

3. LE MICROBIALITI CARBONATICHE

Le microbialiti sono depositi organo-sedimentari la cui formazione è dovuta alle azioni vitali di comunità microbiche bentoniche, particolarmente cianobatteri ed alghe, che catturano sedimento e/o inducono la precipitazione di minerali carbonatici (Flugel, 1982; Burner & Moore, 1987; Riding, 2000). Da tempo è nota l'importanza di questi processi bio-sedimentari nella produzione di carbonato attraverso tutto il record geologico (Monty, 1981; Riding, 1991; Konhauser, 2006).

Le microbialiti in parte coincidono con le automicriti" (Wolf, 1965) termine con il quale si designano, in generale, strutture di carbonato di calcio a grana fine, formati in posto (Monty *et al.*, 1995; Pratt, 1995; Reitner & Neuweiler, 1995; Webb, 1996; Neuweiler *et al.*, 1999). In accordo con Reitner e Neuweiler (1995) e Neuweiler *et al.* (1999), alcune fasi di precipitazione dell'automicrite avvengono, tra l'altro, all'interno di substrati organici in degradazione originando un'altra categoria di automicrite: l'organomicrite.

I termini automicrite ed organomicrite, molto usati nella scuola francese, sono ormai in disuso e soppiantati dal termine microbialite con il quale si intendono tutti i depositi autigeni che derivano dai numerosi processi fisico-chimici connessi con le attività metaboliche di microrganismi (fotosintesi, chemiosintesi, intrappolamento ecc.) capaci di originare un prodotto primario di mineralizzazione.

Le microbialiti possono formare depositi con dimensioni da centimetriche a plurimetriche, con forma a cupola, colonnare o stratiforme. Gli ambienti di formazione delle microbialiti sono essenzialmente marini, da quelli peritidali fino ad oltre la zona fotica. Sono presenti anche in ambienti fluviali, lacustri e nelle grotte. I microbi sono coinvolti anche nella formazione di alcuni suoli calcretici e dei travertini (Chafetz e Folk, 1984; Loisy *et al.*, 1999).

3.1. GLI ORGANISMI COINVOLTI

I microbi, più semplicemente definiti come organismi microscopici, includono generalmente la sfera dei batteri (inclusi i cianobatteri), funghi, alghe microscopiche, e protozoi. I microbi sono diffusi ed abbondanti in molti ambienti della Terra. Essi possono vivere su tutte le superfici sedimentarie, a tutte le profondità sia nei laghi sia nei mari, ed anche in sedimenti molto profondi. I microbi interagiscono largamente con altri organismi, in

competitività o cooperatività, giocando un ruolo chiave nei cicli chimici che influenzano la composizione dell'atmosfera e dell'idrosfera. Sono ampiamente coinvolti anche nella produzione, accumulo e diagenesi di minerali e sedimenti (Konhauser, 2006). Gli effetti della loro mediazione sulla precipitazione e localizzazione dei sedimenti carbonatici è notevole in diversi ambienti deposizionali, soprattutto marini, quali reefs e tidal flats.

Molti studi sulle microbialiti carbonatiche si sono focalizzati principalmente sui batteri, in generale, e sui cianobatteri, in particolare, enfatizzando il loro ruolo nella precipitazione e formazione in situ di minerali che concorrono alla costruzione di tali depositi. Al contrario, alle alghe microscopiche ed ai protozoi, è più tradizionalmente riconosciuto, nello studio dei carbonati, solo una funzione di intrappolamento ed immobilizzazione del sedimento alloctono.

- **Batteri**

I batteri, ovvero gli organismi procarioti unicellulari appartenenti al Regno Monera (Whittaker, 1959), hanno un ruolo chiave nella formazione dei carbonati microbialitici attuali e fossili (Monty, 1981; Riding, 1991; Dupraz & Visscher, 2005). Tra i numerosi gruppi di Monera, i cianobatteri (chiamati tradizionalmente alghe azzurre o cianofite) sono i più importanti dal punto di vista sedimentologico. Questi sono essenzialmente aerobici e fototrofici e prosperano negli ambienti ossigenati di acqua poco profonda. Molti altri gruppi di batteri, anche eterotrofi anaerobici, sono importanti nella formazione delle microbialiti, come ad esempio i solfobatteri.

I batteri decompongono il materiale organico in componenti inorganici tramite processi redox, usando i ricettori degli elettroni per produrre energia. Ciò provoca l'impoverimento progressivo in O_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} e CO_2 nell'ambiente. I processi catabolici in questione, ovvero la denitrificazione, la riduzione del solfato e la metanogenesi, si verificano in successione nei sedimenti con l'aumento della profondità. La riduzione del solfato è particolarmente importante negli ambienti marini, a causa dell'alta concentrazione di SO_4^{2-} nell'acqua di mare. L'attività batterica rallenta nei sedimenti e diminuisce drasticamente a profondità superiori a 10-20 centimetri, poiché il rifornimento di materiale organico è ridotto (Fenchel & Finlay, 1995).

- **Alghe**

Nelle comunità microbiche attuali, capaci di produrre carbonati microbialitici, sono presenti alghe microscopiche che intrappolano e stabilizzano granuli di sedimento. Si tratta principalmente di alghe verdi e rosse con forme filamentose molto piccole (Scoffin, 1970; Arp *et al.*, 2003). Negli stessi habitat sono presenti anche le diatomee, le quali secernono

mucillagini capaci di stabilizzare sedimento. Il ruolo svolto dalle alghe nella formazione delle microbialiti è noto anche nelle forme fossili (Riding, 1991).

- ***Sostanze Polimeriche Extracellulari***

Le sostanze polimeriche extracellulari (extracellular polymeric substance EPS), ampiamente prodotte dai microbi (Decho, 1990), sono di importanza centrale nella formazione dei carbonati microbialitici. Le EPS, che si accumulano sulle pareti delle cellule, formano una matrice protettiva ed adesiva che fissa i microbi al substrato e provvede alla loro protezione fisico-chimica, facilitando anche l'assorbimento dei nutrienti (Christensen & Characklis, 1990). I batteri, i cianobatteri e le diatomee possono tutti secernere abbondanti quantità di EPS che si presentano in varie forme: da involucri protettivi, a masse globose e filamenti.

Microbial mats e biofilms sono strutture biotiche (essenzialmente comunità microbiche) complesse aventi spessori millimetrici i primi e sub-millimetrici i secondi, che rappresentano i principali contesti biologico-sedimentari dove si realizzano i processi di formazione delle microbialiti. I microbial mats intrappolano sedimento micritico e, dove sono spessi, possono anche intrappolare sabbia. Nella stratificazione dei tappeti microbici si riflettono le oscillazioni giornaliere della luce e dell'ossigeno. Tipicamente, i batteri fototrofi aerobici (cianobatteri) sono vicino alla superficie, i fototrofi anossigenici subito sotto, seguiti dai chemio-organotrofici che non richiedono né ossigeno né luce. Le attività di questi microbi determinano la calcificazione e la conservazione dei mats (Canfield & Raiswell, 1991; Visscher & Stolz, 2005).

3.2. I PROCESSI DI FORMAZIONE

Esiste un'intima relazione fra i minerali ed i microbi, rendendo questi ultimi di importanza globale nel ciclo biogeochimico degli elementi. Molti batteri ottengono le sostanze nutrienti e l'energia degradando alcuni minerali (silicati, carbonati etc.); altri sono, invece, responsabili della *nascita* di alcuni minerali. Nel caso delle microbialiti carbonatiche, due sono i processi principali che generano questi depositi: intrappolamento di grani e precipitazione diretta.

- ***Intrappolamento dei grani***

La forma, la mobilità, l'orientamento ed i rapporti reciproci dei microbi determinano la loro capacità di intrappolare e stabilizzare il sedimento. Questo sedimento può essere sia fine che grossolano, silicoclastico o carbonatico. Il processo di intrappolamento può consistere nel semplice bloccaggio fisico dei grani in movimento attraverso “reti” di filamenti o anche nell'adesione sopra e dentro le EPS. Entrambi i processi sono facilitati quando i mats hanno una superficie topografia irregolare, come quelli costituiti da microbi relativamente grandi con molti filamenti eretti ed, inoltre, quando i mats hanno abbondanti EPS morbide che possono intrappolare sedimento anche più grossolano.

- ***Precipitazione***

Da studi condotti in ambienti intertidali moderni, risulta che la litificazione primaria è fondamentale per la formazione dei carbonati microbici molto più dei processi di intrappolamento (Ginsburg, 1991; Arp *et al.*, 2003). La “conservazione” del sedimento intrappolato richiede, infatti, una litificazione precoce per rinforzare il deposito. L'importanza della precipitazione per i carbonati microbici va, in ogni modo, ben oltre la cementazione del materiale bloccato. Dendroliti e stromatoliti scheletriche (cfr par. 3.5), per esempio, sono fondamentalmente depositi di precipitazione, dominati da microbi calcificati.

La calcificazione ad opera di cianobatteri appare il risultato della creazione di gradienti positivi di alcalinità nei foderi mucillaginosi, associata con l'assorbimento fotosintetico di CO_2 e/o HCO_3^- (Merz, 1992; Merz-Preiß & Riding, 1999). Il prodotto finale dei vari processi biologici sarà una struttura organo-mineralizzata con forma già definita.

Una vasta gamma di processi batterici, oltre alla fotosintesi, possono indurre la concentrazione di HCO_3^- ed un aumento dell'alcalinità, favorendo la precipitazione di CaCO_3 (von Knorre & Krumbein, 2000). Questi includono l'ammonificazione, la denitrificazione, la riduzione del solfato e l'ossidazione anaerobica del solfuro (Visscher *et al.*, 1992; Castanier *et al.*, 2000). Questi processi sono localizzati all'interno dei mats, ad opera di batteri eterotrofici

che degradano la materia organica e portano alla precipitazione di carbonato (Chafetz & Buczynski, 1992; Défarge *et al.*, 1994).

Infine, anche le EPS prodotte microbiologicamente possono favorire la precipitazione di carbonato, generando gradienti di alcalinità in risposta a processi metabolici (Pentecost, 1985). Inoltre, le EPS rappresentano la componente più abbondante di materia organica disponibile per le attività metaboliche dei microbi. Infatti, recenti studi hanno mostrato che le EPS sono molto più coinvolte, rispetto ai microbi stessi, nei processi di calcificazione (Dupraz *et al.*, 2004; Trichet *et al.*, 2001).

Oltre alla precipitazione indotta dal metabolismo batterico, è stata riconosciuta anche la precipitazione di carbonato a grana fine, in associazione con macromolecole organiche, derivanti da materia organica in degradazione, capaci di legare i cationi Ca^{2+} e Mg^{2+} (organomineralizzazione *sensu* Trichet & Défarge, 1995; Reitner & Neuweiller, 1995).

3.3. COMPONENTI E FABRIC

Oltre allo studio dei processi che generano i carbonati microbialitici, un problema centrale, propedeutico ad ogni tipo di analisi, è il loro riconoscimento. Infatti, la maggior parte dei carbonati microbialitici antichi non conservano la prova degli organismi responsabili della loro formazione. Quando Kalkowsky (1908) ha proposto il termine stromatolite era convinto che fossero di origine organica, data la peculiare laminazione, ma non poté dimostrarlo né era sicuro di quali organismi poteva trattarsi; tuttavia sospettò che fossero delle piante semplici (le risposte a tali interrogativi sono state fornite dagli analoghi attuali nei quali si osservò facilmente che gli organismi da collegarsi con certezza alle stromatoliti sono i cianobatteri). L'aspetto esterno, il fabric interno e le firme geochimiche degli esempi antichi di microbialiti, sono solitamente insufficienti per fornire la prova inequivocabile delle loro origini ed è spesso difficile collegare l'organismo con il processo ed il prodotto, sia al livello dei micro che dei macrofabric.

I componenti ed i fabric sono la chiave per capire gli organismi ed i processi coinvolti nei carbonati microbialitici. I grani di grossa taglia, i cianobatteri calcificati e gli eucarioti scheletrici sono solitamente i componenti più facilmente riconoscibili. Tuttavia, molti carbonati microbici sono dominati da fabrics micritici, la cui omogeneità "apparente" maschera una vasta gamma di possibili origini.

Di seguito sono illustrati alcuni componenti principali delle microbialiti e la loro possibile origine.

- ***Micrite***

La calcite microcristallina, o micrite, è un sedimento carbonatico di origine chimica o organica, di dimensioni inferiori a 4 µm (micrite *sensu* Folk), il quale assume diverso aspetto nelle microbialiti in funzione del suo processo di formazione. Se la micrite si presenta densa, la sua origine potrebbe essere attribuita alla calcificazione di batteri, oppure al prodotto di precipitati planctonici: i cosiddetti “*whitings*” cioè sospensioni dense di aghi aragonitici sottoforma di grandi cristalli formatesi sulle acque lagunari ed oceaniche (Thompson *et al.*, 1990). Quando, invece, la struttura generale della micrite è grumosa, la sua origine potrebbe essere legata alla calcificazione della EPS.

- ***Peloidi***

Questi aggregati micritici granulari di origine incerta (McKee & Gutschick, 1969), costituenti comuni dei sedimenti carbonatici attuali, esibiscono un range di dimensioni compreso tra il silt e la sabbia. I peloidi sono molto comuni nei reefs olocenici, così come anche in quelli antichi e nelle stromatoliti. Sono stati considerati come fabrics diagenetici (Macintyre, 1985; Bosak *et al.*, 2004), ma anche come aggregati batterici calcificati (Dupraz *et al.*, 2004; Riding & Tomas, 2006).

- ***Microsparite e sparite***

I precipitati sparitici fibrosi, isopaci e dendritici sono comuni nei carbonati microbici, sotto forma di croste sui tessuti organici e sulla superficie dei grani e dei minerali. Sono presenti soprattutto nelle microbialiti di acqua dolce e contribuiscono alle strutture arborescenti del travertino (Guo & Riding, 1994). Sono comuni inoltre come aggregati cristallini intorno ai filamenti batterici con forma sferulitica (Buczynski & Chafetz, 1991). Microspariti con fabric a mosaico sono, inoltre, molto comuni in associazione con micriti a formare fabrics laminati e grumosi.

- ***Pori e grani alloctoni***

Nei carbonati microbici sono molto spesso presenti pori e vuoti, che variano dagli interstizi molto piccoli alle grandi cavità. Essi includono fenestrate irregolari, come spazi riempiti da microsparite nei fabrics clotted, birdseyes e vuoti più grandi che si originano comunemente in ambienti di piana tidale.

I grani intrappolati sono componenti importanti di alcuni carbonati microbici agglutinati, come si è detto prima a proposito dei processi di formazione. L'agglutinazione è

facile da riconoscere quando i grani sono della taglia del limo o della sabbia, ma rimane di difficile determinazione il confine tra la micrite alloctona (detritica) e quella autoctona (automicrite).

3.4. PRODOTTI E CATEGORIE

I carbonati microbialitici possono formare estese formazioni rocciose, come ad esempio reefs in cui possono essere la componente principale, o essere costituenti relativamente secondari in reefs dominati da metazoi o alghe. I caratteri essenziali di questi depositi, che riflettono organismi, processi e componenti, sono principalmente microscopici, tuttavia, sono le caratteristiche più facilmente distinguibili alla meso e macro scala che suggeriscono la principale e più diffusa suddivisione in categorie morfologiche.

Sulla base della loro strutturazione interna (macrofabric) si possono definire le seguenti categorie: stromatolite (laminato), trombolite (grumoso), dendrolite (dendritico) e leiolite (afanitico) (Dupraz & Strasser, 1999). Relativamente alla forma esterna, si riconoscono cupole, colonne, strati e croste (Figg 3.1, 3.2).



Figura 3.1. Stromatoliti colonnari attuali di Shark Bay, Australia. Le colonne sono alte circa 25 cm.



Figura 3.2. Stromatoliti a duomo del Messiniano, Joyazo (Spagna). La larghezza dei duomi è di circa 1m (Riding, 2000).

- ***Stromatoliti***

Le forme più note di microbialiti sono le stromatoliti. Il termine stromatolite è stato proposto da Kalkowsky (1908) per indicare depositi microbici, bentonici e laminati, osservati nei carbonati del Trias inferiore del Buntsandstein nella Germania del Nord. Le stromatoliti carbonatiche variano considerevolmente nell'origine e nei componenti ed anche nel tipo di laminazione. L'accrescimento ritmico, che produce stratificazione ed anche laminazione può essere collegato con uno sviluppo stagionale, con una sedimentazione periodica o ad entrambe.

La laminazione generalmente è sottile, ma può essere più grossolana ove i componenti sono grandi e/o eretti, come nelle stromatoliti scheletriche e dendrolitiche, oppure può essere il risultato diretto del rifornimento di sedimento a grana grossa, suggerito anche da un accrescimento irregolare (Braga *et al.*, 1995) (Fig. 3.3.). In alcuni casi, all'interno di una singola stromatolite è presente più di un tipo di laminazione; ci sono infatti esempi di stromatoliti moderne sia con lamine agglutinate che precipitate (Rasmussen *et al.*, 1993).

Così come le stromatoliti attuali mostrano chiare evidenze di litificazione sindeposizionale precedente al seppellimento, anche quelle fossili mostrano le prove di litificazione avvenuta durante la crescita: margini con pareti ripide, sporgenze, strutture antigravitative, brecciazione sindeposizionale, nonché organismi perforanti e incrostanti.

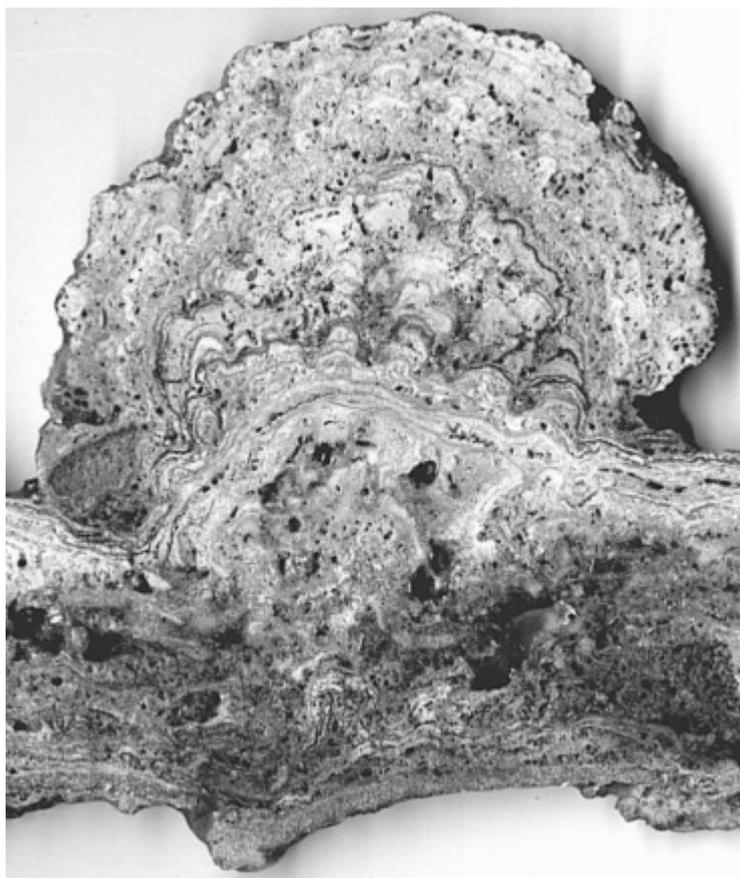


Figura 3.3. Sezione di una stromatolite attuale proveniente da Lagoa Salgada, Brazil (Srivastava, 1999)

Se la morfologia interna indica la natura accrezionale delle stromatoliti, la morfologia esterna può essere usata per ricostruire le condizioni idrodinamiche dell'ambiente in cui le stromatoliti si sono sviluppate. In generale l'alto rilievo e l'isolamento dei corpi stromatolitici riflettono condizioni di crescita in acque calme subtidali, mentre, basso rilievo ed estensione laterale suggeriscono ambienti di alta energia inter-sopratidali. La forma dei build-ups stromatolitici (duomi, colonne ecc.) può anche riflettere particolari condizioni idrodinamiche risultando così indicatori di paleocorrenti o di paleo-linee di riva.

Alla microscala, nel caso di ambienti di acqua bassa, le stromatoliti sono per lo più a lamine piane, mentre negli ambienti più turbolenti saranno costituite da cupole o colonne collegate fra loro da mats piani. Negli ambienti di alta energia, le cupole e le colonne saranno discrete, perché le correnti impediscono la formazione delle stuoie di collegamento (Schopf *et al.*, 1971) (Fig. 3.4).



Figura 3.4. Colonne stromatolitiche collegate fra loro da mats piani.

- ***Tromboliti***

Il termine trombolite (dal greco: *thrombos*, grumo; *lithos*, pietra), è stato proposto da Aitken (1966) per "strutture criptoalgali tipo stromatoliti, non laminate, e caratterizzate da un fabric macroscopico a grumi". Le tromboliti, come le stromatoliti, sono i prodotti primari della calcificazione o agglutinazione ad opera di microrganismi. Si trovano principalmente in ambiente subtidale sotto forma di colonne, duomi, strati e croste.

Le tromboliti, definite sulla base di campioni cambro-ordoviciani, delle Montagne Rocciose del sud del Canada, hanno una struttura grumosa non stratificata rilevabile a livello macroscopico. I grumi trombolitici hanno forma più o meno arrotondata e si distinguono dalla matrice circostante generalmente per il colore più scuro e la per la tessitura più fine. A loro volta, questi grumi, possono avere un microfabric di tipo peloidale, scheletrico o afanitico. Gli organismi che generano le tromboliti possono intrappolare sabbia o grani di dimensioni maggiori esibendo una complessa variazione interna.

- ***Dendroliti***

Le dendroliti (dal Greco: *dendron*, albero; *lithos*, pietra) presentano un fabric centimetrico di tipo arborescente (fig.). La loro formazione è dovuta alla calcificazione di microbi. Macroscopicamente hanno forme di duomi e colonne. Sono molto diffuse in rocce

del Paleozoico inferiore, dove si sono formate grazie alle associazioni di microbi appartenenti ai gruppi di *Renalcis* ed *Epiphyton*, che costituivano i più diffusi costruttori di reefs, insieme agli archeociati ed alle spugne (Cherchi *et al.*, 1995; Zhuravlev & Wood, 1995).

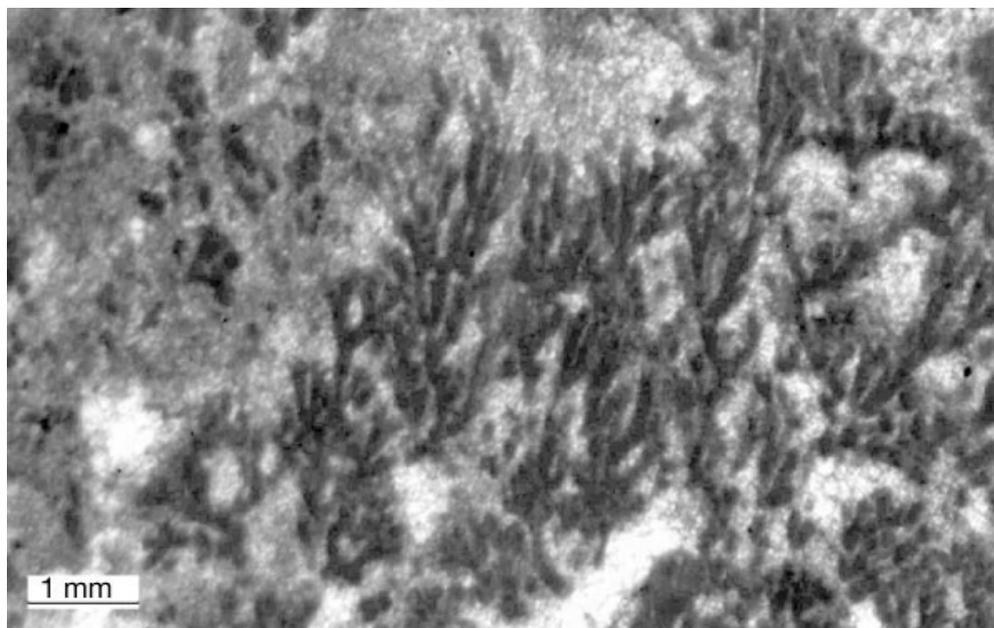


Figura 3.5. Microstruttura dendritica, in microbialiti attuali, riferibile ad un potenziale analogo della forma cambriana *Epiphyton* (Laval *et al.*, 2000).

- ***Leioliti***

Le leioliti (dal Greco: *leios*, uniforme; *lithos*, pietra) presentano un macrofabric relativamente privo di struttura, afanitico, in quanto è assente un chiaro fabric laminato, o a grumi, o ancora dendritico. Il termine è stato istituito su esempi di età Miocene superiore, provenienti dal Sud-Est della Spagna (Braga *et al.*, 1995), dove le leioliti formano grandi depositi a forma di duomo, in associazione con tromboliti e stromatoliti. Il fabric leiolitico potrebbe riflettere un accrescimento irregolare e/o un'omogeneità composizionale (Dupraz & Strasser, 1999; Leinfelder & Schimd, 1999).

3.5. TASSO DI ACCRESCIMENTO DELLE MICROBIALITI

I tassi di accrescimento dei carbonati microbici sono stati valutati sia tramite osservazioni dirette sia con gli isotopi. A Shark Bay sono stati stimati, mediante chiodi anti-corrosivi disposti sulle superfici di accrescimento delle stromatoliti, dei tassi netti di accrescimento di poco inferiori o uguali a 0.4 mm/yr (Chivas *et al.*, 1990). Dati presentati da MacIntyre *et al.* (1996) per un complesso di reef a stromatoliti/tromboliti di Stocking Island (Bahamas), indicano tassi di accrescimento intorno a 1-2 mm/yr. Rassmussen *et al.* (1993), per i reefs stromatolitici del litorale del Chetumal Bay (Belize), basandosi su analisi col ^{14}C , valutano dei tassi medi di accrescimento compresi fra 0.27 e 0.64 mm/yr. Montaggioni e Camoin (1993) dimostrano che le croste stromatolitiche all'interno di un reef coralgale a Papeete Harbor (Tahiti) si sviluppano con tassi medi che superano gli 8 mm/yr. Laval *et al.* (2000) che descrivono microbialiti attuali d'acqua dolce nel Pavillion Lake, British Columbia (le quali mostrano una microstruttura dendritica composta da ramificazioni di microorganismi calcificati che potrebbero costituire un possibile analogo moderno per i mounds a calcimicrobi *Renalcis* ed *Epiphyton* del Cambriano), attraverso datazioni con la serie dell'Uranio, ottengono tassi di accrescimento relativamente costanti di 2.5-3.0 cm/1000yrs. Questo tasso di accrescimento è in media leggermente più basso di quello stimato per i reefs attuali a metazoi, che è dell'ordine di 1-15 mm/yr, con il limite superiore raggiunto soltanto nei reefs ad *Acropora* (Camoin *et al.*, 1997; Grigg, 1998; Hubbard, 2001).

Sebbene tutti questi tassi di crescita siano ragionevolmente estrapolabili alla maggior parte del Fanerozoico, del quale sono noti e confrontabili anche i tassi netti di accumulo del carbonato (Dromart *et al.*, 2002), essi sono più difficilmente applicabili agli esempi dell'Archeano e del Proterozoico inferiore, poiché la cinetica della precipitazione del carbonato a quei tempi potrebbe essere stata significativamente differente (Sumner e Grotzinger, 1996). Tuttavia, secondo Altermann & Nelson (1998) i tassi di sedimentazione ricostruiti per gli strati Paleoproterozoici e Neoarcheani che ricoprono il cratone di Kaapvaal, da 40 m/Ma a oltre 150 m/Ma, sono paragonabili a quelli delle loro equivalenti facies moderne.

3.6. LE MICROBIALITI NEL RECORD GEOLOGICO

I carbonati microbici hanno la storia geologica più lunga e la distribuzione di facies più estesa di tutti i carbonati di origine biogenica, inoltre, per la maggior parte del Precambriano sono stati l'unica evidenza di vita sulla Terra. Le microbialiti (sotto forma di stromatoliti) compaiono circa 3450 Ma fa e diventano abbondanti nel Proterozoico. Il loro acme è posizionato a circa 1000 Ma anni fa, dopodiché cominciano un lento declino e, a partire da circa 680 Ma di anni fa, diminuiscono in modo drastico e definitivo. Tale declino viene posto in relazione alla competizione con gli eucarioti e/o ad una ridotta litificazione (equivalente ad una non conservazione). I carbonati microbialitici conservano poi una nuova relativa importanza attraverso gran parte del Paleozoico e del Mesozoico; iniziano, invece, ad essere limitati a ridottissime nicchie ecologiche nel Cenozoico, forse per la diffusione delle alghe.