

Ocorrência de microbialitos na Formação Codó, Bacia do Parnaíba, Brasil

Microbialites in the Codó Formation, Parnaíba Basin, Brazil

Anelize Manuela Bahniuk Rumbelsperger | Sílvia Maria Couto dos Anjos | Almério Barros França | Nilo Siguehiko Matsuda | Judith Ann Mckenzie | Crisogono Vasconcelos

resumo

A Formação Codó, localizada na Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil, apresenta uma sequência estratigráfica de carbonatos microbiais única, bem preservada, depositada em um ambiente lacustre associado à ruptura e à separação dos continentes sul-americano e africano. O sistema de deposição de microbialitos está associado a ambientes de baixa energia, subaquáticos, hipersalinos, ocasionalmente expostos a condições meteóricas e/ou capilares. Com base em análises macroscópicas e microscópicas, quatro microbiofácies foram descritas – estromatólito, laminado, esferulito e carbonato maciço –, que estão relacionadas às mudanças na paleoprofundidade do lago. Paleotemperaturas obtidas pela análise de grupos de isótopos (*clumped isotopes*) indicam média de 37,5°C como temperatura de precipitação dos carbonatos. Os valores

de $\delta^{18}\text{O}$ do carbonato (-6,8ppm a -1,5ppm Vienna Pee Dee Belemnite - VPDB) implicam precipitação a partir de água com valores calculados de $\delta^{18}\text{O}$ entre -1,6ppm e 1,8ppm Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), refletindo possível precipitação a partir de águas meteóricas modificadas, enquanto os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em carbonato (-15,5ppm para -7,2ppm VPDB) indicam uma entrada significativa de carbono derivado de respiração aeróbia ou anaeróbia da matéria orgânica, sugerindo precipitação em um corpo de água semifechado ou isolado. Essas informações permitem interpretar a evolução da Formação Codó em um paleoambiente lacustre fechado com a alternância de episódios de contração e expansão dos níveis do lago. Nossa interpretação confirma estudos anteriores, os quais afirmam que a Formação Codó foi depositada sob condições quentes e áridas com alta taxa de evaporação.

Palavras-chave: microbialitos | Formação Codó | Cretáceo | Brasil

abstract

The Codó Formation, located in the Parnaíba Basin, Northeast Brazil, contains a unique stratigraphic sequence up to 20-m-thick, composed of well-preserved carbonate microbialites deposited in a closed Upper Aptian lacustrine basin during the initial break up phases of the South American and African Continents. The depositional system of microbialites is associated with a shallow, low energy, subaqueous and hypersaline environment, occasionally exposed to meteoric and/or capillary conditions. Based on macroscopic and microscopic analyses, four microbialite facies were identified. These microbialite facies, designated as stromatolite, laminae, massive carbonate and spherulite, could be related to changes in paleo-depth of the lacustrine environment. Clumped isotope measurements of selected fabrics yield precipitation paleotemperatures with an average value of 37.5°C. The $\delta^{18}O$ values of the bulk carbonate (-6.8ppm to -1.5ppm VPDB) imply precipitation from water with calculated $\delta^{18}O$ values between -1.6ppm and 1.8ppm VSMOW, possibly reflecting precipitation from variable modified meteoric waters, whereas the $\delta^{13}C$ values of the bulk carbonate (-15.5ppm to -7.2ppm VPDB) indicate a significant input of carbon derived from aerobic or anaerobic respiration of organic matter, suggesting precipitation in a semi-enclosed or isolated water body. Combined, our data allow us to interpret the evolution of the Codó Formation as occurring in a closed lacustrine paleo-environment with alternating episodes of contracting and expanding lake levels, which led to the development of specific microbialite facies associations. Our evaluation confirms previous studies that the Codó Formation was deposited under warm and arid paleo-climate conditions with high evaporation.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: microbialite | Codó Formation | Cretaceous period | Brazil

introdução

Depósitos aptianos, correspondentes à Formação Codó na Bacia do Parnaíba (Bahniuk *et al.*, 2015; Vaz *et al.*, 2007; Mendes e Borghi, 2005), têm despertado interesse não só pelo aspecto econômico (extração de calcário e gipso e potencial como gerador de hidrocarbonetos), como também por constituírem o principal registro exposto dos estágios iniciais de abertura do Oceano Atlântico Equatorial. Apesar desta importância, apenas recentemente esta unidade vem sendo sistematicamente investigada em seus aspectos sedimentológicos, estratigráficos e geoquímicos, visando à caracterização de ambientes e reconstrução das condições paleohidrológicas de deposição (Paz e Rossetti, 2005; Rossetti *et al.*, 2004; Paz e Rossetti, 2001; Paz, 2000; Bahniuk, 2013). Estes estudos definiram condições de deposição em um ambiente lacustre hipersalino e anóxico. A presença de evaporitos, calcários e argilitos evidencia a deposição em águas rasas, com baixa energia, ambientes hipersalinos influenciados eventualmente por condições meteorológicas (Gonçalves *et al.*, 2006).

Alguns autores associam a Formação Codó à Bacia do Grajaú, a qual recobre a Bacia do Parnaíba (Paz, 2000; Paz e Rossetti, 2001; Rossetti *et al.*, 2004). Porém, Vaz *et al.* (2007) definem a Formação Codó como a seção cretácea na Bacia do Parnaíba. Estudos bioestratigráficos da Formação Codó, baseados em ostracodes não marinhos e palinologia (Lima, 1982), indicam fauna neoptiana com *Candona* e *Harbinia* (Ramos *et al.*, 2006) e a biozona da espécie *Sergipea Varriverrucata* (Pedrão *et al.*, 2002), sugerindo ambiente lacustre como hábitat. Estudos recentes de Maizatto *et al.* (2011) na região de Grajaú e Imperatriz igualmente associam a Formação Codó com a idade neoptiana.

área de estudo

A Bacia do Parnaíba é uma bacia interior cratônica localizada na Região Nordeste do Brasil que ocupa uma área de aproximadamente 600.000km² e cuja sucessão sedimentar, em seu depocentro, chega a mais de 3km de espessura. A bacia é limitada geologicamente ao norte pelo arco

Ferrer–Urbano Santos, que a separa das bacias de São Luís e Barreirinhas na margem continental; ao sul, pelo arco do Médio São Francisco, separando-a da Bacia Sanfranciscana, e a nordeste, pelo arco de Tocantins, que a separa da Bacia de Marajó (Vaz *et al.*, 2007). Sua seção cretácea está representada pelas formações Grajaú, Codó e Itapecuru, com cerca de 1.100m de espessura (Vaz *et al.*, 2007).

A Formação Codó está localizada na porção noroeste-norte da Bacia do Parnaíba (Vaz *et al.*, 2007). Aflora de forma descontínua, principalmente na borda da bacia, ao longo dos rios Tocantins e Codó, e nas cercanias das cidades de Codó, Grajaú e Imperatriz (fig. 1).

Lisboa (1914) e Campbell *et al.* (1949) definiram a Formação Codó como unidade cretácea com 450m de espessura, composta por arenitos, evaporitos, folhelhos e argilitos. Entre os anos de 1979 e 1982, a Formação Codó foi estudada pela Petromisa, sendo que nessa época vários projetos foram realizados a fim de avaliar seu potencial mineral.

Segundo Pedrão *et al.* (2002), com base na ocorrência de *Sergipea variverrucata*, rochas correlativas à Formação Codó de idade neoptiana sugerem extensa distribuição, podendo ser encontradas nas bacias de Bragança-Viseu e São Luís, bem como no Gráben de Ilha Nova.

materiais e métodos

Para definir as microbiofácies na Formação Codó, vários métodos foram integrados, incluindo métodos clássicos, tais como: descrição de fácies sedimentares (afloramentos e testemunhos), descrição petrográfica de lâminas delgadas, análises mineralógicas, químicas e isotópicas. Também foi utilizada a nova técnica isotópica denominada *clumped isotope*.

Foram preparadas e descritas cerca de 53 lâminas petrográficas, sendo 20 confeccionadas na Petrobras/Cenpes/GSEP e o restante no ETH Zurich. Para a descrição das lâminas petrográficas foi utilizada microscopia óptica de luz transmitida (microscópio Nikon Optiphot, ETH Zurich, com objetivas de 2x, 4x, 10x e 40x), e as fotomicrografias foram obtidas digitalmente a partir da câmera Canon EOS 500D & 1.6 TV lens Optiphot.

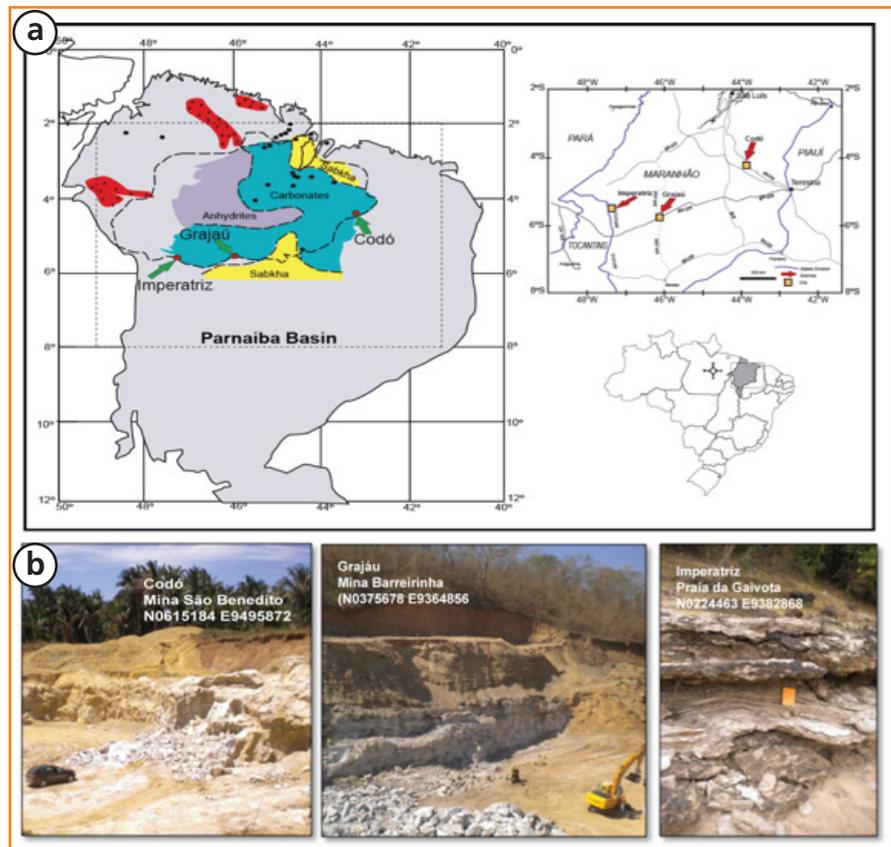


Figura 1 – (a) Mapa de localização da Bacia do Parnaíba (Siluriano) com o limite da Formação Codó (Aptiano) delimitado pela linha pontilhada. Lado direito – Mapa do Brasil com destaque para o estado do Maranhão, bem como mapa do Maranhão com as principais vias de acesso aos afloramentos; (b) imagens das minas de São Benedito no município de Codó, Barreirinha, município de Grajaú, e do afloramento na Praia da Gaivota no município de Imperatriz (modificado de Bahniuk *et al.*, 2015).

Figure 1 – (a) Location map of the Parnaíba Basin (Silurian), with the Codó Formation delineated by the dashed line. Right side – Map of Brazil with the location of Maranhão State, and the main roads to access the outcrops; (b) Images of the São Benedito quarry in Codó city, Barreirinha quarry in Grajaú city and the Praia da Gaivota outcrop in the Imperatriz Region. (modified from Bahniuk *et al.*, 2015).

As análises por difração de raios X (DRX) foram realizadas no Laboratório de Mineralogia do ETH Zurich, no equipamento Bruker, AXS D8 Advance, equipado com Lynxey. A identificação dos minerais foi realizada com o auxílio do programa de interpretação denominado XRD Wizard. Para as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizado o equipamento Zeiss Supra 50 VP, acoplado a um detector de EDX. As amostras foram revestidas com paládio e submetidas a uma leve acidificação, a fim de evitar artefatos de polimento. As amostras foram também imageadas usando-se elétrons secundários, obtendo-se, assim,

imagens diversificadas da superfície da amostra. As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia da Universidade de Zurique.

Análises isotópicas foram realizadas usando-se a técnica de *clumped isotope*, que se baseia no estado de ordenação de isótopos raros em materiais naturais. Aparentemente, a proporção dos isótopos ^{13}C - ^{18}O em carbonatos é sensível a mudanças de temperatura, independentemente da composição isotópica da massa. Assim, a análise de isótopos agrupados (*clumped isotope*) em carbonatos antigos pode ser usada como um paleotermômetro, não necessitando suposições sobre os valores para $\delta^{18}\text{O}$ relativo ao fluido inicial do carbonato (Eiler e Schauble, 2004; Eiler, 2007). As análises foram realizadas no laboratório do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), Pasadena, EUA, utilizando-se o equipamento Espectrômetro de Massa (Finnigan MAT 253) modificado e acoplado a um cromatógrafo gasoso.

microbiofácies da Formação Codó

As microbiofácies apresentadas neste artigo foram descritas e nomeadas de acordo com Bahniuk *et al.* (2015) com base em trabalhos anteriores (Preiss, 1972; Dupraz *et al.*, 2004; Terra *et al.*, 2010) e em análises macroscópicas e microscópicas. Foi possível definir quatro microbiofácies na Formação Codó:

- 1) estromatólito;
- 2) laminado;
- 3) esferulito;
- 4) carbonato maciço.

A sequência de microbialitos descrita na Formação Codó oferece a possibilidade de avaliar as condições paleoambientais em um contexto estratigráfico bem controlado.

microbiofácies estromatólito

A microbiofácies estromatólito aflora ao longo da borda da Bacia do Parnaíba, sendo que os afloramentos mais expressivos (espessura e variedade) ocorrem na região de Codó e Imperatriz. Esta microbiofácies pode ser subdividida em três diferentes tipos de estromatólitos, sendo eles: *club-shaped*, colunar e dômico (fig. 2).

Os estromatólitos descritos na Formação Codó apresentam uma característica morfológica singular, sendo que o tipo *club-shaped* ocorre a

partir de um substrato laminado fixo, enquanto o colunar não apresenta laminação na base. Os estromatólitos diferem entre si na forma de crescimento e nas diferentes espessuras e coloração das laminações. Mineralogicamente, os estromatólitos são compostos por calcita (60-80%), dolomita (10-20%) e quartzo (10-35%). Outra relação importante é a composição mineralógica e o contexto geográfico, sendo que os estromatólitos colunares tendem a ser mais silicificados e abundantes na região de Imperatriz, e os com formato *club-shaped* são predominantemente dolomitizados e observados com maior frequência nos afloramentos próximos à cidade de Codó.

Os estromatólitos colunares descritos no afloramento Praia da Gaivota/Amor, ao longo da margem do Rio Tocantins na região de Imperatriz (fig. 3), são caracterizados por não apresentarem laminação na base. Uma coluna individual varia de 20cm a 50cm de altura e em média possui 10cm de diâmetro. Os estromatólitos de Imperatriz encontram-se organizados na forma de *clusters* ou *patch reefs* – que são recifes isolados de pequena dimensão, encontrados geralmente dentro de uma lagoa ou enseada. Entre os *patch reefs* foi observado material carbonático intensamente brechado, geralmente com fragmentos de estromatólitos e laminitos.

microbiofácies laminado

A microbiofácies laminado ocorre em todos os afloramentos, com espessuras que variam de centimétrica a métrica, com o máximo de cinco metros na região de Grajaú.

Nesta microbiofácies distinguem-se três tipos diferentes de laminações, caracterizados pela morfologia, continuidade e espessura, denominados (1) planar, (2) crenulado e (3) descontínuo (fig. 4). Os três tipos descritos assemelham-se entre si na intercalação de lâminas de coloração cinza-escuro/marrom e creme. O conteúdo orgânico da microbiofácies laminado foi exaustivamente investigado em escalas diferentes, utilizando-se vários métodos: carbono orgânico total (COT), MEV, *energy dispersive spectroscopy* (EDAX) e descrição de lâmina petrográfica, revelando vestígios de *extracellular polymeric substances* (EPS) e bactérias fósseis.

microbiofácies esferulito

A microbiofácies esferulito foi definida como biofácies por causa do seu conteúdo

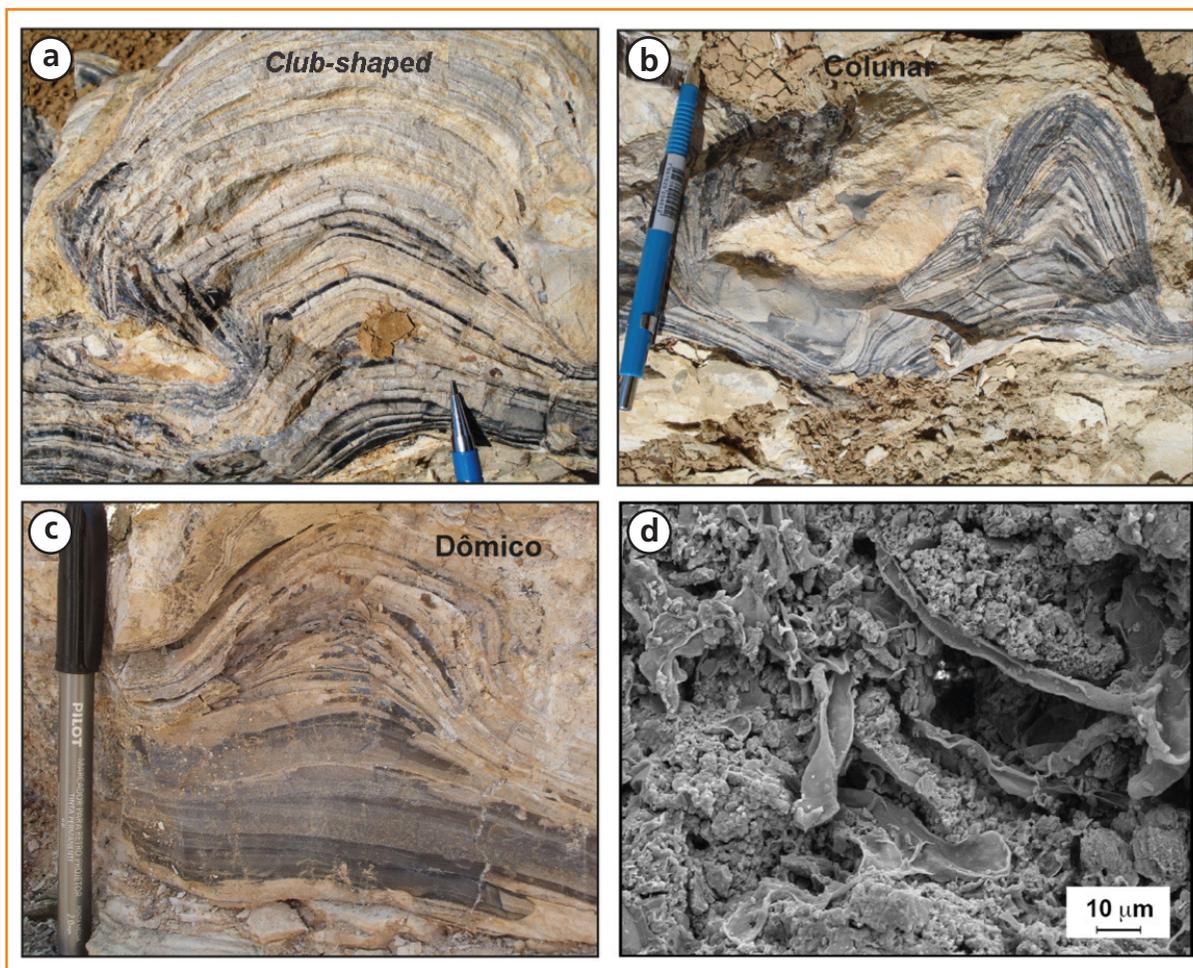


Figura 2 - Microbiofácies estromatólito. (a) estromatólito do tipo *club-shaped* da região de Codó, com substrato laminado na base; (b) estromatólito do tipo colunar da região de Codó, com laminação convexa e ausência de laminação na base; (c) estromatólito tipo dômico da região de Codó; (d) fotomicrografia obtida através do MEV, mostrando a presença de filamentos e EPS fóssil em amostras da microbiofácies estromatólito.

Figure 2 - *Stromatolite microbialite facies*. (a) *club-shaped stromatolite from the Codó region showing a flat laminated substrate at the base*; (b) *columnar stromatolite from the Codó region, exhibiting steep convex upward laminae*; (c) *domal stromatolite from the Codó region*; (d) *SEM photomicrograph displaying the presence of filament structures associated with remains of EPS*.

organo-sedimentar. Esta microbiofácies ocorre nos afloramentos da região de Codó e Grajaú, em camadas com espessuras entre 15cm e 30cm. Não foi descrita no afloramento Praia da Gaivota/Amor em Imperatriz. Em todos os perfis observados, está associada com sequências evaporíticas.

As estruturas esferulíticas apresentam diversas configurações, que variam de cristais fibrosos até concêntricos, com definida estrutura interna. Em algumas seções apresentam depressões ou espaço poroso no centro. O tamanho dos esferulitos varia entre 2mm e 6mm, contendo estrutura interna radial, e comumente os grãos coalescem definindo

as laminações (fig. 5). Em análises de catodoluminescência realizadas em algumas porções das lâminas petrográficas é observado intenso processo de silicificação. Na composição mineralógica dos esferulitos ocorre predominância de calcita (70-80%) e dolomita (10-20%), e o quartzo (10-15%) é mais abundante no cimento. O conteúdo fossilífero nesta fácies é insignificante ou nulo.

microbiofácies maciça dolomítica

A microbiofácies maciça dolomítica é caracterizada por sua coloração creme e pela ausência de estrutura (fig. 6). Esta fácies está presente em todos

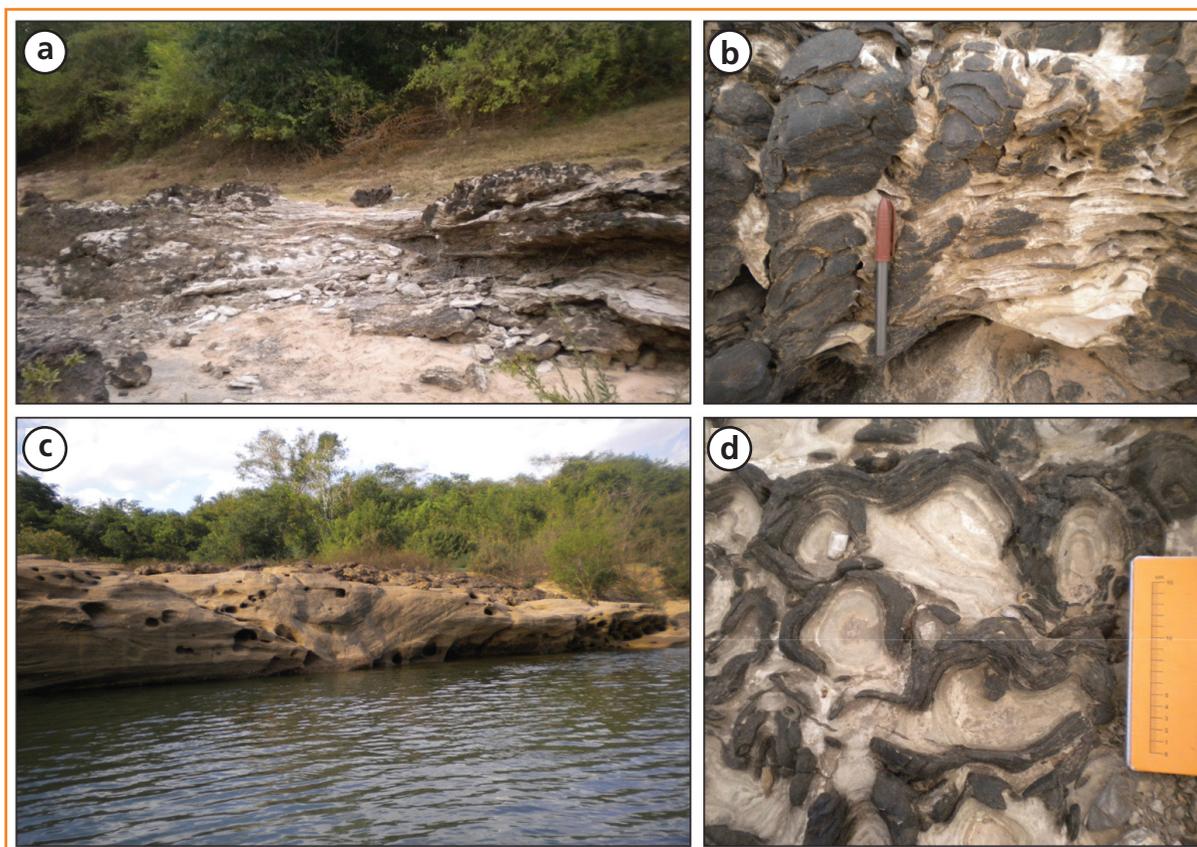


Figura 3 - (a) Afloramento na margem do Rio Tocantins, onde foram identificadas quatro estruturas do tipo *Patch Reefs*, na região de Imperatriz; (b) estromatólitos do tipo colunar; (c) paleocanal preenchido da Formação Grajaú; (d) detalhe do estromatólito do tipo colunar observado em planta.

Figure 3 - (a) *Imperatriz outcrop containing Patch Reefs exposed along the Tocantins River*; (b) *columnar stromatolite from the Imperatriz Region*; (c) *paleo-channel filling up from the Grajaú Formation*; (d) *detail of columnar stromatolite observed from the top*.

os afloramentos visitados e comumente associada às microfácies estromatólito e esteira microbial. Uma das características marcantes dessa microfácies é a composição mineralógica, constituída quase exclusivamente por dolomita (80-100%) e calcita (até 20%). Por meio de fotomicrografias de luz transmitida foi identificada micrita, e, através de imagens de MEV, a ausência de estrutura ficou definida. Em algumas porções das amostras foi constatada a presença de EPS fóssil, porém menos abundante do que nas microfácies estromatólito e laminado.

argilominerais da Formação Codó

Foram encontrados diferentes tipos de argilominerais nas microfácies da Formação Codó (fig. 7). Um estudo mais detalhado para caracterização e quantificação destas argilas está sendo

realizado pela equipe do Projeto Pethros. Análises preliminares indicam a presença de illita, esmectita e paligorsquita, esta última facilmente encontrada em ambientes modernos, como, por exemplo, Lagoa Salgada. A associação de minerais argilosos com carbonatos reforça a interpretação de condições extremas de alta evaporação e mudanças nas condições físico-químicas na formação de paragêneses carbonato + argilominerais. Ocorrência de argilominerais associados à atividade microbial e precipitação de carbonatos foram reportadas anteriormente (Konhauser, 2007; Dong, 2012; Bontognali *et al.*, 2014 a,b).

Gonçalves *et al.* (2006), em seu estudo sobre argilominerais da Formação Codó, constataram a presença de esmectita, illita e caulinita, respectivamente, sob forma de colmeia, em cristais filiformes, e em livretos, atestando que parte

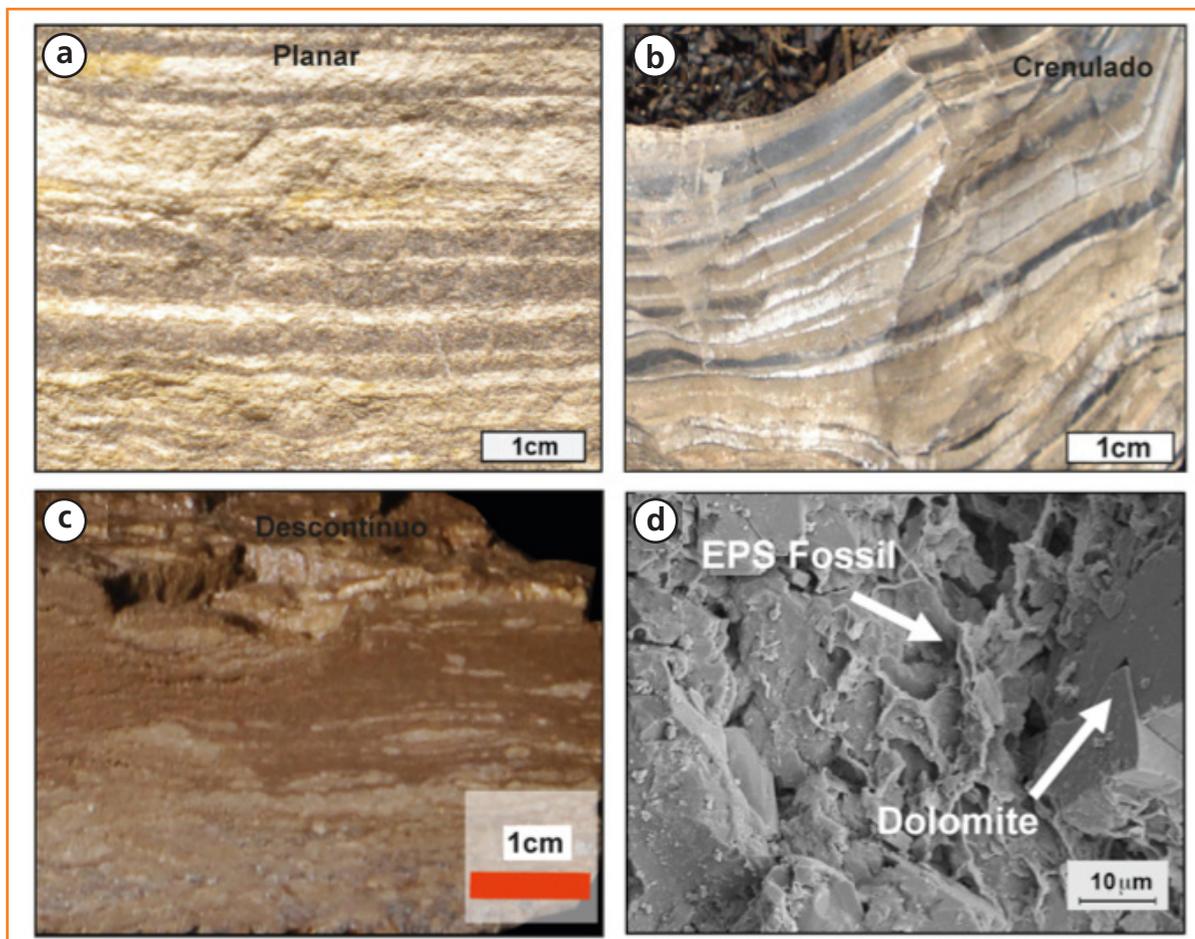


Figura 4 - Microbiofácies laminado. (a) laminado do tipo planar da Região de Codó; (b) laminado do tipo crenulado da Região de Grajaú; (c) laminado do tipo descontínuo do poço 9-PAF-2; (d) fotomicrografia obtida através do MEV, mostrando a presença de filamentos e EPS fóssil em amostras da microbiofácies esteira microbial.

Figure 4 - Laminated microbialite facies. (a) flat laminae from the Codó Region; (b) crenulate laminae from the Grajaú Region; (c) discontinuous laminae from well 9-PAF-2; (d) SEM photomicrograph displaying the presence of filament structures associated with remains of EPS.

dos argilominerais se formou autigenicamente no sítio de deposição. Ainda segundo Gonçalves *et al.* (2006), o domínio de esmectitas, somado à abundância de evaporitos, sugere que a Formação Codó foi depositada sob domínio de climas áridos ou com tendência à aridez.

análise biocronoestratigráfica e paleoecológica da Formação Codó

As informações apresentadas neste item foram obtidas com base no artigo publicado por Maizatto *et al.* (2011) no XXII Congresso Brasileiro de Paleontologia. Este trabalho é fruto da

cooperação entre pesquisadores Petrobras/Cenpes e equipe do Instituto Tecnológico Federal da Suíça (EYHZ).

Foram analisadas três amostras da Formação Codó, as quais apresentaram um conteúdo palinológico muito rico e bem preservado, constituído por palinórfos de origem continental. Na associação palinológica estudada, destaca-se a abundância expressiva de grãos de pólen do gênero *Classopollis*.

Das três amostras analisadas, apenas a amostra coletada no afloramento Mina Barreirinha resultou na recuperação de fragmentos de ossos, atribuídos com incerteza a peixes, além de ostracodes não marinhos da família *Cyprideidae Baird*, espécie *Harbinia sinuata*, que está associada a

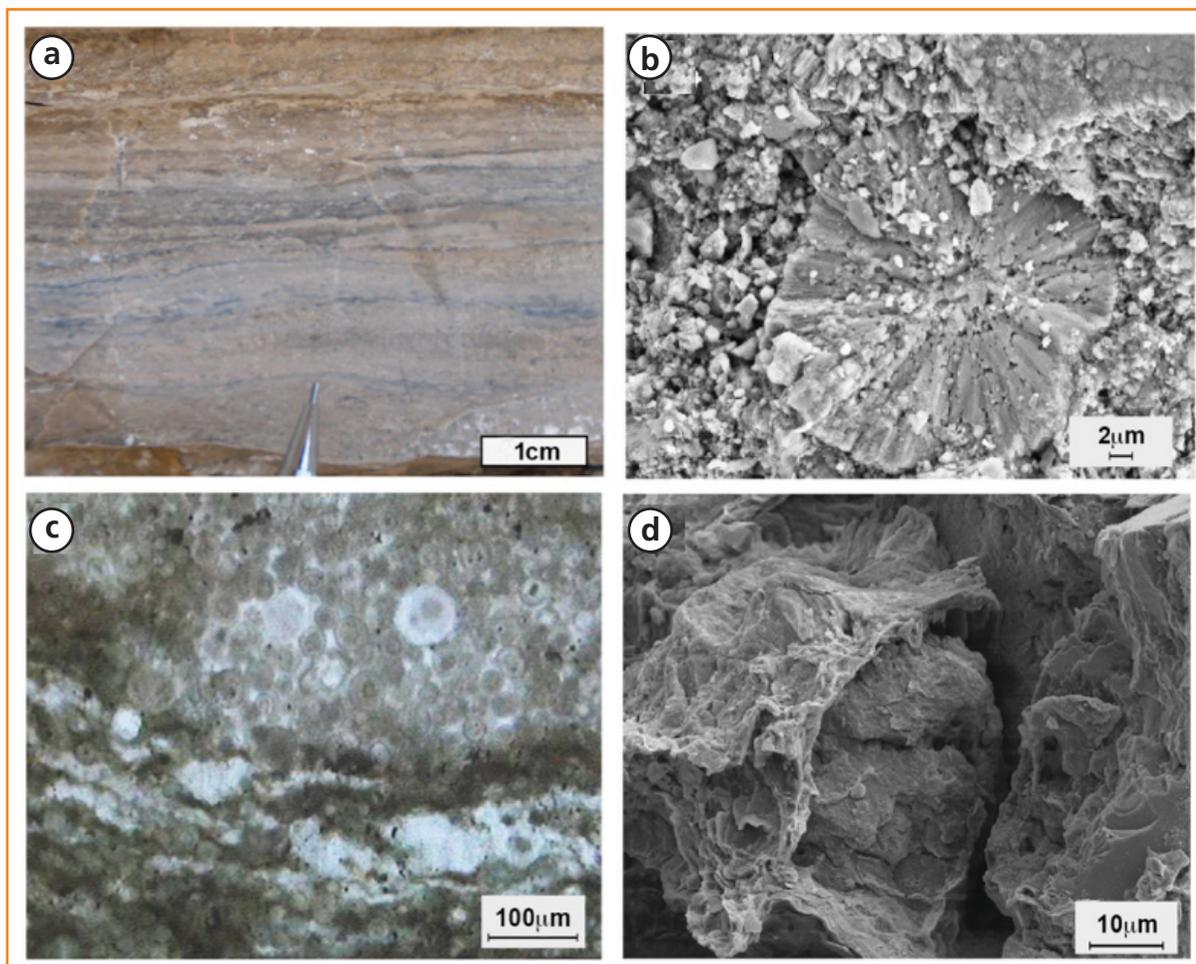


Figura 6

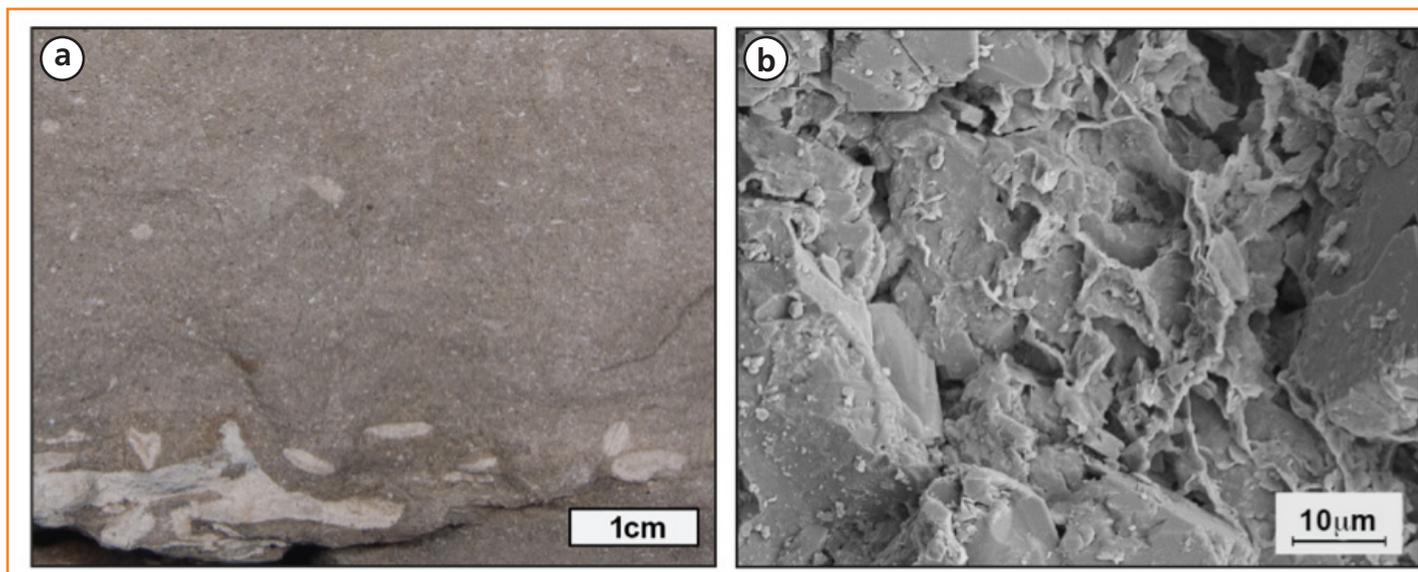
(a) Microbiofácies carbonato maciço; (b) imagem obtida através do MEV, mostrando a presença de filamentos e EPS fóssil em amostras da microbiofácies carbonato maciço.

Figure 6

(a) Massive carbonate facies; (b) SEM image displaying the presence of filament structures associated with EPS remains.

Figura 5 - (a) Microbiofácies esferulito; (b) fotomicrografia obtida através do MEV, mostrando estrutura interna radial; (c) fotomicrografia obtida com luz transmitida da microfácies esferulito; (d) imagem obtida através do MEV, demonstrando a relação do esferulito associado ao argilomineral magnésiano.

Figure 5 - (a) Spherulite microbialite facies; (b) SEM photomicrograph displaying spherulites with radial internal structure; (c) photomicrograph of thin section showing the radial internal structure; (d) SEM image displaying the relation between the spherulite and Mg-clay.



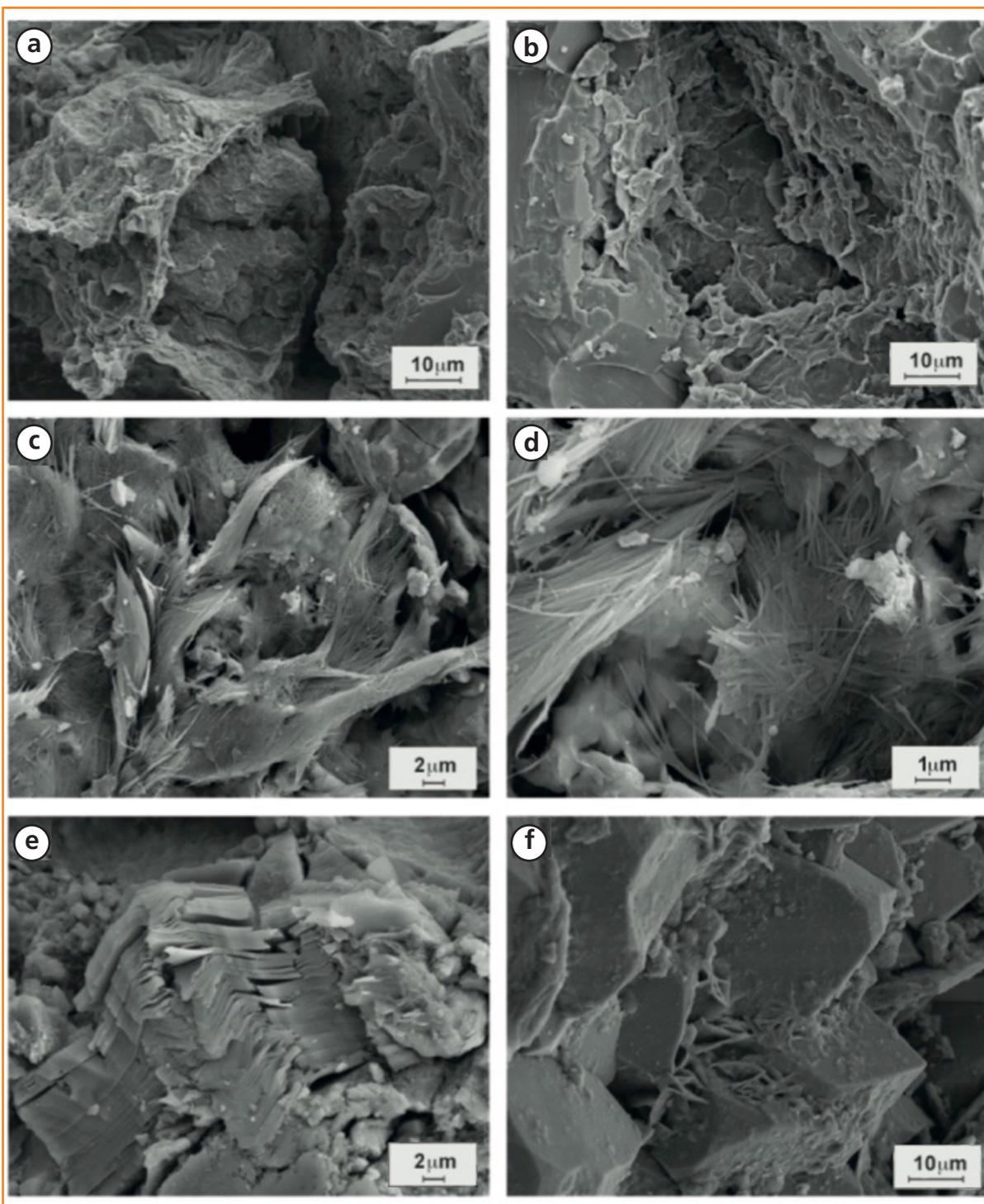


Figura 7 - Imagens de argilominerais da Formação Codó obtidas através de MEV. (a) esmectita envolvendo esferulitos; (b) esmectita autigênica com cristais arranjados em padrão alveolar ou em forma de "colmeia"; (c,d) cristais de paligorskita associados a microfácies carbonato maciço; (e) caulinita em cristais com arranjo em forma de livretos em meio a palhetas de esmectita; (f) cristalização em forma de "livretos" de caulinita autigênica associada a cristais de dolomita.

Figure 7 - SEM images of clay minerals of the Codó Formation. (a) smectite enveloping spherulites microbial facies; (b) authigenic smectite with crystals forming an alveolar or "honey-comb" feature; (c,d) paligorskite crystals associated with massive carbonate facies; (e) authigenic kaolinite arranged as booklets surrounded by detrital smectites; (f) crystallization in format of "booklets" of authigenic kaolinite associated with dolomite crystals.

depósitos de lagos com águas salobras e esporadicamente a camadas evaporíticas (fig. 8).

A análise biocronostratigráfica realizada nas três amostras estudadas obteve os seguintes resultados:

- de acordo com esta análise, foi possível caracterizar uma idade aptiana para as três amostras com base na identificação da biozona onde predomina *Sergipea variverrucata*. Essa idade também é respaldada pelos resultados do estudo de biozonas de ostracodes que posicionaram os estratos da amostra GRA1 na zona *Harbinia spp*;
- com base no trabalho de Vakhrameyev (1981), foi possível associar as altas porcentagens de grãos de pólen do gênero *Classopollis* encontradas nas três amostras a condições paleoclimáticas quentes e áridas, que vigoraram durante o Aptiano. Segundo Oosting (2004), o gênero *Classopollis* estaria associado a plantas com hábito arbustivo da família *Cheirolepidiaceae*.

Além disso, foram observadas algumas características nas associações palinológicas que merecem destaque. Nas amostras IMP2 e GRA1, foram observados grãos de pólen do gênero *Araucariacites*, pertencente à família *Araucariaceae* (*gimnosperma*). Segundo Oosting (2004), as araucariáceas apresentam hábito arbóreo e no registro geológico estão associadas, preferencialmente, a regiões próximas a paleoambientes localizados em baixas altitudes e com baixa umidade. Com isso, é possível sugerir que a paleoflora era constituída predominantemente por arbustos da família *Cheirolepidiaceae* (*Classopollis*) e subordinadamente por árvores da família *Araucariaceae* (*Araucariacites*).

Na amostra IMP1, foi caracterizada a presença de grãos de pólen poliplicados (*Equisetospores* e *Gnetaceae pollenites*). Segundo Arai e Coelho (2001), a abundância de polens poliplicados é considerada indicadora de aridez, sendo, dessa forma, mais uma informação que corrobora a análise paleoclimática acima apresentada.

O gênero *Harbinia* está associado no Brasil a depósitos de ambientes límnicos, que apresentam altas taxas de evaporação, corroborando a interpretação paleoclimática obtida por meio dos palinomorfos.

aplicação da técnica *clumped isotope*

Cerca de 25 amostras da Formação Codó foram analisadas pela técnica de *clumped isotope*. As paleotemperaturas derivadas das amostras de afloramento da Formação Codó variam entre 20°C e 45°C. Já as temperaturas de amostras de testemunhos variam de 50°C a 60°C (fig. 9). Os menores valores para as amostras de afloramento podem indicar eodiagêse e até mesmo telodiagêse preservadas nas rochas. Quanto aos valores de temperatura mais elevados, possivelmente indicam processos diagenéticos mais intensos em subsuperfície (mesodiagêse), que ocorreram com a litificação dos sedimentos durante o soterramento, ou seja, reequilíbrio isotópico em profundidade, refletindo-se no aumento das paleotemperaturas.

Assumindo que as amostras de afloramento da Formação Codó preservam o sinal isotópico original, os valores $\delta^{18}O$ dos carbonatos (-5,8ppm a -1,5ppm PDB, -2,5ppm e 1,5ppm SMOW) sugerem um sistema lacustre (precipitação em áreas semiconfinadas ou isoladas). Os valores $\delta^{13}C$ da maior parte dos carbonatos (-9,5ppm a -7,2ppm PDB) indicam uma contribuição significativa de carbono proveniente da respiração aeróbia ou anaeróbia da matéria orgânica.

O estudo detalhado aplicado aos esferulitos demonstrou que os valores $\delta^{18}O$ indicam que a calcita foi precipitada a partir de uma solução mais rica em ^{18}O , possivelmente num ambiente mais evaporítico que o da formação da dolomita, corroborado por diferentes temperaturas para o esferulito e a dolomita. Até o momento, os argumentos com base no estudo comparativo dos ambientes naturais juntamente com as informações do *clumped* reforçam a ideia de que os esferulitos e a matriz orgânica dolomítica representam duas fases distintas de precipitação.

Os resultados demonstram que a combinação de abordagens geoquímicas e petrográficas pode fornecer uma avaliação das condições paleoambientais durante a precipitação de carbonato e também contribuir para o melhor entendimento dos processos diagenéticos ocorridos com a rocha.

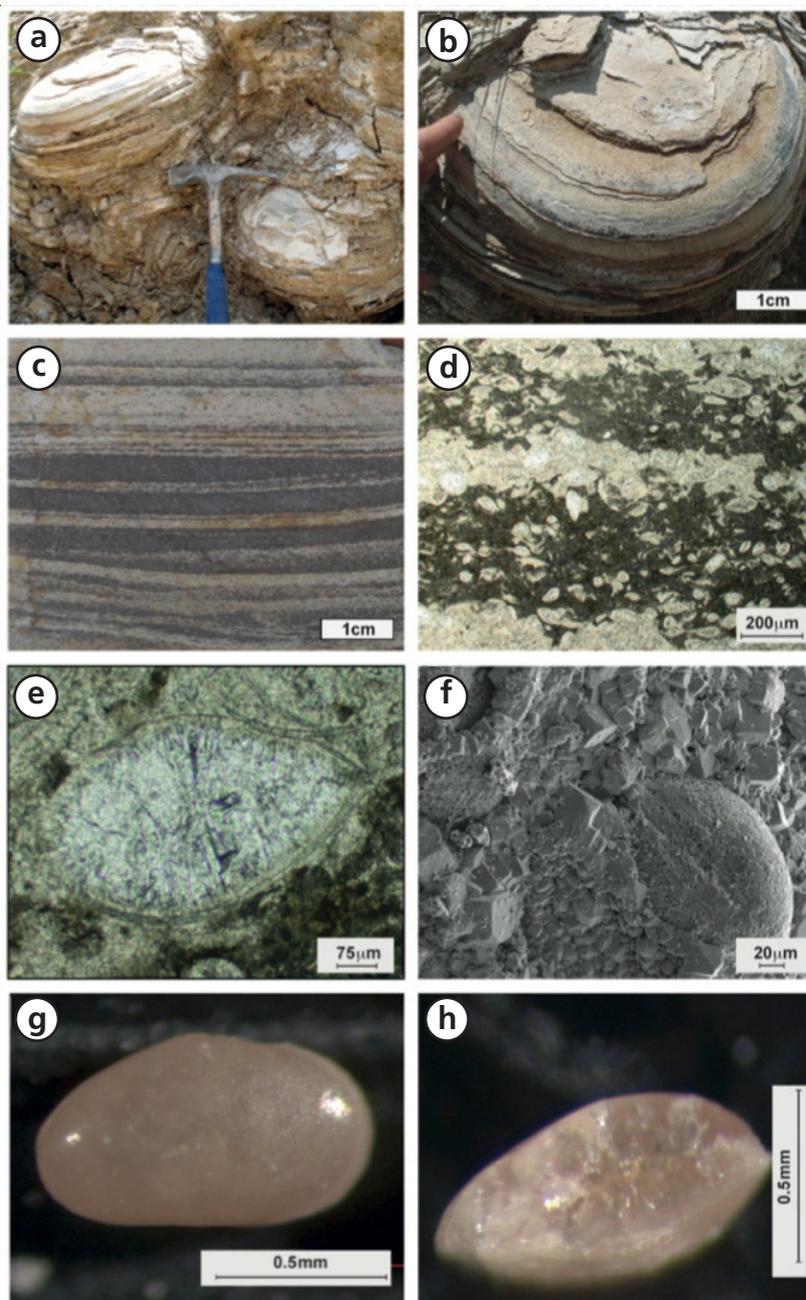


Figura 8 - Amostras obtidas na Mina Barreirinha, em Grajaú, indicaram a presença de ostracodes não marinhos da Família *Cyprideidae* Baird, espécie *Harbinia sinuata*. (a, b) morfologia externa semidômica de afloramentos com a microfácies laminado; (c) laminação não planar onde se alternam lâminas com coloração clara e escura produzidas durante diferentes fases de deposição; (d) lâmina delgada revelando detalhe da expressiva contribuição de ostracodes na constituição das lâminas claras; (e) fotomicrografia de ostracodes revelando cimentação interna cristalina; (f) imagem de MEV revelando cristais envolvendo as carapaças calcificadas de ostracode; (g, h) fotografia de ostracode recrystalizado em planta e perfil.

Figure 8 - Samples obtained in Barreirinha quarry in Grajaú, indicate the presence of ostracods of non-marine *Cyprideidae* Baird Family, species *Harbinia sinuata*. (a, b) external morphology of semi-domic heads from the laminated microfacies, (c) non-planar lamination with alternation of light and dark laminae produced during different phases of the deposition; (d) thin section with detail of the expressive contribution of ostracods in the light laminae; (e) photomicrography of ostracods revealing crystalline internal cementation; (f) SEM image revealing carbonate crystals surrounding the ostracod skeleton; (g, h) photo of recrystallized ostracods viewed from the top and side.

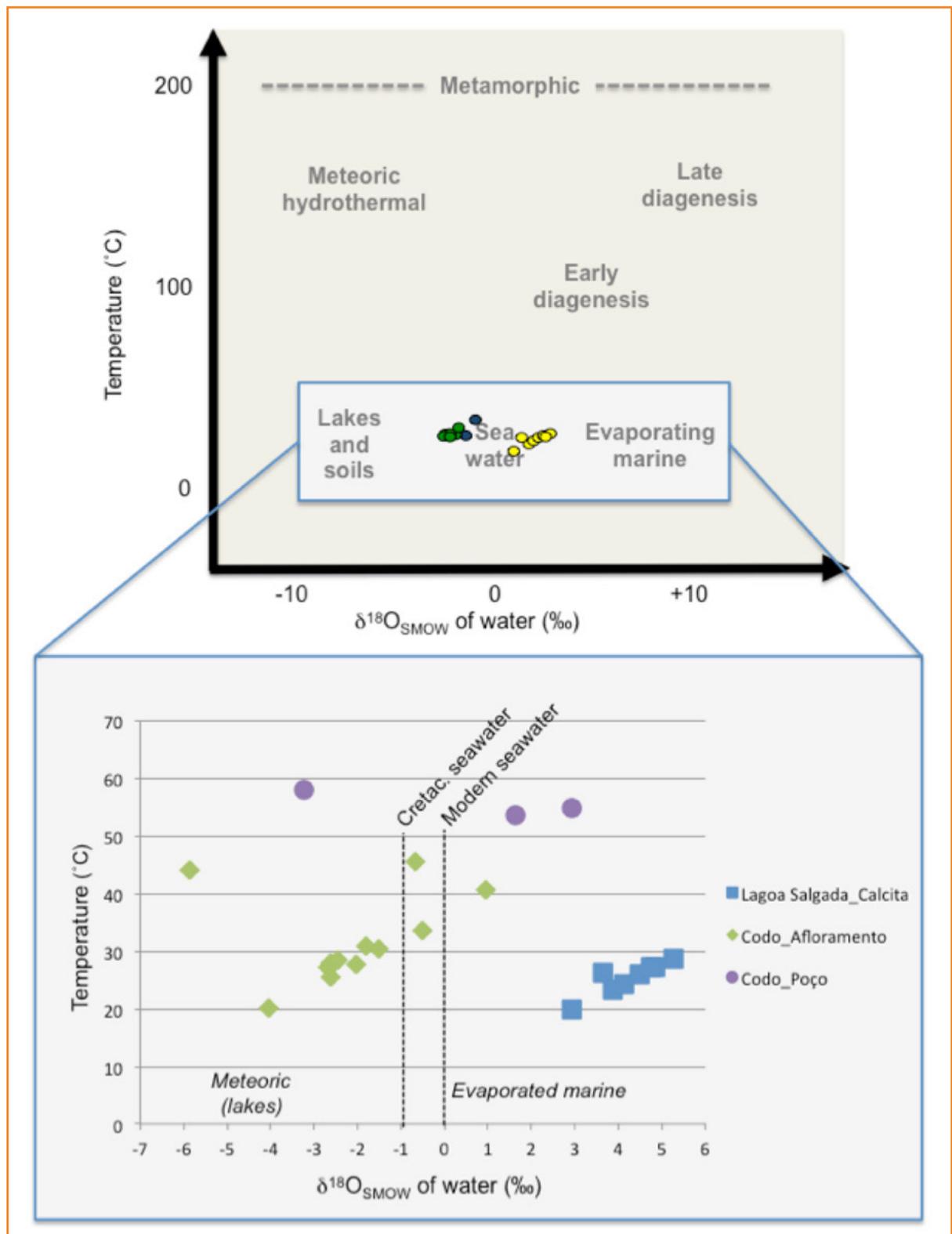


Figura 9 - Gráfico temperatura (°C) versus $\delta^{18}\text{O}$ SMOW da água. Os valores $\delta^{18}\text{O}$ das amostras da Formação Codó, calculados com uso de isótopos agrupados (*clumped isotopes*), sugerem um sistema lacustre, precipitação em áreas semiconfinadas ou isoladas.

Figure 9 - Cross-plot of "clumped" isotope paleo-temperature (°C) versus calculated $\delta^{18}\text{O}$ SMOW of water. The $\delta^{18}\text{O}$ of microbialites described in the Codó Formation suggest lacustrine system precipitated in isolated areas.

discussão

A Formação Codó compreende uma sequência carbonática microbial. As características estromatolíticas presentes na formação sugerem condições ambientais especiais para o desenvolvimento dessas estruturas.

Trabalhos anteriores (Paz, 2000; Paz e Rossetti, 2001; Rossetti *et al.*, 2004; Paz e Rossetti, 2005) têm descrito o paleoambiente deposicional da Formação Codó como lacustre, evaporítico, hipersalino, com variabilidade mineralógica, condições estas que proporcionam um ambiente ideal para a evolução de estruturas microbiais. No entanto, esses autores não descrevem a ocorrência de estromatólitos na Formação Codó.

Com base nas observações de campo, quatro tipos de microbialitos foram reconhecidos e classificados de acordo com a estrutura interna e características morfológicas. Segundo as fácies microbiais e demais características, foi possível reconhecer e tentativamente reconstruir o paleoambiente propício à formação dos microbialitos da Formação Codó. Assim, é importante avaliar os vários componentes das diferentes microfácies e integrar os resultados, para se estabelecer uma explicação lógica para a origem dos carbonatos microbiais da Formação Codó.

Atualmente, persistem problemas para interpretar microbialitos antigos. O primeiro é que microbialitos modernos, como, por exemplo, estromatólitos, embora ocorram em ambientes extremos, não estão associados a um único tipo de ambiente. Diversos parâmetros ambientais, tais como condições físico-químicas, correntes de energia, salinidade e principalmente o metabolismo biológico, exercem um papel fundamental sobre o tipo de estrutura relacionado com a fábrica biogênica, o que dificulta estabelecer uma relação entre as estruturas internas e a morfologia para interpretar as condições ambientais durante a formação de estromatólitos.

conclusões

Foram reconhecidas quatro microfácies na Formação Codó, definidas como: estromatólito,

laminado, esferulito e carbonato maciço. Essas microfácies foram reunidas em associações de fácies, sendo reconhecidas três unidades ou associações. Três perfis litofaciológicos foram descritos na Formação Codó, sendo o perfil da Mina São Benedito, próximo à cidade do Codó, o mais completo para o entendimento faciológico. Na Mina Barreirinha, próximo à cidade de Grajaú, foram reconhecidas duas associações (unidades 2 e 3), sendo a região caracterizada pela alta frequência da microfácies laminado e pela expressiva espessura da sequência evaporítica. Já o afloramento Praia da Gaivota/Amor, próximo à cidade de Imperatriz, mostrou-se interessante para a observação da variação lateral das microfácies estromatólito e laminado (fig. 10).

Ressalta-se a importância da descrição dos estromatólitos na Formação Codó durante esta pesquisa, pois este trabalho é pioneiro na identificação e descrição de microbialitos na formação.

Com base nas informações obtidas nos últimos três anos no Projeto Pethros, foi possível definir os processos e o ambiente de formação dos microbialitos da Formação Codó. A combinação de diferentes técnicas – como descrição petrográfica, microscopia eletrônica, estudos bioestratigráficos e a mais recente técnica, *clumped isotope* – forneceu subsídios para uma melhor interpretação, junto com observações associadas a experimentos em laboratório e medições em ambientes modernos (Bahniuk *et al.*, 2015).

Processos como biomineralização induzida e influenciada foram responsáveis pela formação das microfácies descritas. Esses processos estão intrinsecamente associados ao tipo de ambiente deposicional, à concentração de matéria orgânica, ao metabolismo e às condições climáticas. Condições mais extremas, como alta evaporação, propiciaram maior intensidade de biomineralização influenciada, como, por exemplo, a microfácies esferulito, embora a biomineralização induzida também possa estar associada a ambientes extremos. Nesse caso, os processos metabólicos exerceram maior influência na precipitação de minerais, por exemplo, a ocorrência de dolomita em diversas microfácies associadas à presença de estruturas filamentosas e EPS.

Estudos bio- e paleocológicos ajudaram a definir melhor a posição cronoestratigráfica da Formação Codó, definida como Cretáceo Superior – Idade Aptiana. Esses estudos também foram importantes

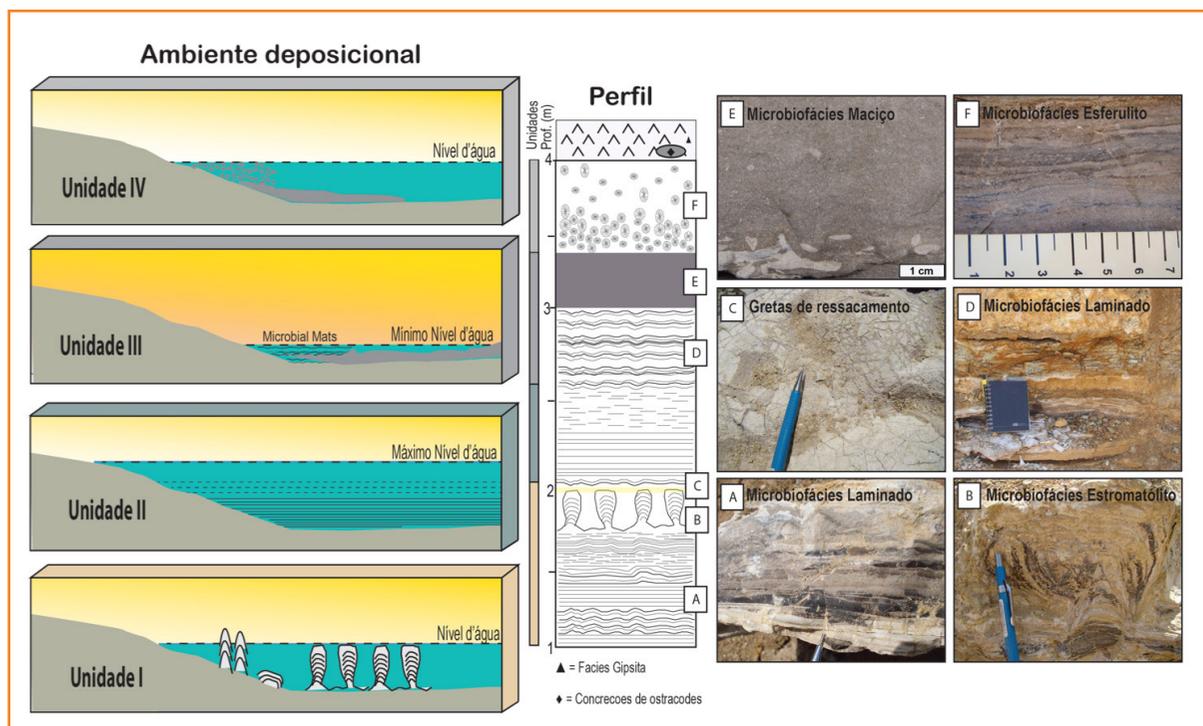


Figura 10 - Modelo deposicional ilustrando a evolução do paleoambiente proposto para o desenvolvimento das microfácies da Formação Codó. O perfil demonstra o empilhamento das microfácies descritas na Formação Codó (a, b, c, d, e, f), as quais são interpretadas pela variação no nível de água na lagoa. As microfácies estão sobrepostas por evaporitos.

Figure 10 - Depositional model illustrating the paleoenvironmental evolution associated with the different microbialite facies of the Codó Formation. The profile display the microbialite facies described in the Codó Formation (a, b, c, d, e, f), which are interpreted as a consequence of water level changes. The microbial carbonate sequence is overlain by evaporites.

para o melhor entendimento ambiental. Estudos palinológicos indicaram ambiente continental com condições quentes e áridas, e, corroborando essa hipótese, juntaram-se as informações de clumped isotope, que indicaram um sistema lacustre com precipitação dos carbonatos microbiais em áreas semiconfinadas ou isoladas. Além disso, a sequência evaporítica depositada sobre estes carbonatos indica um ambiente árido de alta evaporação.

(convênio técnico-científico entre o ETH Zurique e a Petrobras). Agradecemos o apoio da Swiss National Science Foundation Grant nº 200020127327. Agradecemos também à professora Adina Payton, da Universidade da Califórnia, Santa Cruz, e ao professor John Eiler de Caltech (EUA), pelos resultados de isótopos de Sr e *clumped*, respectivamente. Pelas correções e contribuições na versão final, agradecemos aos revisores: doutor Ricardo Jahnert e doutor Gerson Terra.

agradecimentos

Agradecemos a valorosa contribuição dos pesquisadores da Gerência de Bioestratigrafia – Cenpes, em especial Elisabete Pedrão e João Villar de Queiroz Neto, pelas análises de palinologia e ostracodes. Este estudo é parte do Projeto Pethros

referências bibliográficas

ARAI, M.; MACHADO COELHO, P. S. Statistical analysis of palynological assemblages from the Aptian-Albian of the Araripe Basin, northeast Brazil: a case study of paleo-environmental significance

of Early Cretaceous terrestrial palynomorphs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MESOZOIC TERRESTRIAL ECOSYSTEMS, 7., 1999, Buenos Aires. **Resumos...** Buenos Aires: Associação Paleontológica Argentina, 2001. p. 25-28. (Publicación Especial, 7).

BAHNIUK, A. M. **Coupling organic and inorganic methods to study growth and diagenesis of modern microbial carbonates, Rio de Janeiro State, Brazil:** implications for interpreting ancient microbialite facies development. 2013. 169f. Thesis (PhD)- Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zurich, Zurich, 2013.

BAHNIUK, A. M.; ANJOS, S.; FRANÇA, A. B.; MATSUDA, N.; EILER, J.; MCKENZIE, J. A.; VASCONCELOS, C. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (northeast Brazil): implications for interpretation of microbialite facies associations and paleo-environmental conditions. **Sedimentology**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 155-181, Jan. 2015.

BONTOGNALI, T. R. R.; MARTINEZ-RUIZ, F.; MCKENZIE, J. A.; BAHNIUK, A. M.; ANJOS, S.; VASCONCELOS, C. Smectite synthesis at low temperature and neutral pH in the presence of succinic acid. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 101, p. 553-557, Nov. 2014a.

BONTOGNALI, T. R. R., MCKENZIE, J. A., WARTH-MANN, R. J.; VASCONCELOS, C. Microbially influenced formation of Mg-calcite and Ca-dolomite in the presence of exopolymeric substances produced by sulfate-reducing bacteria. **Terra Nova**, Oxford, v. 26, n.1, p. 72-77, Feb. 2014b.

CAMPBELL, D.F.; ALMEIDA, L. A.; SILVA, S.O. **Relatório preliminar sobre a geologia da Bacia do Maranhão.** Rio de Janeiro: Conselho Nacional do Petróleo, 1949. 160p. (Boletim do Conselho Nacional do Petróleo, 1)

DONG, H.L. Clay-microbe interactions and implications for environmental mitigation. **Elements**, Alberta, v.8, n. 2, p. 113-118, Apr. 2012.

DUPRAZ, C.; VISSCHER, P. T.; BAUMGARTNER, L. K.; REID, R. P. Microbe–mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). **Sedimentology**, Oxford, v. 51, n. 4, p. 745-765, Aug. 2004.

EILER, J. M. “Clumped-isotope” geochemistry: the study of naturally – occurring, multiply-substituted isotopologues. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 262, n. 3-4, p. 309-327, Oct. 2007.

EILER, J. M.; SCHAUBLE, E. 18O13C16O in Earth’s atmosphere. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 68, n. 23, p. 4767-4777, Dec. 2004.

GONÇALVES, D.F.; ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; MENDES, A.C. Argilominerais da Formação Codó (Aptiano Superior), Bacia de Grajaú, nordeste do Brasil. **Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis**, La Plata, v. 13, n. 1, p. 59-75, jan./jul.2006.

KONHAUSER, K. **Introduction to geomicrobiology.** Malden: Wiley-Blackwell, 2007. 425p.

LIMA, M. R. Considerações palinológicas a respeito de correlação estratigráfica entre formações cretáceas do Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO LATINOAMERICANO DE PALEONTOLOGIA, 5., 1978, Buenos Aires. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 1978. p. 227-233.

LIMA, M. R. Palinologia da Formação Codó na região de Codó, Maranhão. **Boletim do Instituto de Geociências da USP**, São Paulo, v. 13, p. 116-128, dez. 1982.

LISBOA, M. A. R. The Permian geology of Northern Brazil. **American Journal of Science**, New Haven, v. 37, n. 221, p. 425-442, May 1914.

MAIZATTO, J. R.; QUEIROZ NETO, J. V.; FERREIRA, E. P.; BAHNIUK, A. M. Palinomorfos e ostracodes não marinhos de afloramentos da Formação Codó, Bacia do Parnaíba. In: CARVALHO, I. S.; SRIVASTAVA, N. K.; STROHSCHOEN, O.; LANA, C. C. (Ed.). **Paleontologia: cenários de vida.** Rio de Janeiro: Interciência, 2011. v. 3, p. 367-378.

MENDES, M. S.; BORGHI, L. Análise faciológica da Formação Codó (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em testemunhos de sondagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM ÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador. **Resumos...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005. p. 1-6.

- OOSTING, A. M. **Paleo-environmental and climatic changes in Australia during the early Cretaceous**. 2004. 206 f. Thesis (PhD)-Utrecht University, Utrecht, 2004.
- PAZ, J.D.S. **Análise faciológica da Formação Codó (Aptiano Superior) na região de Codó (MA), Leste da Bacia do Grajaú**. 2000. 146 f. Dissertação (Mestrado)–Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2000.
- PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Reconstrução paleo-ambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 77-100. (Coleção Friedrich Katzer).
- PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Linking lacustrine cycles with syn-sedimentary tectonic episodes: an example from the Codó Formation (Late Aptian), Northeastern. **Geological Magazine**, London, v. 142, n. 3, p. 269-285, May. 2005.
- PEDRÃO, E.; LIMA, H.P.; MAKINO, R.K.; BARRILARI, I.M.R. Palinoestratigrafia e evolução ambiental da seção cretácea das bacias de Bragança-Viseu e São Luís (margem equatorial brasileira). **Acta Geologica Leopoldensia**, São Leopoldo, v. 25, n. 54, p. 21-39, 2002.
- PREISS, W. V. The systematics of South Australian Precambrian and Cambrian stromatolites. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, Adelaide, v. 96, p. 67-100, 1972.
- RAMOS, M. I. F.; ROSSETTI, D. F.; PAZ, J. D. S. Caracterização e significado paleoambiental da fauna de ostracodes da Formação Codó (Neoaptiano), leste da Bacia de Grajaú, MA, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p.339-348, Dec. 2006.
- ROSSETTI, D. F.; PAZ, J. D. S.; GOES, A. M. Facies analysis of the Codó Formation (Late Aptian) in the Grajaú area, Southern São Luís-Grajaú Basin. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 76, n. 4, p. 791-806, Dec. 2004.
- TERRA, J. S. G.; SPADINI, A. R.; FRANÇA, A. B.; SOMBRA, C.L.; ZAMBONATO, E. E.; JUSCHAKS, L. C. S.; ARIENTI, L. M.; ERTHAL, M. M.; BLAUTH, M.; FRANCO, M. P.; MATSUDA, N. S.; SILVA, N. G. C.; MORETTI, P. A.; DAVILLA, R. S. F.; SCHIFFER, R.; TONIETTO, S.; ANJOS, S. M. C.; CAMPINHO, V.; WINTER, W. R. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 9-29, jan. 2010.
- VAKHRAMEYEV, V.A. Classopollispollen as an indicator of Jurassic and Cretaceous climate. **International Geology Review**, Lawrence, v. 24, n. 10, p. 1190-1196, 1981.
- VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A. M.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 253-263, out. 2007.

expanded abstract

The Codó Formation, located in the Parnaíba Basin, Northeast Brazil, contains a unique up-to 20-m-thick stratigraphic sequence comprising well-preserved carbonate microbialites deposited in a closed Upper Aptian lacustrine basin during the initial break-up phase of the South American and African continents. The depositional system of microbialites is associated with a shallow, low energy, subaqueous and hypersaline environment, occasionally exposed to meteoric and/or capillary conditions.

The main objective of this study of the Codó Formation is to interpret the paleo-environmental conditions and bio-geochemical processes related to microbialite carbonate facies evolution during the initial break up and separation of South America from Africa during the Early Cretaceous period. Different approaches were applied to define the microbialite facies and the microbial influence on carbonate precipitation, as well as the subsequent diagenesis. These included classical methods, such as description of sedimentary facies both from outcrops and drill cores and petrographic description of thin sections, combined with geochemical studies, light stable isotope and “clumped” isotope analyses.

Carbonate rock samples were collected from outcrops and drill cores of the Codó Formation along the southern border of the Parnaíba Basin during October 2009 and August 2010. Several road outcrops and quarries were described and samples were obtained from outcrops located in the Codó, Grajaú and Imperatriz regions. The São Benedito Quarry near the city of Codó is considered a “typical section” of the microbialite sequence in the Codó Formation. Based on macroscopic and microscopic analyses, four microbialite facies were defined for the Codó Formation, i.e., stromatolite, laminae, massive and spherulite, which can be related to changes in paleo-depth of the lacustrine environment. The microbial features found in these facies are described and compared with different microbialite classifications compiled from literature. The unique microbialite sequence found in the Codó Formation offers the possibility of evaluating the paleo-environmental conditions in a well-controlled stratigraphic context.

The “clumped” isotope measurements of the microbialite facies samples from outcrops yield paleo-temperatures with an average value estimated to be 35°C (min. 27°C; max. 51°C) and those from the drill core samples to be 51°C (min. 45°C; max. 54°C). This temperature range is relatively warm for Earth-surface temperatures but is still in a range often found in equatorial to subtropical hypersaline environments. It is conceivable that hydrothermal fluids may have influenced the temperature of the formation waters. This possibility cannot be excluded based on the current data set. However, because most of the outcrop samples record paleo-temperatures below 40°C, it is assumed that any hydrothermal influence would have been either localized or minimal. The $\delta^{18}\text{O}$ values of the bulk carbonate (-6.8 to -1.5 ‰ VPDB) imply precipitation from water with calculated $\delta^{18}\text{O}$ values between -1.6 and 1.8 ‰ VSMOW, possibly reflecting precipitation from variable modified meteoric waters, whereas the $\delta^{13}\text{C}$ values of the bulk carbonate (-15.5 to -7.2 ‰ VPDB) indicate a significant input of carbon derived from aerobic or anaerobic respiration of organic matter, suggesting precipitation in a semi-enclosed or isolated water body.

The application of three model concepts, that is, the lamina formation, microbial dolomite, and spherulite formation models, provides information to help interpret the possible mechanisms involved in the development of the four different microbialite facies. Combined, our data allow us to interpret the evolution of the Codó Formation as occurring in a closed lacustrine paleo-environment with alternating episodes of contracting and expanding lake levels, which has led to the development of specific microbialite facies associations. Microbialite structures are well preserved in the Codó Formation, northeastern Brazil, recording a special episode where microorganisms and organic content played an important role in the sedimentation of carbonates during the Aptian time. The present research combines classical sedimentological/geochemical studies with a geomicrobiological approach to explain microbialite formation in space and time. Our evaluation confirms previous studies that the Codó Formation was deposited under warm and arid paleo-climatic conditions with high evaporation.

autores



Anelize Manuela Bahniuk Rumbelsperger
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Departamento de Geologia

anelize.bahniuk@ufpr.br

Anelize Manuela Bahniuk Rumbelsperger é professora de Mineralogia e Geoquímica da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Graduada em Geologia pela UFPR (2004), com mestrado em Geologia Exploratória pela mesma universidade em 2007 e doutorado em Ciências Naturais pelo Swiss Federal Institute of Technology em Zurique, Suíça, em 2013.



Sylvia Maria Couto dos Anjos
LIBRA/EXPCT/GEO
Avaliação Exploratória, Desenvolvimento da
Produção e Gestão dos Investimentos de Libra
Exploração e Competências Técnicas
Geologia

sanjos@petrobras.com.br

Sylvia Maria Couto dos Anjos graduou-se em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1978. Iniciou sua carreira profissional na Petrobras em 1979 como geóloga. Em 1984, concluiu o mestrado na University of Illinois e em 1987 obteve o PhD na mesma universidade. Em 2000, concluiu o MBA na Fundação Getulio Vargas (FGV). Em 1999, iniciou sua carreira gerencial como chefe da Gerência de Geologia para Exploração. Em 2001, foi gerente da Tecnologia de Rochas. Entre 2003 e 2005, foi gerente da Bioestratigrafia do Cenpes. Em 2005, atuou como gerente da modelagem de sistema petrolífero da Exploração. Em 2006, se tornou gerente geral da Geologia da Exploração. Desde setembro de 2016, é gerente geral adjunto da Applied Technology e gerente de Geologia do Joint Project Team de Libra. Desde 2009, atua na Associação Brasileira de Geólogos de Petróleo (ABGP) como vice-presidente e presidente. Desde 2015, é vice-presidente da seção América Latina e Caribe da American Association of Petroleum Geologist (AAPG).



Almério Barros França
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Departamento de Geologia

almeriofranca@gmail.com

Almério Barros França é professor visitante no Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Bacharel em Geologia na Universidade de Brasília em 1974 e doutorado na Universidade de Cincinnati (EUA) em 1987. Trabalhou na Petrobras entre 1975 e 1980, no IPT-São Paulo (Paulipetro) entre 1980 e 1984, e retornou à Petrobras em 1987, onde se aposentou como gerente do Laboratório de Rochas no Cenpes/Gesep, em 2012.



Nilo Siguehiko Matsuda

EXP/Geop/AES

Exploração

Geologia e Petrofísica

Avaliação Estratigráfica e
Sedimentológica

nilo@petrobras.com.br

Nilo Siguehiko Matsuda graduou-se em Engenharia Geológica pela Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop) em 1984. Com suporte financeiro da Petrobras, obteve o mestrado em Análises de Bacias Sedimentares, também na Ufop, em 1988, com o tema “Marco radioativo da Formação Jandaíra, Bacia do Potiguar”, resultado que gerou a descoberta do fosfato campaniano. Atuou na Petrobras de 1988 a 1999 nas áreas de Geologia de Superfície na Bacia do Potiguar, Interpretação e Laboratório no Distrito de Belém (PA). De 1999 a 2003, cursou o doutorado no Japão, na University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Science, com o tema “Ciclicidade na sedimentação carbonática e origem dos dolomitos do Pensilvaniano da Bacia do Amazonas”. Desde 2003, está lotado no Rio de Janeiro, onde exerce atividades no E&P/EXP com foco no entendimento da gênese, fácies, sistema deposicional e geração da permoporosidade nos carbonatos do Aptiano do Pré-Sal.



Crisogono Vasconcelos

Swiss Federal Institute of Technology

cris.vasconcelos@erdw.ethz.ch

Crisogono Vasconcelos é pesquisador sênior no Swiss Federal Institute of Technology em Zurique, Suíça. Graduado em Geologia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com mestrado em Geoquímica pela Universidade Federal Fluminense em 1987 e doutorado em Ciências Naturais pelo Swiss Federal Institute of Technology em Zurique, Suíça, em 1994.



Judith Ann McKenzie

Swiss Federal Institute of Technology

judy.mckenzie@erfw.ethz.ch

Judith Ann McKenzie é professora emérita do Swiss Federal Institute of Technology em Zurique, Suíça. Graduada na MacMurray College Jacksonville IL-USA. Mestrado na Universidade de Colorado Boulder (EUA) e doutorado pelo Swiss Federal Institute of Technology em Zurique, Suíça, em 1976.