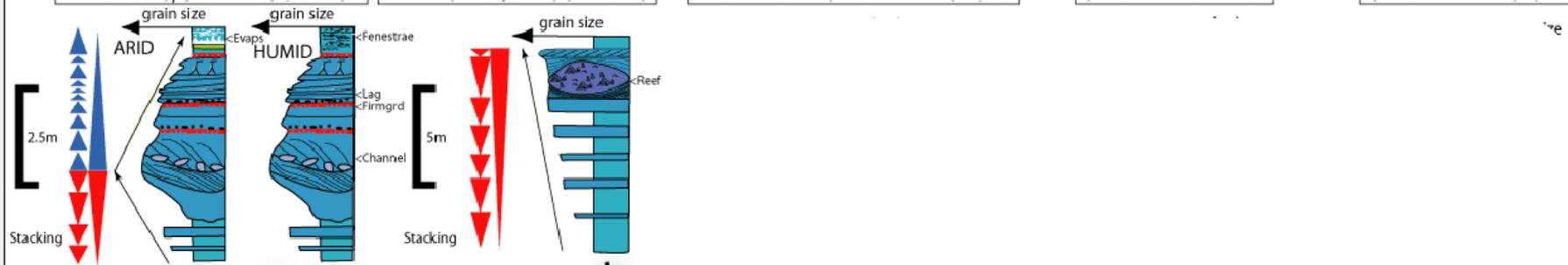
TIDAL FLATS, CHANNELS & BEACH

INNER SHELF/LAGOON REEFS

HIGH ENERGY SHELF GRAIN SHOAL

SHELF MARGIN REEF

SHELF MARGIN SLOPE

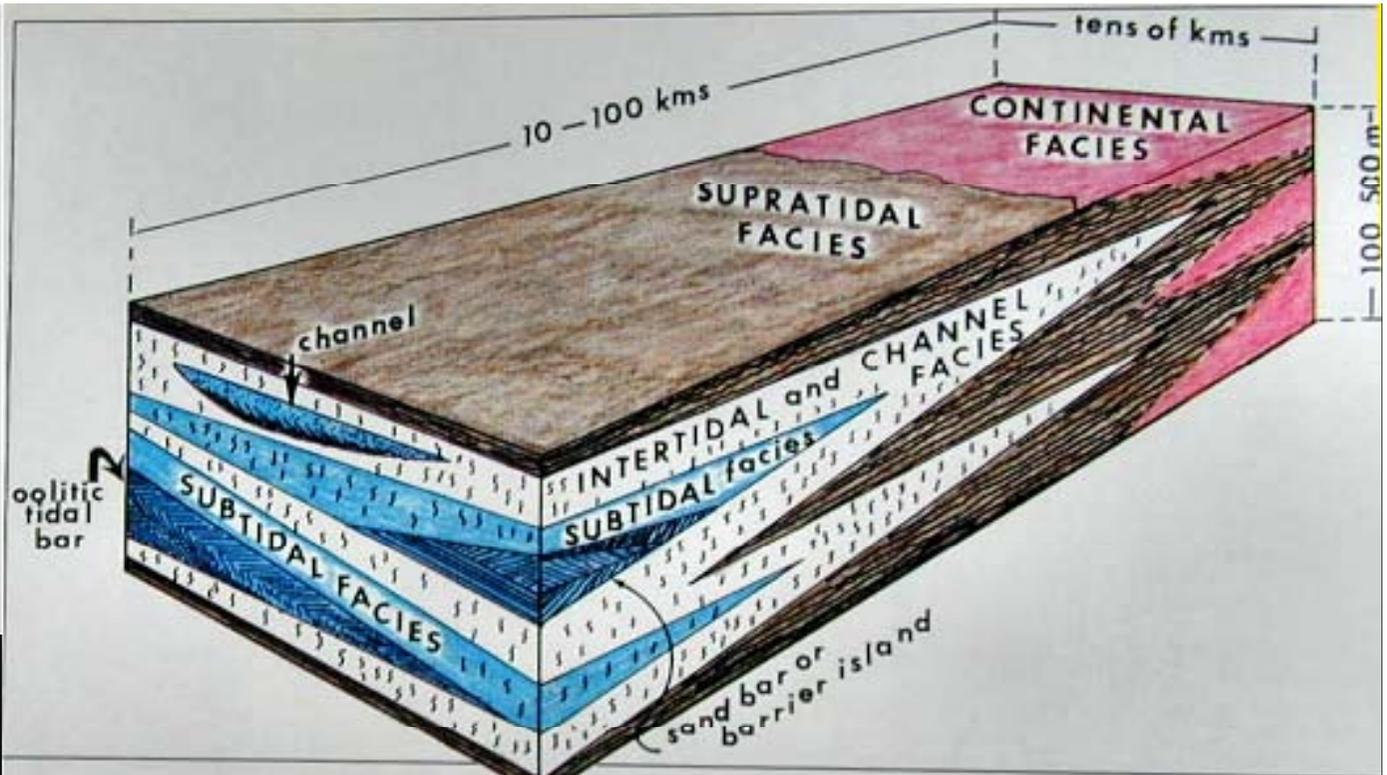


HIGHSTAND
CARBONATE
STACKING

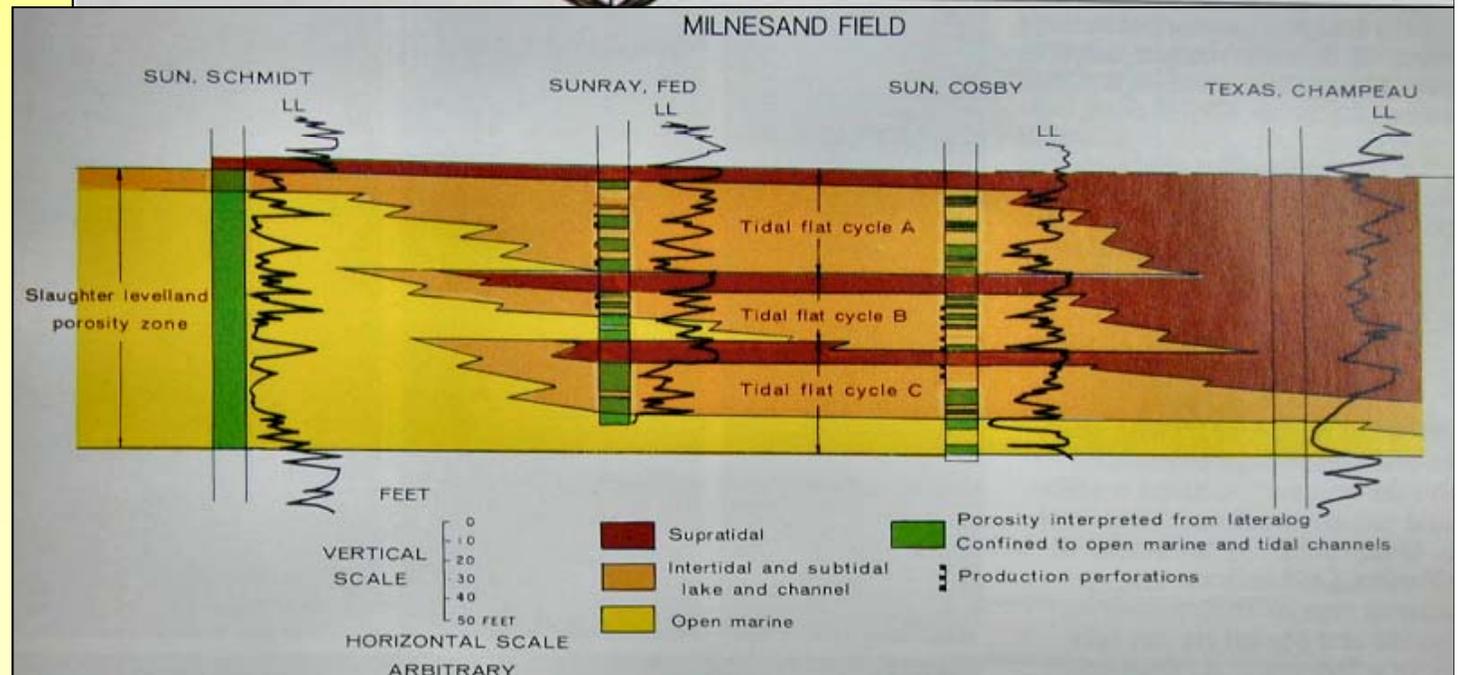


C.G. St. C. Kendall 2004

Figure 42—Idealized tidal flat model combining onlap and offlap features of Andros Island and Persian Gulf tidal flats to show stratigraphic traps and related porous accumulations. Trapping conditions occur where intertidal and channel facies pinch out beneath and within relatively impermeable supratidal facies. Supratidal facies in most ancient examples are sealed with anhydrite and other evaporitic minerals. Additional reservoir development may occur in tidal deltas, channel and barrier island sands that lie seaward of supratidal and continental facies. In most ancient examples supratidal facies are composed of relatively impermeable micro-dolomite, whereas subtidal facies tend to be composed of more permeable, coarser-grained dolomite.



Esempio di variazione laterale delle facies tidali di una successione permiana del Texas.



Concetti generali sulle piane tidali

Le piane tidali comprendono numerosi subambienti:

- canali di marea,
- spiagge,
- argini naturali,
- stagni,
- aree piatte comprese tra i canali,
- zone con “tappeti algali”,
- paludi a mangrovie, ecc.

Parte delle piane tidali è permanentemente subacquea, come gli stagni ed i canali più ampi, mentre zone molto estese subiscono emersione e sommersione durante i cicli delle maree, con continuità o limitatamente ad alcune stagioni dell'anno

Piane tidali

La sedimentazione avviene principalmente **durante le maggiori tempeste**.

Le acque ricoprono le piane ad ogni ciclo di marea, ma nei periodi di calma esse trasportano solo piccole quantità di sedimento. Durante le tempeste, invece, viene messo in sospensione materiale della antistante zona marina, che viene poi trasportato sulle piane tidali ove viene deposto a costituire un velo di fango carbonatico pellettifero.

- Negli **stagni e nella porzione intertidale inferiore delle piane questo materiale viene mescolato al sedimento preesistente** ad opera degli organismi fossatori;
- Nelle aree intertidali superiori e nelle zone sopratidali il letto di tempesta viene **intrappolato dai film microbici** del “microbial” o “algal mat”.

I canali di marea .

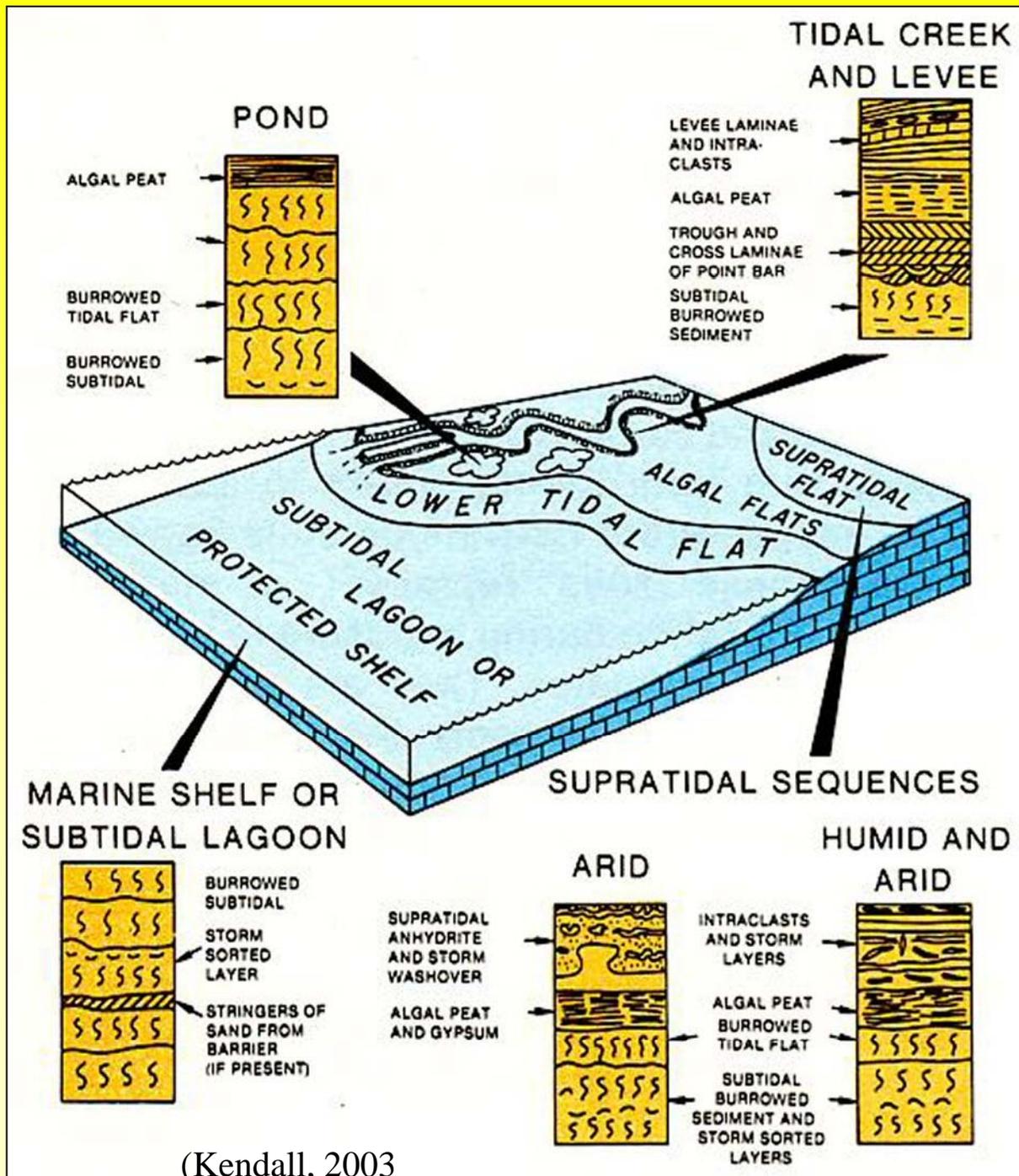
Serpeggiano attraverso le piane tidali e rimaneggiano e ridistribuiscono i sedimenti subtidali della fattoria carbonatica.

a) In corrispondenza della sponda esterna dei meandri avvengono processi erosivi, mentre sul lato interno (“point bar”) e sugli argini naturali si ha sedimentazione.

b) **Sul fondo dei canali maggiori si osservano intraclasti e bioclasti, nei canali minori prevale il fango carbonatico pellettifero.** Nelle zone intertidali e negli stagni domina il fango carbonatico pellettifero, con un gran numero di organismi.

c) Nei sedimenti delle zone più interne (**zona intertidale superiore e sopratidale**) sono abbondanti le **fenestrae**, i **“mud cracks”**, i **film microbici**. Questi ultimi danno origine a laminazioni stromatolitiche, intrappolando il sedimento.

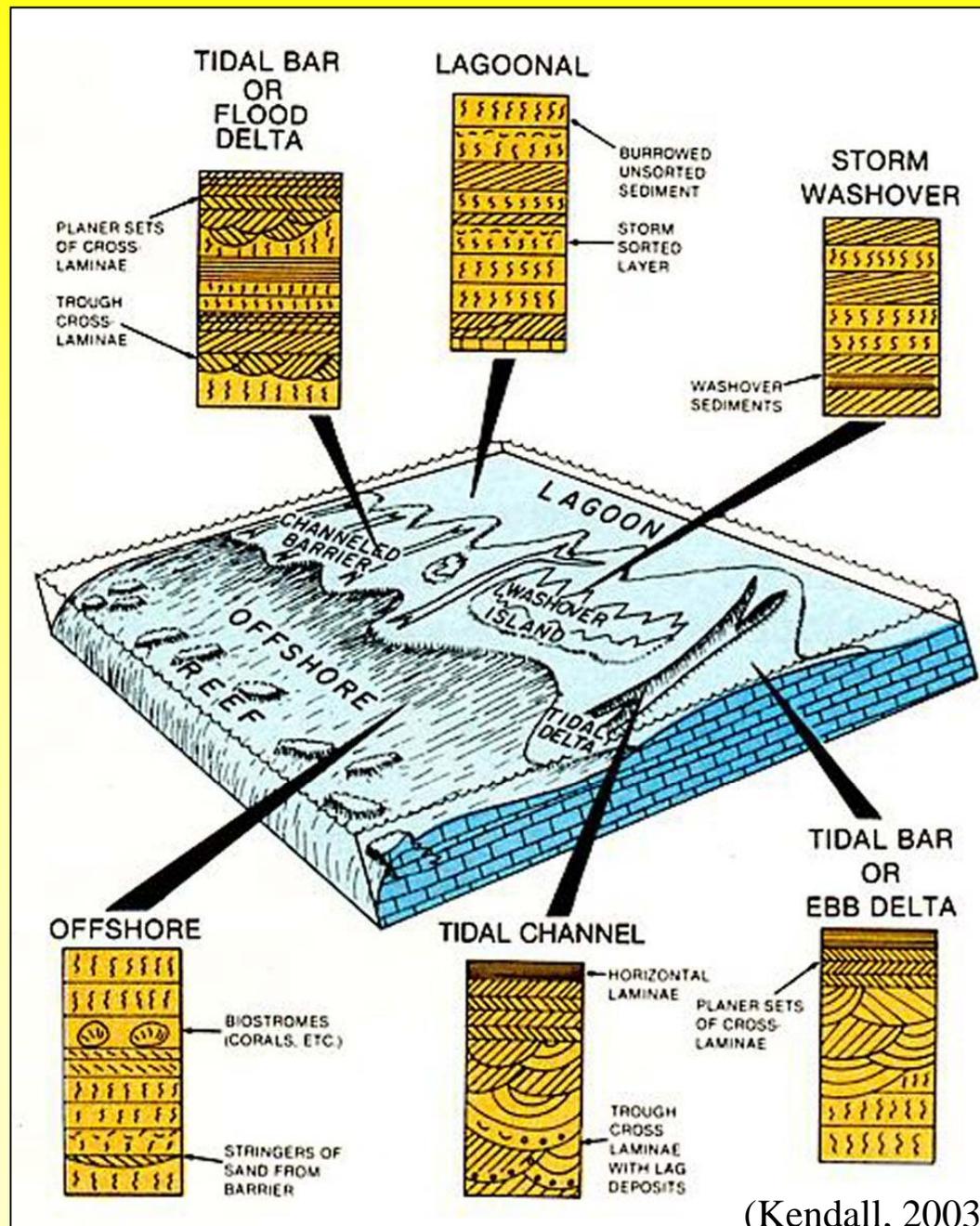
d) Nella porzione più elevata delle berme di spiaggia e degli argini naturali possono precipitare aragonite e dolomite che cementano precocemente il sedimento superficiale (beach rock), formando delle croste che saltuariamente vengono rotte e rimaneggiate, dando origine a ruditi a clasti piatti.



(Kendall, 2003)

A) Associazioni di litofacies carbonatiche degli subambienti più protetti e interni la piattaforma (pond, lagune ristrette isolate, piana inter-sopratidale, argini di canali tidali superiori)

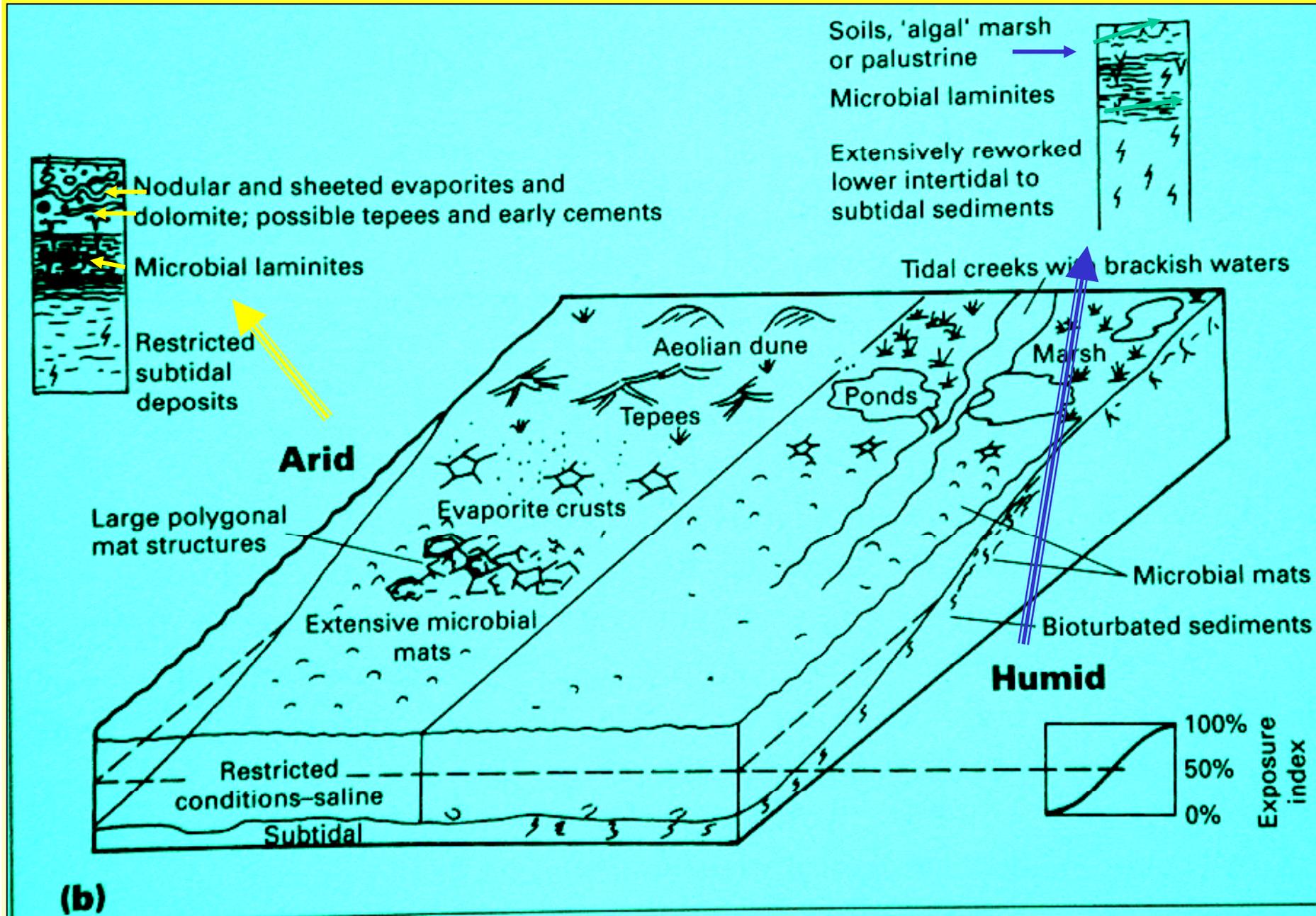
Queste associazioni di litofacies si organizzano sovente in cicli peculiari (vedi di seguito l'approfondimento sulla ciclicità peritidale).

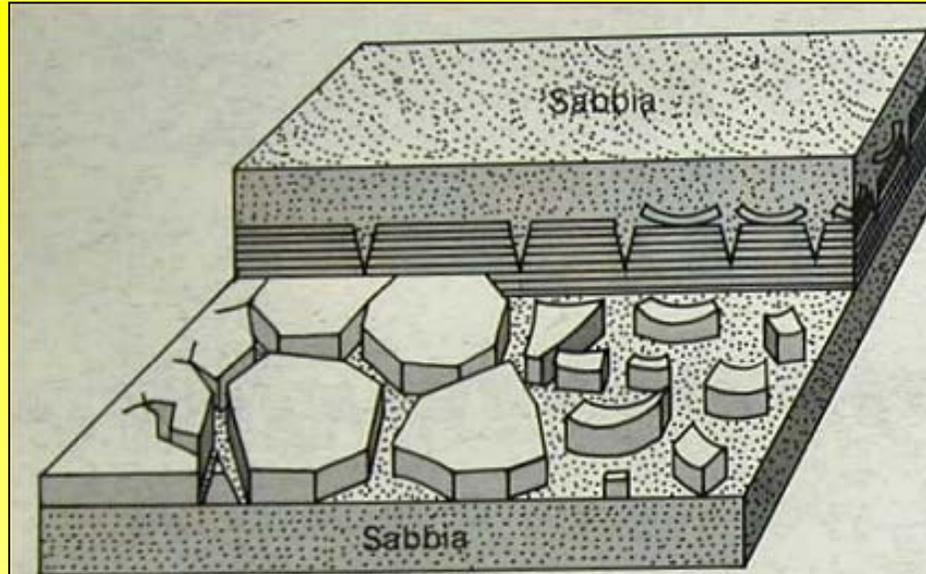


I subambienti carbonatici della piattaforma interna più o meno ristretta e aperta : caratteri delle loro caratteristiche associazioni di litofacies.

A) Associazioni di facies dei subambienti più esterni, di transizione all'offshore subtidale (lagune aperte, canali, barre e delta tidali \ebb legati alle maree, accumuli da tempesta (washover di esondazione da argine di canale, retrostanti spiagge e isole).

Caratteristiche delle piane inter-sopratidali di clima arido e umido:
loro strutture sedimentarie caratteristiche



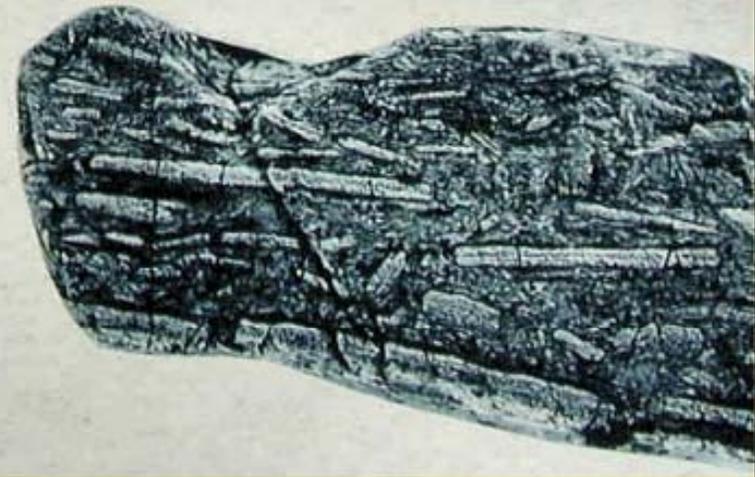


A



B

Sezione



I mud crack ed i ciottoli piatti sono strutture significative di ambienti sopratidali



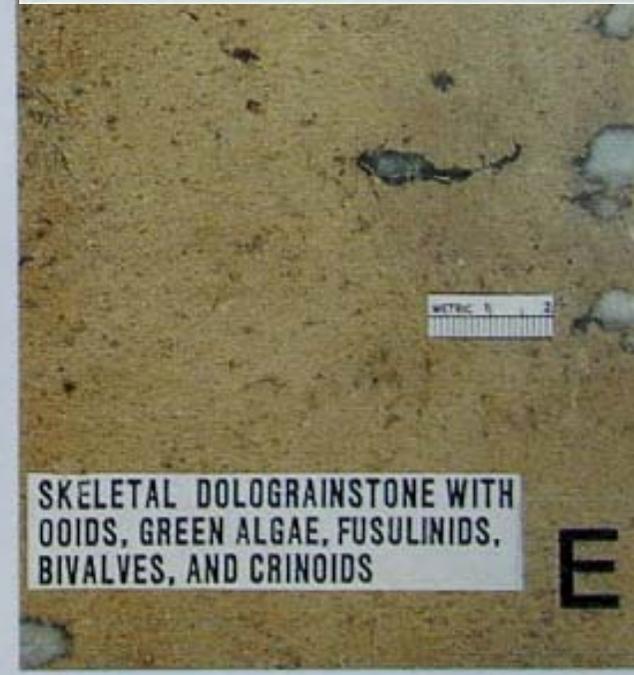
Figura 4.23. *Birdseyes* (A, grandezza naturale) e cavità planari (*sheet cracks*) (B, 5x, stampa negativa) che si sviluppano per essiccamento dei fini sedimenti sopratidali.

Caratteri diagnostici delle facies intertidali:

D) cavità varie di essiccamento (intertidale semiarido)

E) livello subtidale con carbonati bioturbati e fossili

Figure 48—Examples of tidal flat facies from the Permian Grayburg and Queen Formations of the North McElroy Field on the east side of the Central Basin Platform of the Permian Basin, west Texas. (A-D) Examples of various supratidal facies with diagnostic features, such as algal mats, gypsum crystals, nodular anhydrite, and bird's-eyes. (E) Representative subtidal facies. Cores courtesy Susan Longacre (Getty Exploration).



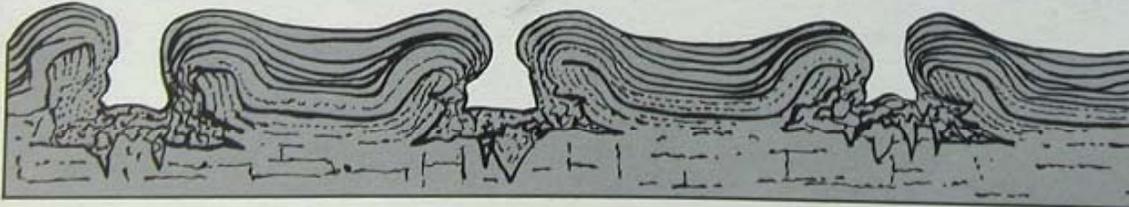
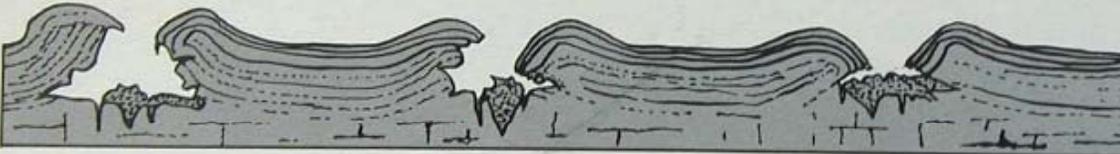
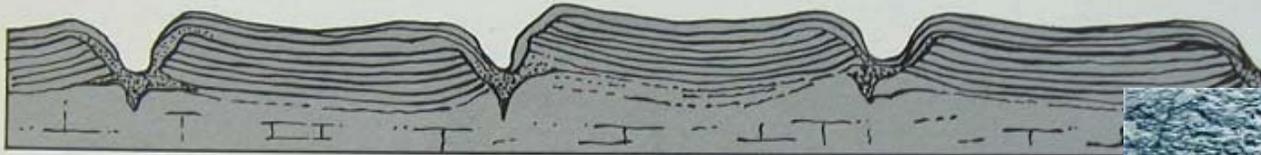


Figura 4.22. Cavolfiore stromatolitico che mostra, sui fianchi, la disposizione anti-gravitativa delle lamine testimoniante la loro origine algale (Cambro-Ordoviciano, Appalachi); la barra di riferimento è lunga dieci centimetri.



Figura 4.21. (A), poligoni da essiccamento nella piana sopratidale (Florida Bay); (B), crescita di piccoli cavolfiori stromatolitici su originari poligoni da essiccamento (Krane Key, Florida Bay); (C), schema evolutivo.

tici su originari poligoni da essiccamento (Krane Key, Florida Bay); (C), schema evolutivo.

Vari tipi di poligoni di disseccamento (mud cracks) e laminazioni stromatolitiche visti in sezione.

Facies sopratidali laminate interessate da mud cracks (in sezione verticale)(Halley,1975).



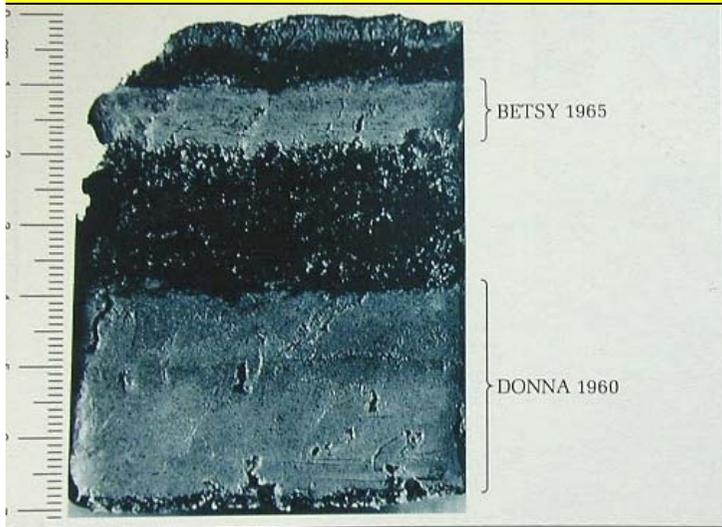
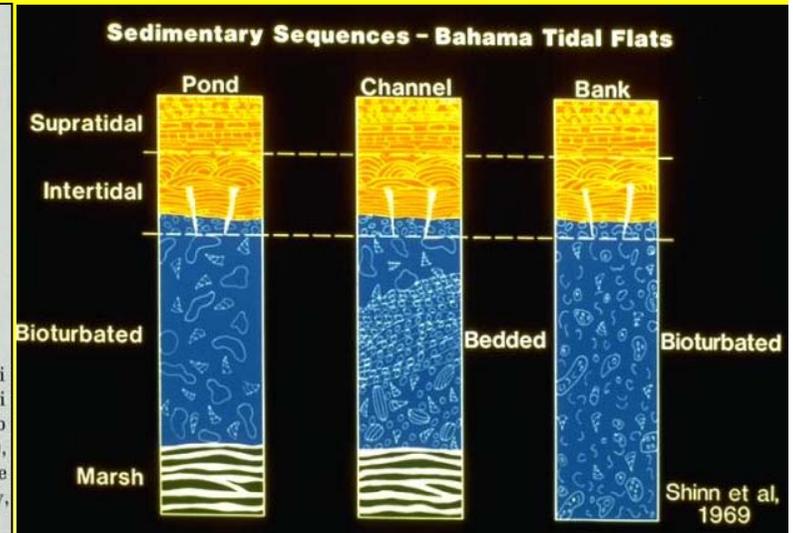


Figura 4.13. Alternanza di straterelli centimetrici di sedimento, accumulatosi durante uragani, e livelli algali. Lo strato inferiore è stato depositato, nel 1960, dall'Uragano Donna, quello superiore nel 1965 dell'Uragano Betsy (Crane Key, Florida Bay).



Esempi di sedimenti recenti delle piane tidali (tempestiti, laminazioni algali sopratidali, accumuli bioclastici di canale tidale)

← ANDROS CHANNEL LAG



**Tipi di cicli peritidali rispetto alle onde e all'influenza delle maree:
alta o bassa energia.**

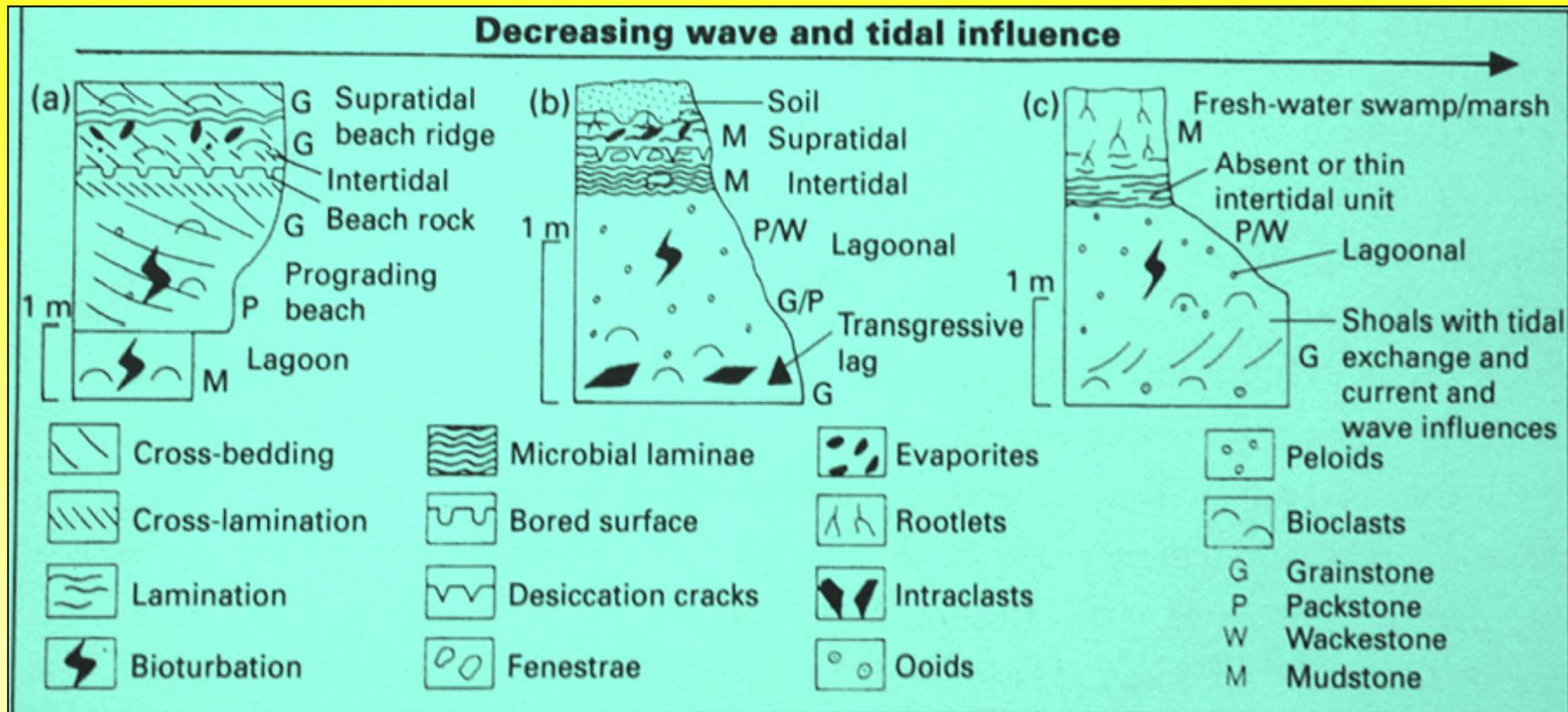


Figure 9.23 Spectrum of peritidal shoaling sequences reflecting differing degrees of wave and tidal influence. (a) High-energy type based on Khor Duwahine, extreme western part of Abu Dhabi (Fig. 9.15); although this area is protected from the Shamal winds it still lacks protection by a barrier system and is wave influenced. Microbial mats only occur on the upper part of the intertidal zone and are associated with evaporites (gypsum). These sandflats are prograding seawards with an accretion slope showing seawards-inclined bedding (Purser & Evans, 1973). (b) Protected, lower-energy sequence. The initial coarse transgressive lag horizon is followed by a shoaling phase showing well-defined intertidal facies. Based on Lower Carboniferous peritidal deposits from south Wales

(V.P. Wright, 1986); similar sequences are shown by James (1984). (c) Sequence from highly restricted setting; shoaling from a grainstone facies, with wave and tidal influences, into lagoonal and finally freshwater facies (supratidal-terrestrial). Intertidal deposits are thin or absent (based on data in Palmer, 1979 for the Middle Jurassic White Limestone Formation). This sequence is broadly comparable to the transition across the present-day Florida Shelf lagoon. Wave action and tidal exchange are greatly reduced over the shelf which results in nearshore areas being effectively tideless. In contrast to (a) and (b) this sequence has formed under a more humid climate and lacks evaporites. Diagram modified from V.P. Wright (1984).

- **La ciclicità di facies nella piattaforma interna: cicli peritidali**

Le variabili ambientali che condizionano lo sviluppo delle litofacies e delle strutture sedimentarie di un ciclo peritidale:

il clima, ambienti di alta bassa energia, gli organismi

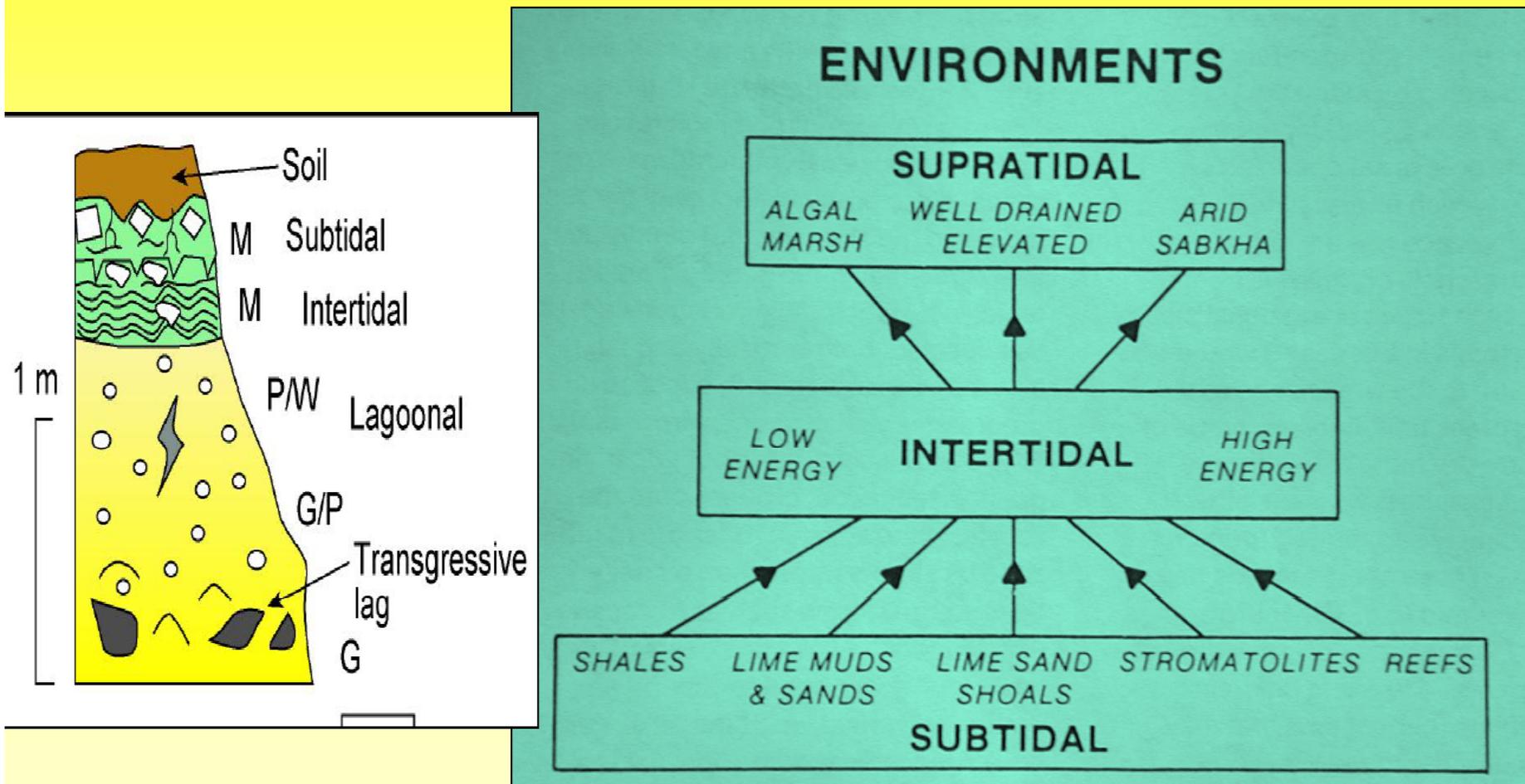
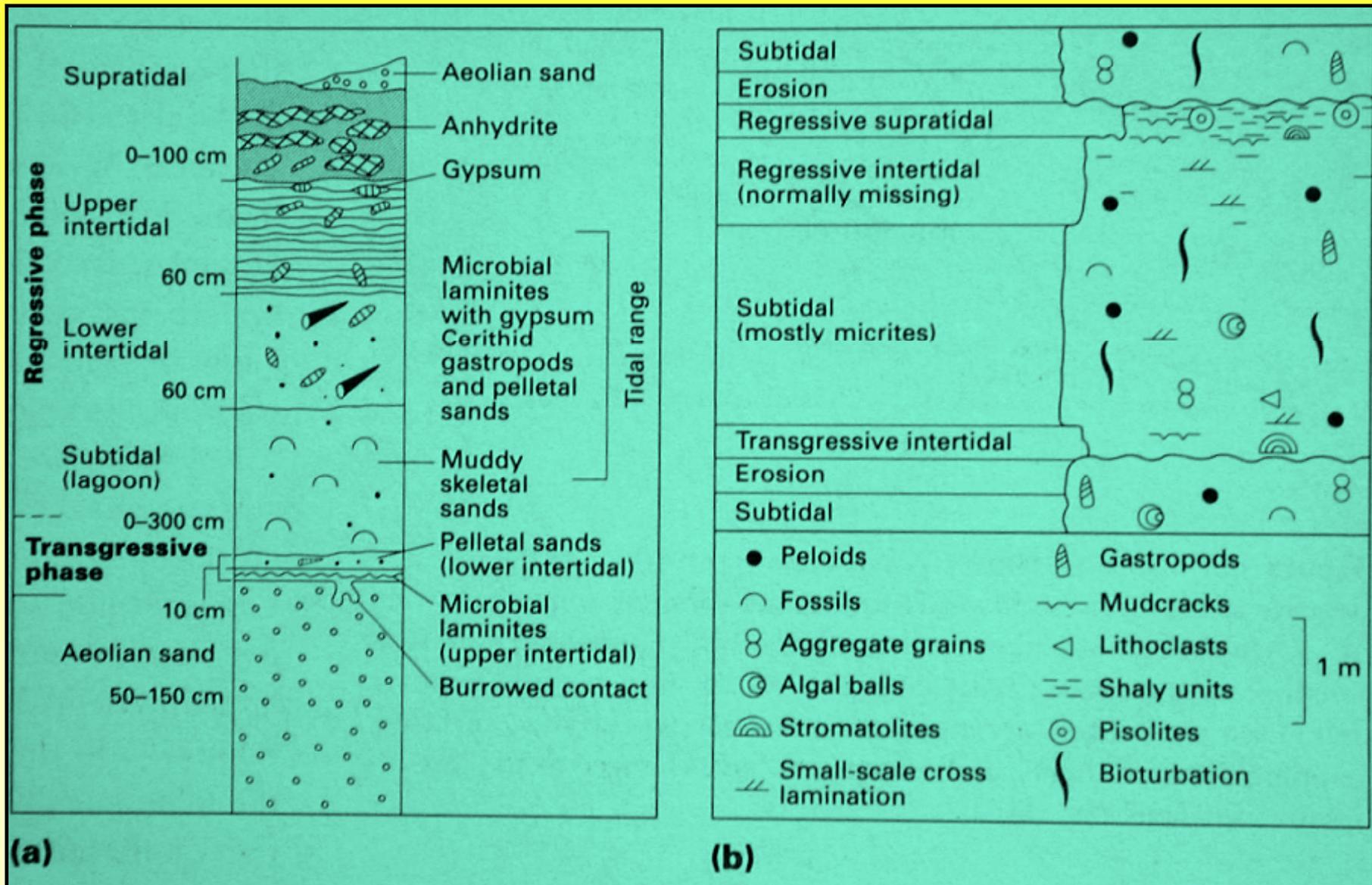


Figure 4
A flow diagram indicating the various poss-

ible environmental transitions present in a carbonate shallowing-upward sequence.

I cicli peritidali presentano diverse associazioni di facies.

Si noti la diversità tra un ciclo peritidale attuale di Abu Dabi (a) ed un classico ciclo peritidale antico (Calcare Massiccio, Liassico basale dell'Appennino sett.)



Sintesi delle principali
 caratteristiche dei
 depositi tidali attuali
 con la distribuzione
 delle loro strutture e
 tipo di grani

(Sholle 1988)

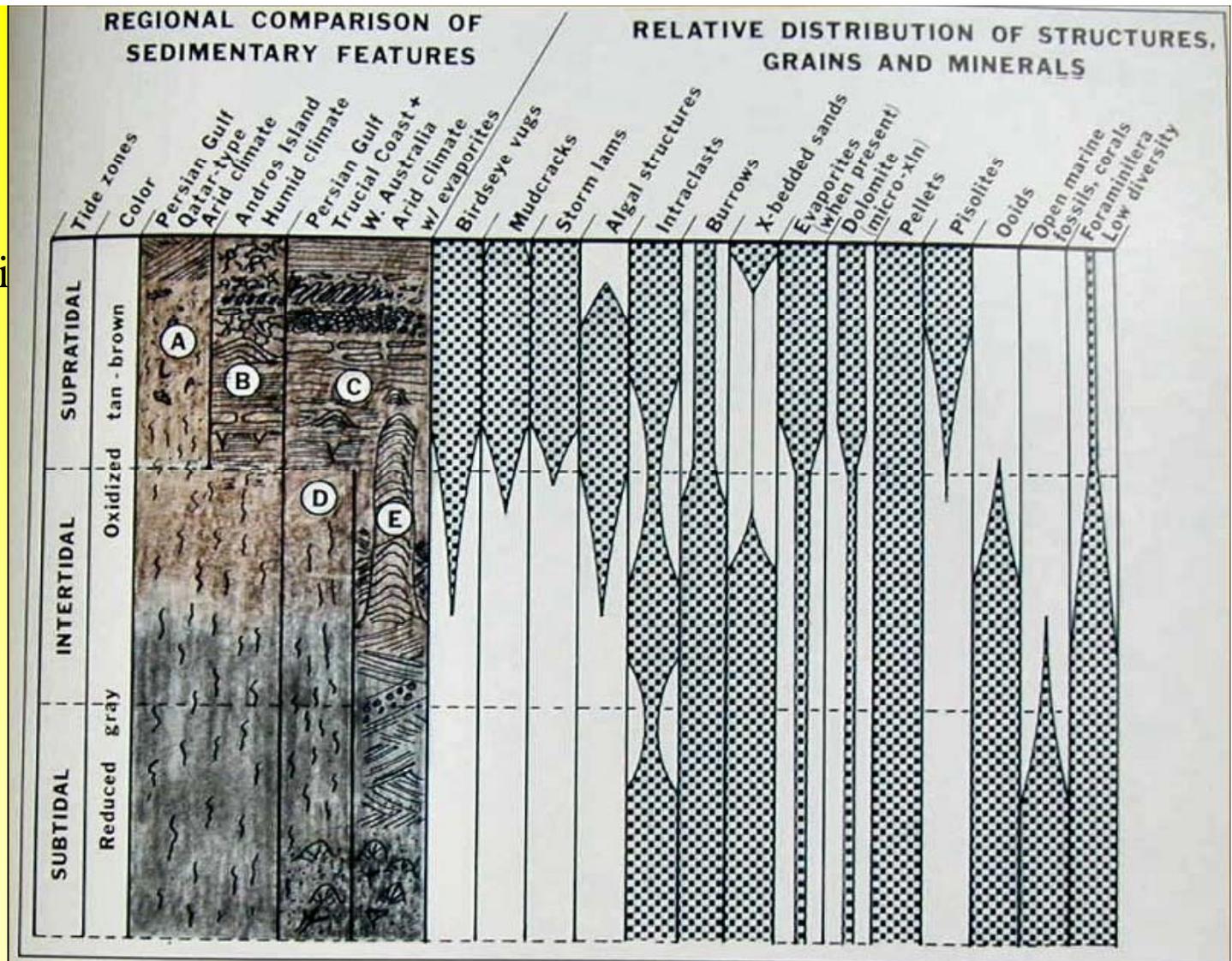


Figure 52—An attempt to compile all commonly accepted facets of facies variations associated with carbonate tidal flat accumulations. (A) shows the sequence on tidal flats around the Qatar Peninsula in the Persian Gulf. Note lack of a well developed algal mat or anhydrite zone due to slightly higher rainfall than on the Trucial Coast. (B) shows sedimentary structures, such as soil clasts, current-deposited intraclasts, minor algal heads and domes, mud

polygons and mudcracks, developed in humid climates, such as at Andros Island in the Bahamas. (C) shows the sedimentary features associated with arid tidal flats, such as on the Trucial Coast in the Persian Gulf or in the Shark Bay region, western Australia. Note that the major difference in the last case is the presence of nodular or chicken wire anhydrite. The intertidal zones can range from oxidized muds to (D) coral reefs to (E) rippled crossbedded sands contain-

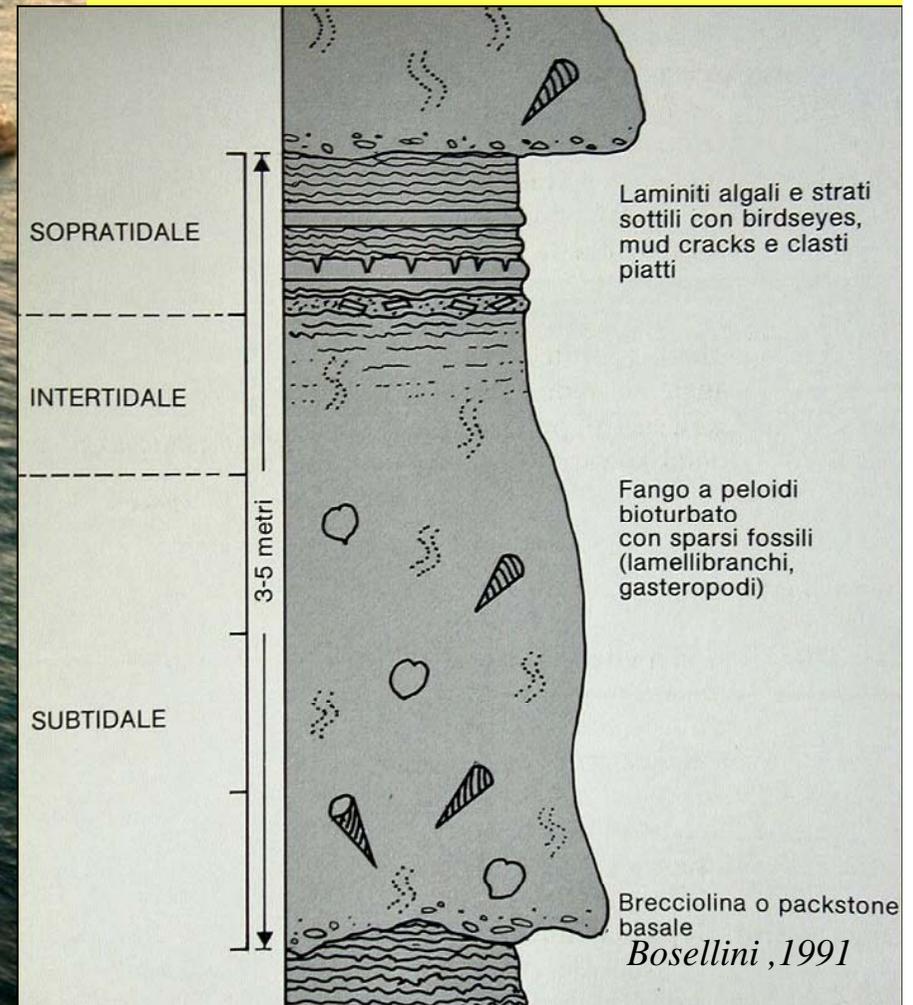
ing large club-shaped algal structures, such as those shown earlier in Figures 15A and B. The righthand section is an attempt to show relative abundance of various sedimentary structures, grains, minerals and fossils, based on the literature and personal observations of modern and ancient sequences. It should be emphasized that no geologic example is likely to fit exactly all the features shown here.

• Le successioni peritidali fossili sono sempre stratificate in strati e banchi da decimetrici sino a metrici.

Uno strato può rappresentare un ciclo peritidale oppure contenere più cicli amalgamati.

- **I cicli peritidali antichi sono in genere shallowing upward** (facies meno profonde verso l'alto) e sovente presentano emersioni-discontinuità erosive al tetto.

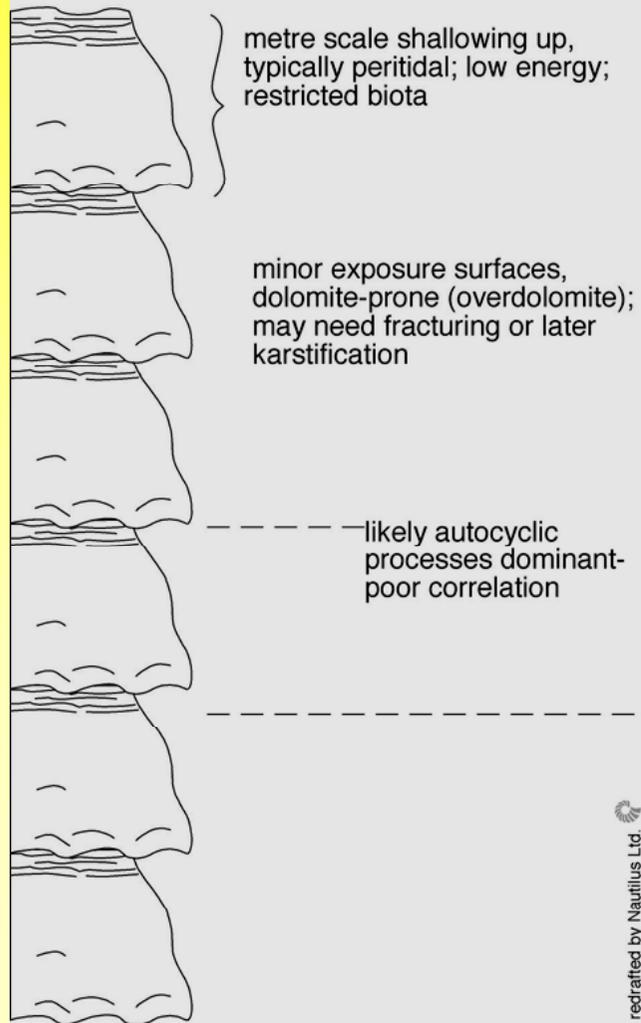
• In figura la Dolomia Principale ciclotemica di Amalfi.



GREENHOUSE

Keep-up style - high-frequency but low amplitude sea level changes

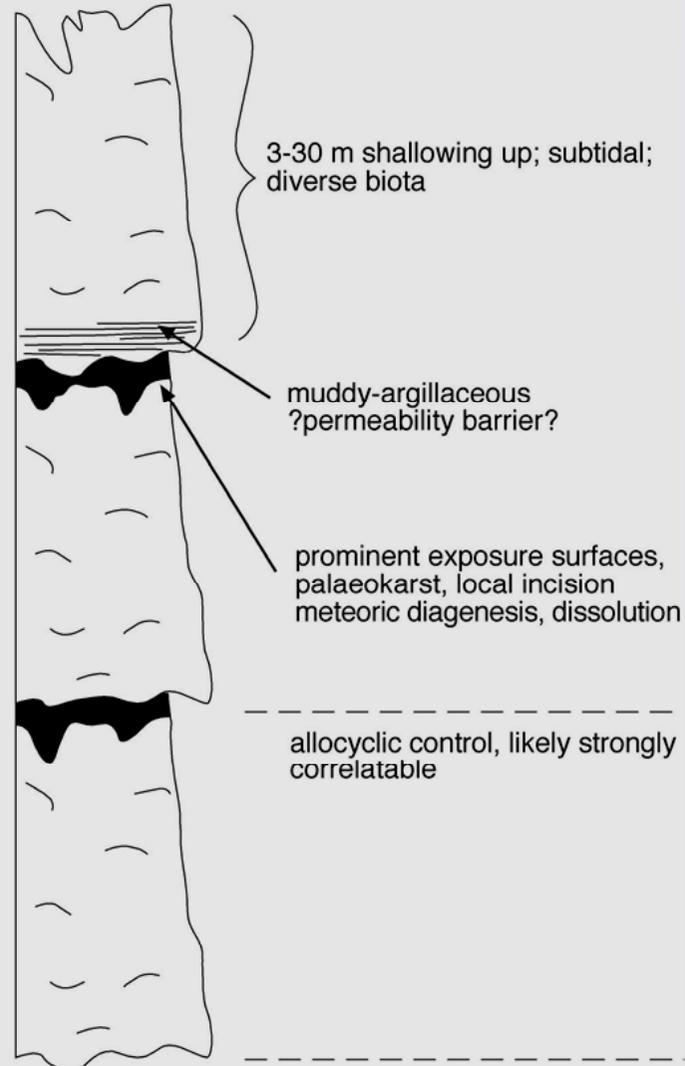
sea level rises & subsidence = sedimentation
sea level falls = subsidence
Applies to most of Phanerozoic



ICE-HOUSE Glacio-eustasy

Catch-up style - high-frequency (105 Kyr) & high amplitude sea level (10's ->100 m) sea level changes

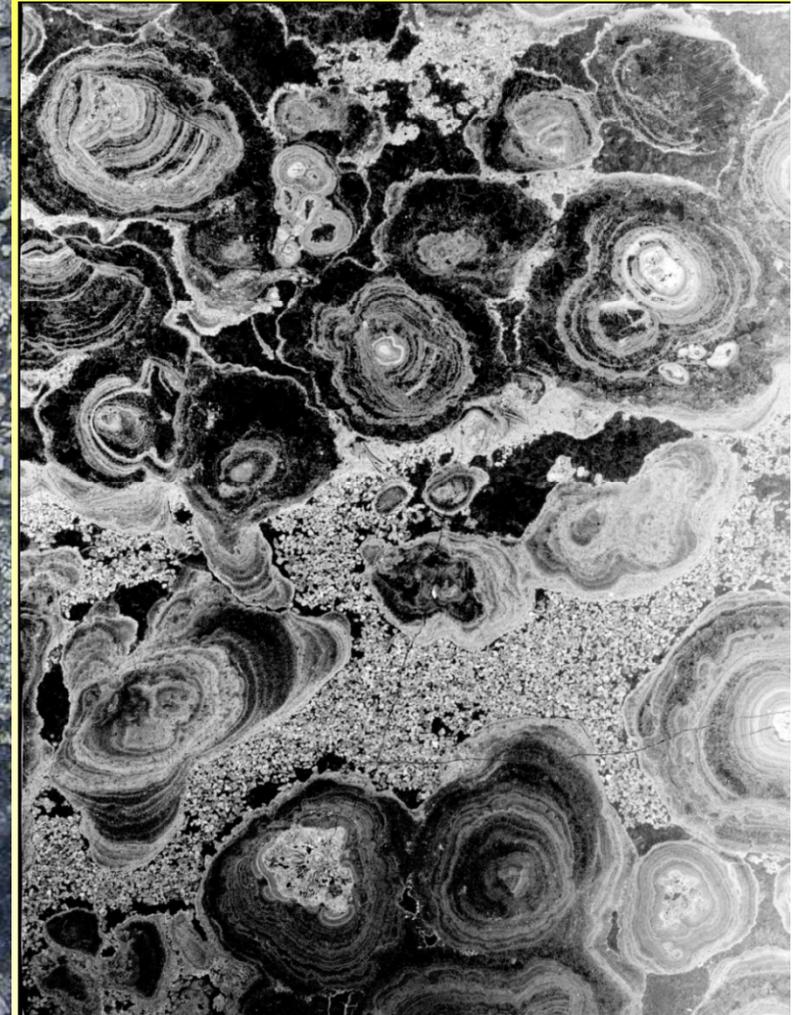
Late Visean - early Permian







- Altra evidenza di facies carbonatiche che hanno subito una diagenesi in ambiente continentale e vadoso:
- le pisoliti vadose
- i clasti precocemente dolomitizzati (inter-sopratidali).



- Cicli peritidali con prevalenti facies inter-sopratidali con livelli con deformazioni diagenetiche precoci dovute a esposizioni subaeree
- (tepee,
- Assereto e Kendall 1971,1977)





Esempi di litofacies di shallow subtidale con oncoliti sino a centimetriche alla base dei cicli peritidali della Corna di Botticino, (Sinemuriano inf.)



- Cicli di carbonati peritidali con facies evaporitiche al tetto.

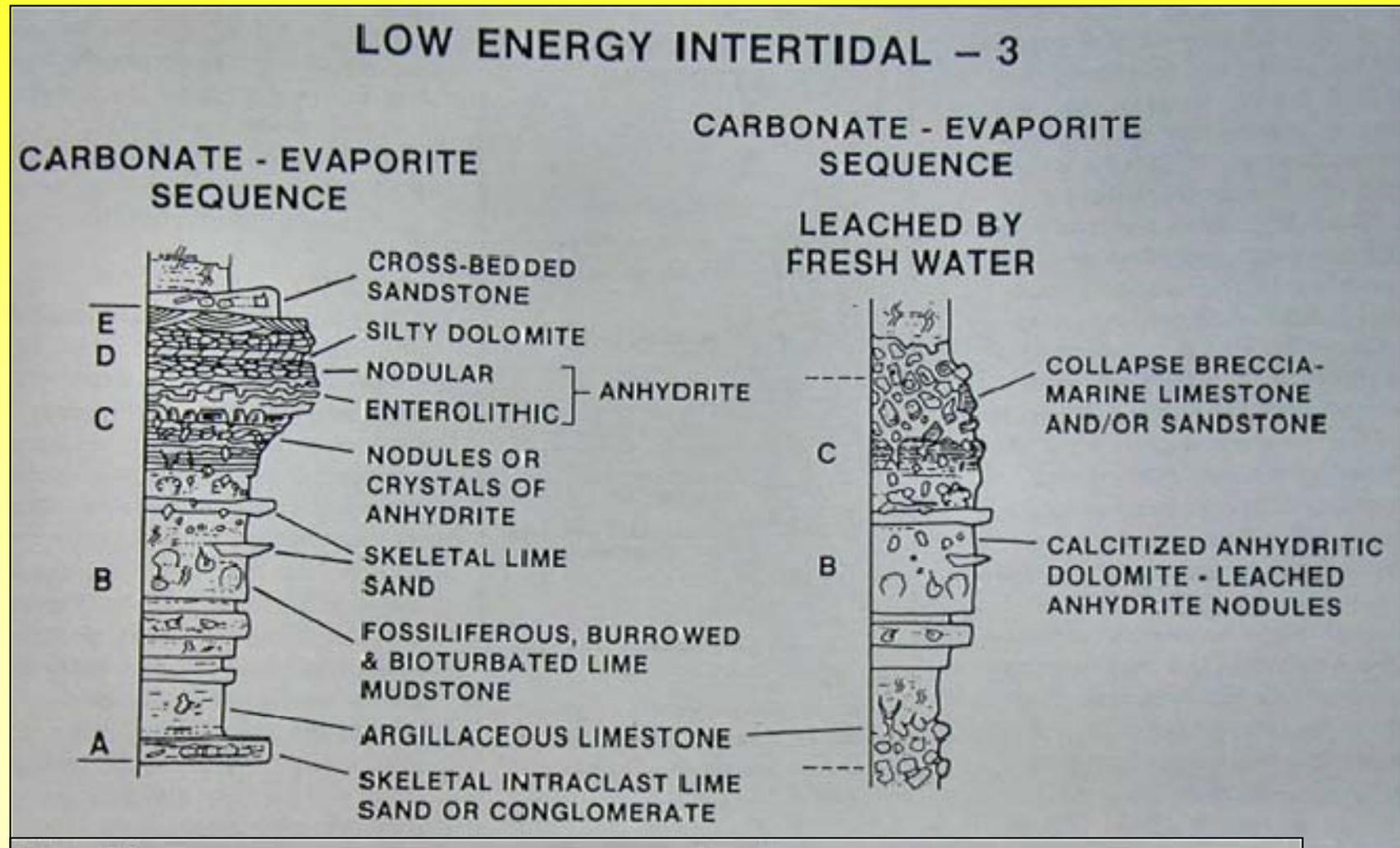


Figure 15
Two hypothetical sequences with a low-energy intertidal unit and a supratidal unit

developed under arid conditions; on the right the evaporites have been dissolved by percolating fresh waters.



L'organizzazione verticale dei sedimenti di una sabkha:

-in alto a destra intercalazioni di gessi (strati noduli bianchi) con strutture deformative precoci (enterolitiche) per processi diagenetici in corrispondenza di una falda freatica marina fluttuante).

Ipotesi genetiche dei ciclotemi peritidali:

1) Modelli autociclici. In situazioni di piattaforma interna due processi possono essere responsabili di cicli (ciclotemi) “shallowing upwards”: a) migrazione di canali, b) progradazione della linea di riva.

a) Migrazione di canali (modello attualistico).

- Le piane tidali dell'Isola di Andros (Bahamas) sono incise da canali che migrano lateralmente, profondi 3 m o meno e larghi fino a 100 m.
- Essi diventano sempre meno profondi e sempre più stretti procedendo verso terra e terminano nella zona intertidale superiore.
- Il fondo dei canali è costituito da fanghi a gasteropodi e da depositi residuali formati da intraclasti.
- I depositi di riempimento del canale possono mostrare una stratificazione obliqua che rappresenta fasi successive di accrescimento laterale delle “point bar”.
- Dato che il canale è un prolungamento della zona subtidale nella piana tidale, i suoi sedimenti non presentano, per la maggior parte, caratteri connessi all'esposizione subaerea.
- La parte superiore del riempimento comprende tuttavia depositi fini (con laminazioni microbiche e/o laminazioni connesse a eventi di tempesta), che subiscono continue esposizioni e sono quindi caratterizzati da “fenestrae” di vario tipo.
- A seguito della migrazione laterale del canale si sviluppa così un'unità tabulare che mostra una tipica tendenza “shallowing upwards”.
- Nonostante questo processo sia comune nelle attuali piane tidali, pochi esempi di questo tipo sono stati identificati nelle successioni carbonatiche antiche.

b) Progradazione della piana tidale sul subtidale con crisi periodiche nella produttività carbonatica (autociclo di Ginsburg).

La maggior parte dei cicli a piccola scala della piattaforma interna sembra rappresentare la **conseguenza del riempimento rapido di aree subtidali poco profonde connesso alla progradazione delle zone intertidali e sopratidali**: progradazioni di 5 km in 4000 anni sono state riconosciute nelle piane tidali del Golfo Arabico, di 5-20 km in 1000 anni nelle piane tidali dell'Isola di Andros. Il sedimento, in quest'ultimo caso, proviene dalle adiacenti aree subtidali.

I cicli sono in genere nettamente asimmetrici, perché dopo che un'area intertidale o sopratidale è stata invasa dal mare (ad esempio a causa della subsidenza non più controbilanciata dalla produzione e dall'apporto di carbonati) **è necessario un lungo intervallo di tempo, probabilmente parecchie migliaia di anni ("lag time") affinché si stabiliscano condizioni di profondità adatte ad ospitare gli organismi produttori i sedimento carbonatico.**

Durante questo tempo non viene deposto sedimento o ne viene deposto pochissimo, mentre i depositi preesistenti possono essere intensamente rimaneggiati.

Quando la produzione di carbonati inizia, sono ormai stabilite condizioni subtidali. La maggior parte dei cicli incomincia quindi con sedimenti subtidali, che passano progressivamente verso l'alto a sedimenti di acque sempre più basse.

La creazione di spazio per le unità "shallowing upwards" che si succedono l'una sull'altra può essere spiegata come il risultato di variazioni nell'apporto di carbonati combinato con una subsidenza lineare, regolare e continua.

Questa **spiegazione non è tuttavia accettabile quando alla sommità dei cicli sono presenti depositi con chiare evidenze di accentuate esposizioni subaeree e di processi di diagenesi vadosa.** Nel caso di meccanismi autociclici, infatti, si dovrebbe realizzare solo lo sviluppo di più o meno estese aree intertidali superiori-sopratidali, mentre **la formazione di paleosuoli, ecc., richiede anche una abbassamento relativo del livello marino.**

ACCRETION OF SHALLOWING-UPWARD SEQUENCES

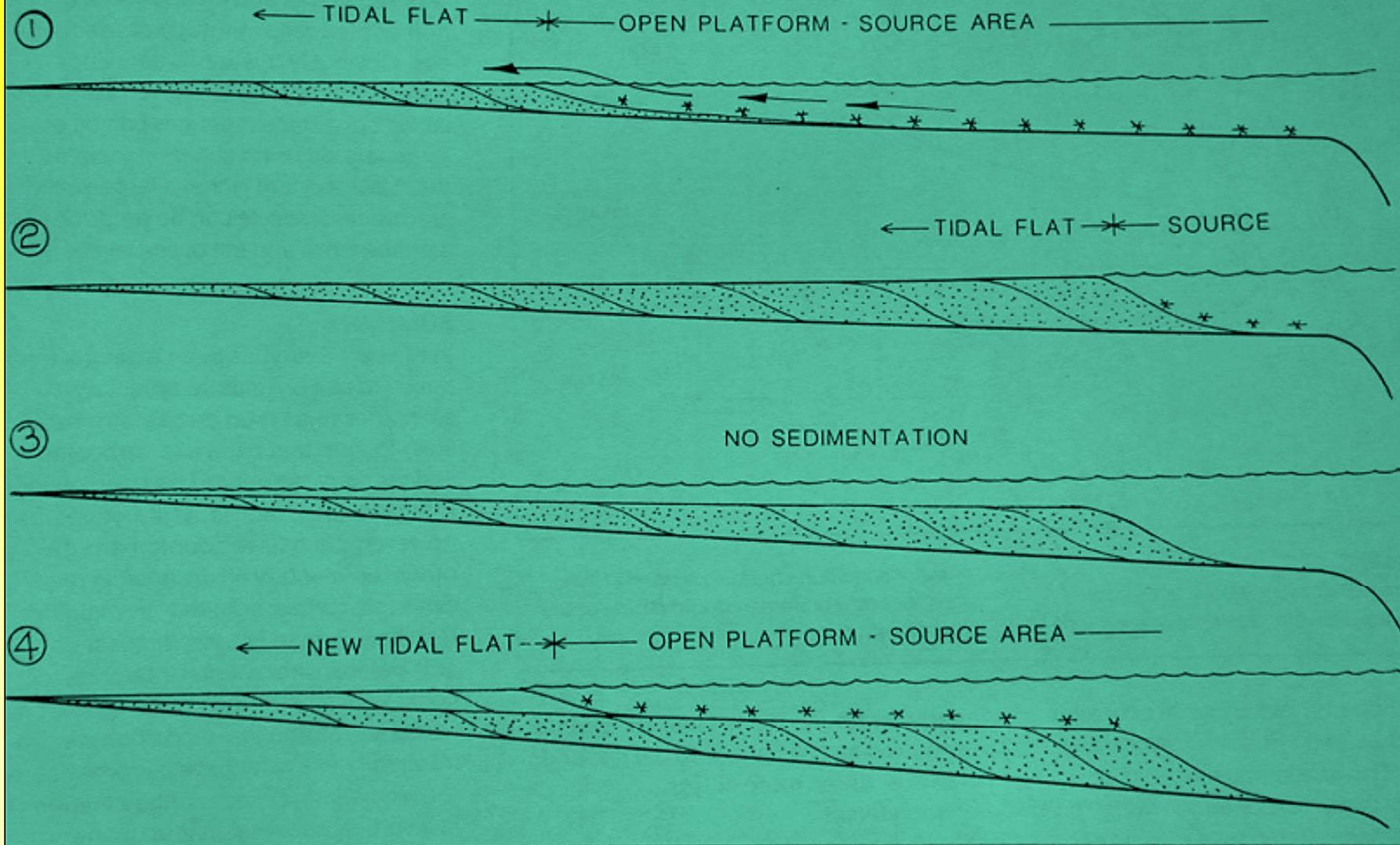


Figure 18

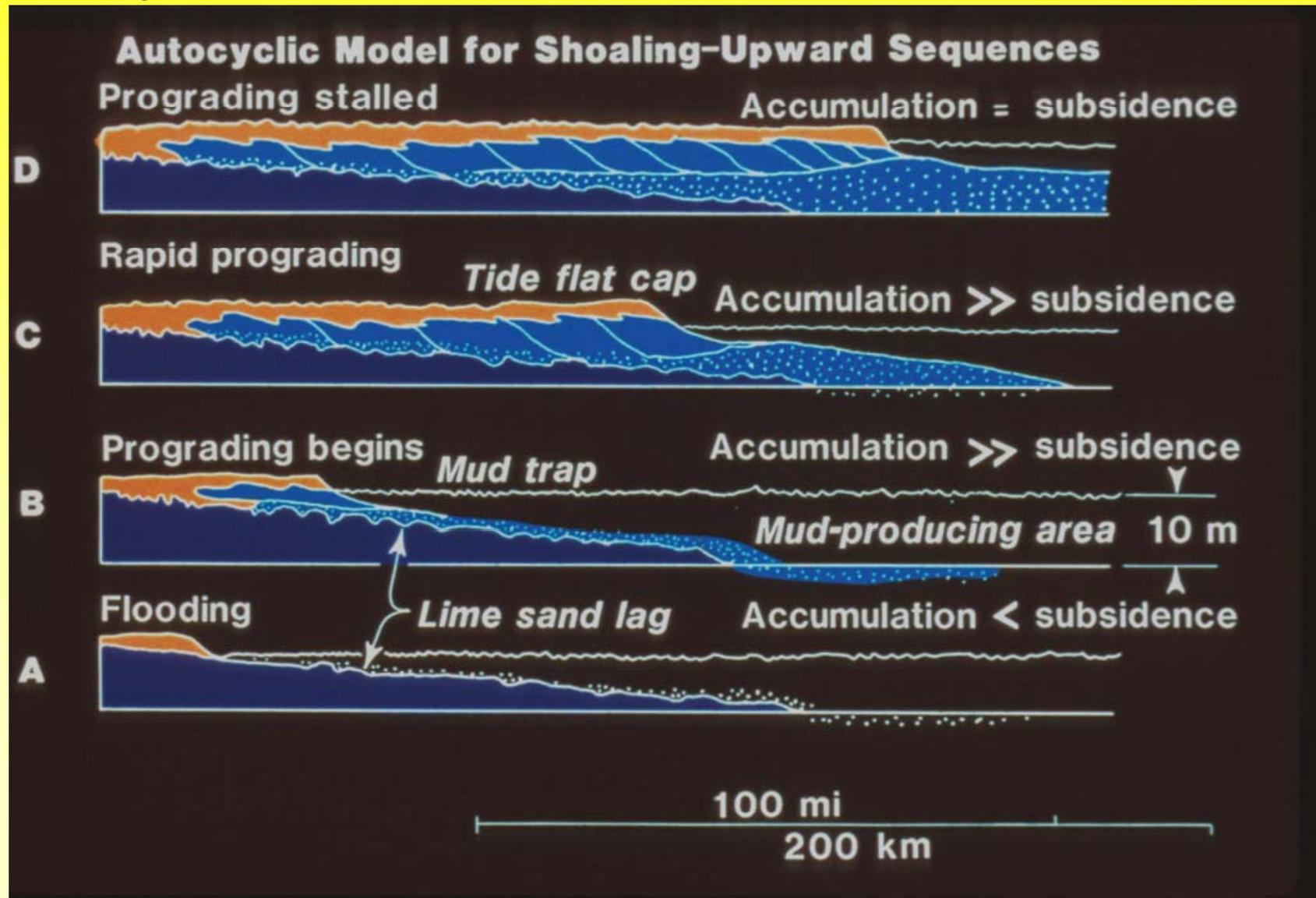
A sketch illustrating how two shallowing-

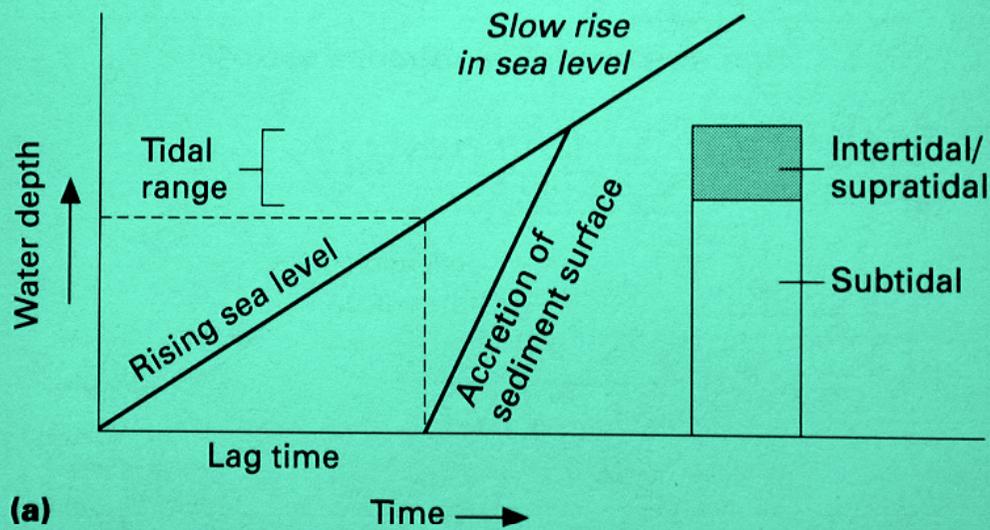
upward sequences can be produced by progradation of a tidal flat wedge. These

general conditions apply in the case of both eustatic and autocyclic models.

Il modello genetico degli autocicli “shallowing upward” di Ginsburg (1975).

Il modello genetico degli autocicli “shallowing upward” dell’isola di Andros
(Ginsburg 1975).



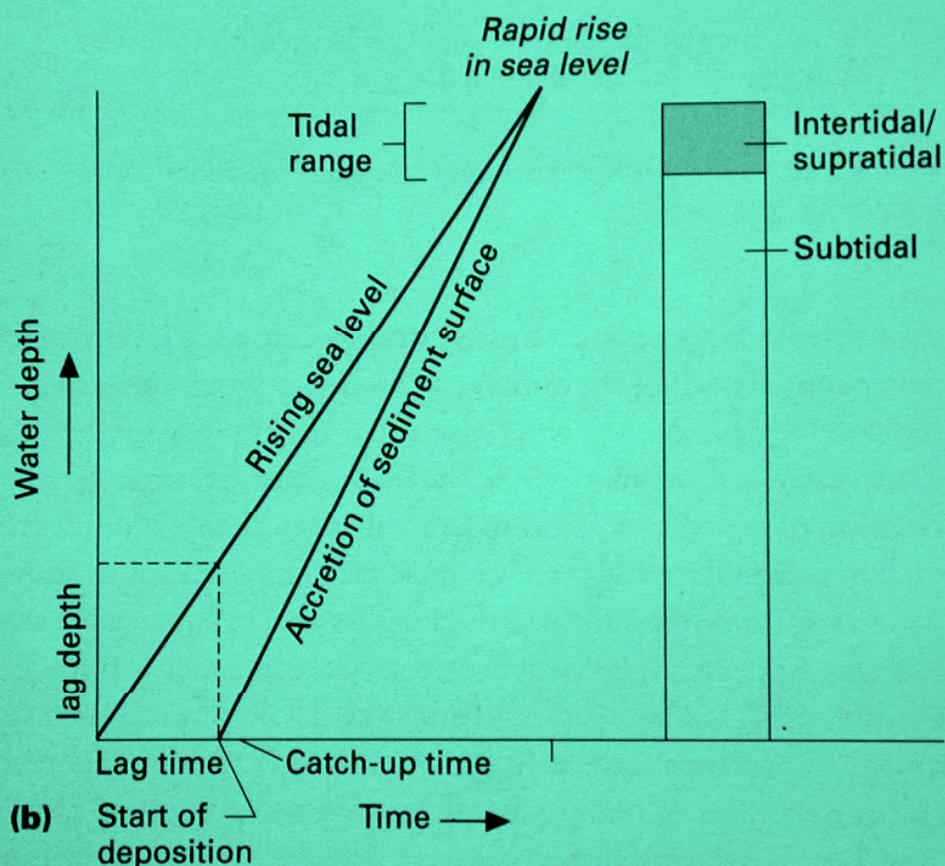


(a)

Time →

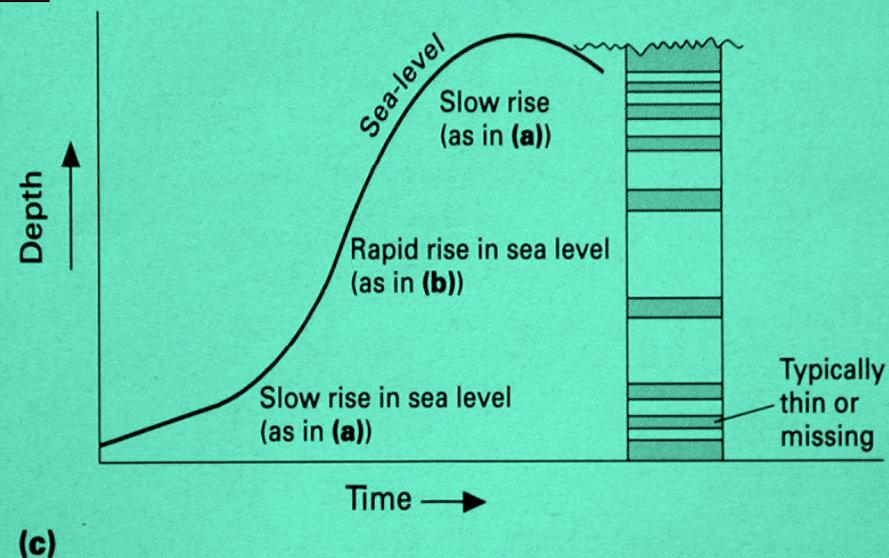
Significato dell'organizzazione interna e spessore die cicli peritidali:

in funzione delle variazioni relative del livello del mare (lente o rapide) i rapporti tra subtidale ed intertidale cambiano.



(b)

Time →

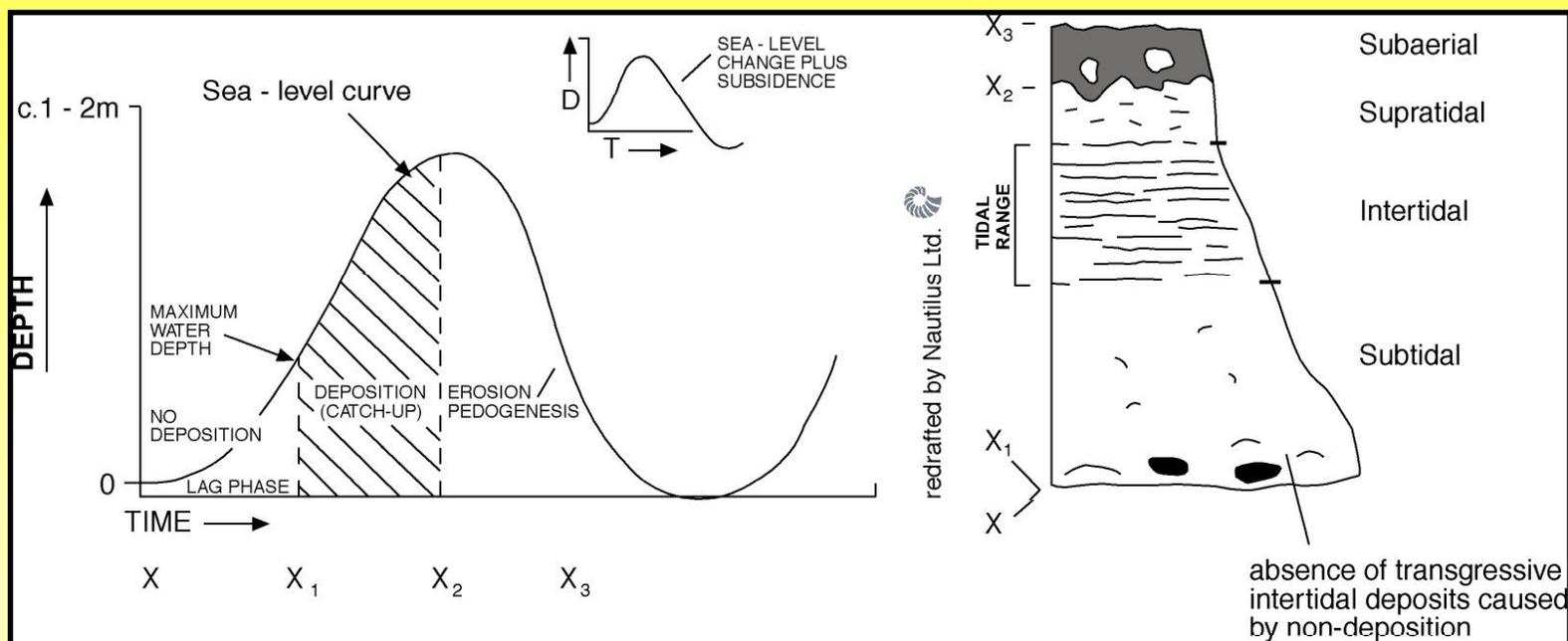


(c)

Figure 9.27 Contrast between cyclothem types (a) when the rate of relative sea-level rise is lower (with thinner subtidal units) and (b) when the rate is higher (with thicker subtidal units). (c) Pattern of small-scale autocyclic peritidal cyclothem during a rise and minor fall in sea level. There are no significant subaerial exposure surfaces capping the cyclothem; and thicknesses have changed as the rate of relative sea-level rise varied.

Modello dei allocicli

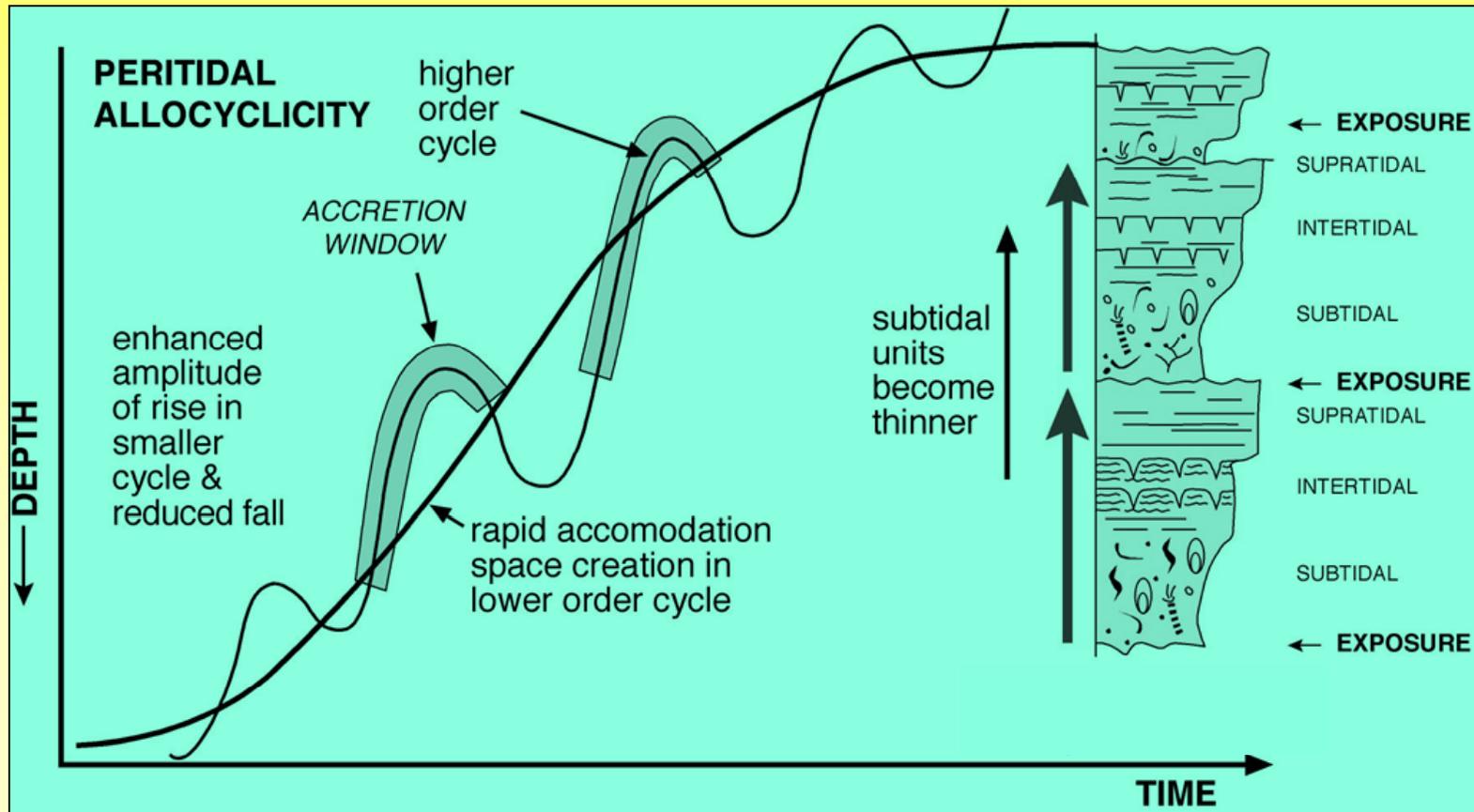
cicli eustatici di alta frequenza (4th, 5th ordine)



Quali sono le cause dei cicli di alta frequenza? E' possibile che la ciclicità climatica milankoviana (400, 100, 20 ka)

Cycle stacking patterns: Hierarchical controls

Sea-level changes (3rd order) will also be reflected in the stacking patterns of the cyclothems (4th, 5th order), especially on flat-topped platforms, due to systematic variations in accommodation space



Latemar (platform interior cyclic strata, Anisian-Ladinian, Middle Triassic, Dolomites): Milankovitch driven cyclicality ?

