

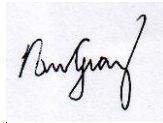
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**SEDIMENTOLOGIA, PETROGRAFIA E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DOS  
MICROBIALITOS QUATERNÁRIOS DA LAGOA SALGADA (RJ)**

Caio dos Santos Pereira

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

“De Acordo”:



Co-orientador: Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2013 / 11)

SÃO PAULO

2013

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus e a seu Filho Jesus Cristo, sem os quais eu nada poderia fazer e por tudo que tenho sou grato.

Segundo, ao meu orientador e amigo Paulo César Fonseca Giannini, sempre presente e conselheiro, e que nos momentos mais difíceis sempre me apoiou; e ao meu co-orientador Thomas Rich Fairchild, que com todo seu conhecimento paleontológico deu forças para que este trabalho pudesse continuar e ser concluído.

Terceiro, à minha namorada Iara de Oliveira Mendes, por seu amor incondicional e apoio em todos os momentos, e à minha família, que sempre estarão ao meu lado me ajudando e consolando nas tribulações e provações da vida.

E por último a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e término desta Monografia.

## Sumário

1. Identificação.....	4
2. Resumo.....	4
3. <i>Abstract</i> .....	5
4. Introdução .....	5
5. Metas e Objetivos.....	7
6. Fundamentação bibliográfica.....	8
6.1. Geologia regional.....	8
6.2. Dinâmica climática.....	10
6.3. Hidroquímica da Lagoa Salgada.....	11
6.4. Origem e sedimentação da Lagoa Salgada.....	11
6.5. Estromatólitos.....	13
7. Materiais e Métodos.....	14
8. Apresentação e discussão dos resultados.....	20
8.1. Breve caracterização da área por sensoriamento remoto.....	20
8.2. Resultados de campo.....	21
8.3. Petrografia.....	30
8.4. Isótopos estáveis.....	34
9. Conclusões.....	38
Referências Bibliográficas.....	41

## Anexos

Anexo I: Tabela de Bioclastos da trincheira LS-6.....	46
Anexo II: Tabela de Isótopos Estáveis de C e O.....	50

## 1. Identificação

Universidade de São Paulo, TF-13/11. *Sedimentologia, Petrografia e Isótopos Estáveis dos Microbialitos Quaternários da Lagoa Salgada (RJ)*. Caio dos Santos Pereira, Paulo César Fonseca Giannini (orientador) e Thomas Rich Fairchild (co-orientador) / Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental (GSA), São Paulo, Novembro de 2013.

## 2. Resumo

A Lagoa Salgada localiza-se entre dois feixes de cordões litorâneos (*beach and dune ridges*) holocênicos da planície costeira associada ao delta do rio Paraíba do Sul. Formou-se no contexto de mudança local de orientação da linha de costa, em interrupção ao processo regressivo.

O início da sedimentação lagunar é marcada por um pavimento de conchas de *Anomalocardia brasiliiana* encontrado na borda oeste da lagoa e datadas em trabalhos prévios em cerca de 3200 anos AP. Sobre este pavimento, ocorre sucessão decimétrica de microbialitos carbonáticos consolidados, que passam de laminitos planos na base, para formas laminares crenuladas e finalmente dômicas, no topo. Eles são recobertos em contato discordante por sedimentos clásticos mistos inconsolidados. Representam a crescente colonização das margens por cianobactérias, em empilhamento de fácies transgressivo.

A análise de seções delgadas mostrou aporte misto, terrígeno (quartzo e feldspato) e intraclástico (bivalves, ostracodes e gastrópodes e pelotilhas). Duas associações de microfácies foram identificadas: as dominadas por deposição clástica (calciarenitos e calcirruditos bioclásticos impuros) e as com predomínio de sedimentação bioinduzida (micritos biolitíticos, incluindo trombólitos e estromatólitos). Estas associações intercalam-se na estratigrafia, com tendência de aumento, para cima, das fácies bioinduzidas.

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  variam de 1,91 a 18,40 ‰, e os de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ , de -1,11 a 1,62 ‰. A baixa co-variância entre  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , associada a amplitude de variação de  $\delta^{18}\text{O}$  pequena (2,5 permil), pode ser atribuída tanto a lagos fechados hiper-salinos quanto a lagos abertos. Na hipótese de lago fechado, os resultados isotópicos indicam redução de temperatura e de salinidade das águas e aumento da influência das cianobactérias, ao longo da sucessão analisada. Já na hipótese de sistema aberto, os resultados permitem interpretar aumento da influência das águas oceânicas na laguna.

### 3. Abstract

The Salgada Lagoon is located between two beams of ridges (beach and dune ridges) Holocene coastal plain linked to the delta of the river Paraíba do Sul that was formed in the context of changing local orientation of the coastline in the interruption regressive process.

The onset of lagoon sedimentation is marked by a pavement of *Anomalocardia brasiliiana* shells found on the western edge of the pond and dated in previous works in about 3200 years BP. On this floor, there is a succession of decimeter microbialites consolidated carbonate, which pass from the base laminites plans for laminar forms domal and finally crenulated, at the top. They are covered in discordant contact by mixed unconsolidated clastic sediments. Represent the increasing colonization of margins by cyanobacteria in transgressive facies stacking.

The analysis of thin sections showed inflow mixed terrigenous (quartz and feldspar) and intraclastic (bivalves, gastropods and ostracods *pellets*). Two microfacies associations were identified: those dominated by clastic deposition (calcisandstones and calcirudstones impure bioclastic) and predominantly bioinduced sedimentation (biolithic micrites including thrombolites and stromatolites). These associations interspersed in stratigraphy, with an upward trend, upward bioinduced facies.

$\delta^{13}\text{C}$  PDB values ranging from 1.91 to 18.40 ‰, and  $\delta^{18}\text{O}$  PDB of from -1.11 to 1.62 ‰. The low covariance between  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ , associated with variations of  $\delta^{18}\text{O}$  small (2.5 permil), can be attributed to both the closed hyper-saline lakes as open ponds. In case of closed lake, the isotopic results indicate a reduction in temperature and salinity of the water and increasing influence of cyanobacteria along the sequence analyzed. Already in the case of an open system, the results allow us to interpret the increasing influence of ocean waters in the lagoon.

### 4. Introdução

A Lagoa Salgada (Figura 1) é um corpo de água hipersalino (Srivastava, 2002) com 1,9 km de largura, 8,6 km de comprimento e 16 km<sup>2</sup> de área, localizado no litoral próximo ao Cabo de São Tomé, entre os municípios de Campos dos Goytacazes e São João da Barra, região norte do Estado do Rio de Janeiro (coordenadas 21° 54' 10" S e 41° 00' 30" W). Integra o "Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul" (Dias, 1981), onde ocorre em meio à planície arenosa formada por cordões litorâneos holocênicos, ao sul da foz atual. Possui conexão apenas ocasional com o oceano através do rio Açú, um canal de escoamento de maré intermitente. Abriga ocorrências

de microbialitos com idade holocênica, na forma de estromatólitos colunares, dômicos e laminares, bem como de trombólitos e oncoides (Lemos, 1995; Rodrigues *et al.*, 1981).



Figura 1: Localização da área de estudo, no município de São João da Barra, estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Investigações ficológicas prévias na água superficial e em esteiras microbianas “fósseis” ou ainda em formação na Lagoa Salgada demonstram a ocorrência de clorofíceas, crisofíceas e de 19 espécies de cianofíceas (Srivastava, 2002). A idade máxima de estromatólitos fósseis encontrados nesta laguna, estimada com base em datações das conchas do bivalve *Anomalocardia brasiliensis* em sedimentos presentes em camadas subjacentes, é de  $3.780 \pm 170$  anos A.P..

Os microbialitos ocorrem, aflorantes ou em profundidade decimétrica, em toda a extensão das bordas da lagoa (Silva e Silva, 1999; Silva e Silva *et al.*, 1999), nas zonas inter e supamarés atuais, sobrepostos a areias costeiras ou lagunares. Apresentam estruturas colunares discretas (hemisferoides) centimétricas na base, que se unem lateralmente em lâminas irregulares, passando no topo a formas dômicas decimétricas. A camada mais superficial destes domos é cimentada por calcita, calcita magnesiana e dolomita (Silva e Silva *et al.*, 2008).

Estromatólitos são estruturas biossedimentares formadas através de atividades microbianas (grupo de procariotas - archaeas, cianobactérias e fungos) nos ambientes aquáticos e são considerados como as mais antigas evidências macroscópicas da vida

na Terra, sendo encontrados em todos os continentes, principalmente em rochas pré-cambrianas (Tewari & Sedback, 2011). São predominantemente de águas marinhas, mas podem ser encontrados também em outros ambientes aquáticos.

Microbialito é termo sugerido por Burne & Moore (1987) para indicar todos os depósitos carbonáticos produzidos por associações microbianas bentônicas. Bióstroma é uma acumulação acamadada ou laminada de organismos *in situ*. Bioerma é um acúmulo de organismos em grande parte *in situ*, que produz um recife em domo. Oncólitos ou oncoides são grãos revestidos (*coated grains*) de origem microbiana, com laminação interna concêntrica. Não crescem fixados ao fundo aquático, mas flutuando ou arrastando-se no substrato. Trombólitos têm todas as características de estromatólitos, exceto a laminação interna bem definida (Srivastava, 2010).

A compreensão do significado geológico e paleontológico dos estromatólitos antigos passa pelo estudo detalhado das poucas ocorrências de depósitos análogos em crescimento ainda hoje, como as da Austrália (Shark Bay, Pink ou Spencer Lake), Bahamas, Golfo Pérsico, Israel (Solar Lake), EUA (Salt Lake, Green Lake, Yellowstone National Park, Flórida), Leste Africano (Casanova, 1991), Golfo do México e China (Ilha de Hai-Nan). No Brasil, destacam-se as ocorrências da Região dos Lagos, no litoral do Estado do Rio de Janeiro, entre as quais se incluem as da Lagoa Salgada, que são o objeto de estudo deste Trabalho de Formatura.

Inúmeros estudos são feitos atualmente por todo o mundo buscando compreender os processos presentes na formação de microbialitos: em Manito Lake (Canadá), tem-se estudado a formação de dolomita primária e secundária durante o Holoceno (Last *et al.*, 2012); no Lago Afourgagh (Marrocos), Détriché *et al.* (2013) descrevem os controles ambientais na sedimentação carbonática bioinduzida, na forma de microestromatólitos e esferólitos; e, em laboratório, Pedley (2013) tem demonstrado através de experimentos mesoscópicos de água doce, a morfologia e a função dos biofilmes que precipitam calcita trombolítica; propôs assim um modelo de ampla aplicação, supostamente válido inclusive para lagos cársticos.

## **5. Metas e objetivos**

O presente projeto de Trabalho de Formatura teve como principal meta contextualizar e discutir o significado paleoambiental da ocorrência de microbialitos na história evolutiva holocênica da região da Lagoa Salgada (RJ), a partir de uma abordagem essencialmente sedimentológica, petrográfica e geoquímico-isotópica.

Para tanto, estudou-se a estratigrafia dos depósitos sedimentares desta lagoa, com destaque para análise de fácies em superfície e subsuperfície (trincheiras de até 1 m de profundidade) e para confecção e descrição de seções delgadas de microbialitos, confrontadas com resultados de análise de isótopos estáveis de Carbono e Oxigênio.

## **6. Fundamentação bibliográfica**

### **6.1. Geologia regional**

Na compartimentação da fisiografia costeira do Brasil, a zona a norte do Arco de Cabo Frio adjacente à Bacia de Campos tem aparente continuidade até a costa oriental do Rio Grande do Norte (Silveira 1964, Giannini 2007). Suas características mais marcantes são: a orientação preferencial NE a NNW, a raridade de praias de bolso, a cobertura quase ininterrupta do embasamento pré-cenozóico pelos sedimentos da Formação Barreiras, a relativa monotonia da plataforma continental, sempre íngreme e estreita (predominantemente menor que 50 km) e a pouca expressão estrutural ou continuidade lateral aparente dos paleoaltos entre bacias marginais, o que dificulta o reconhecimento de compartimentos fisiográfico-estruturais menores (Giannini, 2007).

O mergulho regional para E da superfície que aplaina o topo da Formação Barreiras (Superfície Sul-Americana, de King, 1956) e a ausência de sistemas lagunares ativos com papel de armadilhas de sedimentos terrígenos, comparáveis ao da Região Sul, possibilitam a chegada de grandes rios à costa, dos quais o Paraíba do Sul é o exemplo mais meridional. A relação da distribuição geográfica destes rios com os elementos tectônico-estruturais evidentes nas bacias marginais e na plataforma, incluindo numerosos cânions submarinos (França, 1979), é uma possibilidade ainda por melhor investigar (Giannini, 2007). Por exemplo, a desembocadura do rio Paraíba do Sul (RJ) e a grande saliência ou cúspide a ela associada na margem de plataforma (Cabo de São Tomé) ocorrem, conforme Carvalho & Francisconi (1981), adjacentes a um dos depocentros semi-isolados da Bacia de Campos.

Em vista desta possível relação da posição do rio Paraíba do Sul com heranças da Bacia de Campos, Dias (1981) insere o que ele chama de “Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul” na parte terrestre desta bacia marginal. A pequena porção emersa da bacia (cerca de 500 km<sup>2</sup>) limita-se a W por um sistema de falhas SW-NE, que põe seus depósitos sedimentares em contato com o embasamento cristalino (Raja Gabaglia e Milani, 1990).



No contexto geomorfológico do Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul, a Lagoa Salgada insere-se na província das Planícies Quaternárias (Martin *et al.*, 1993), formada por cordões litorâneos com orientação variável entre NE e NW, intercalados com brejos e alagados flúvio-lagunares. Esta província estende-se dos arredores de Cabiúnas e Macaé, a S, até Guaxindiba, a N. Apresenta topo plano, com inclinação suave para o mar. A altitude máxima de aproximadamente 12 m, alcançada por terraços de construção costeiros junto às paleoescarpas da Formação Barreiras, corresponderia ao níveis do mar alto de cerca de 120 mil anos AP, no Pleistoceno superior (Martin *et al.*, 1993; Figura 2). Enquanto isso, terraços de construção costeiros com cotas inferiores a 5m seriam predominantemente formados após a máxima inundação marinha do Holoceno médio.

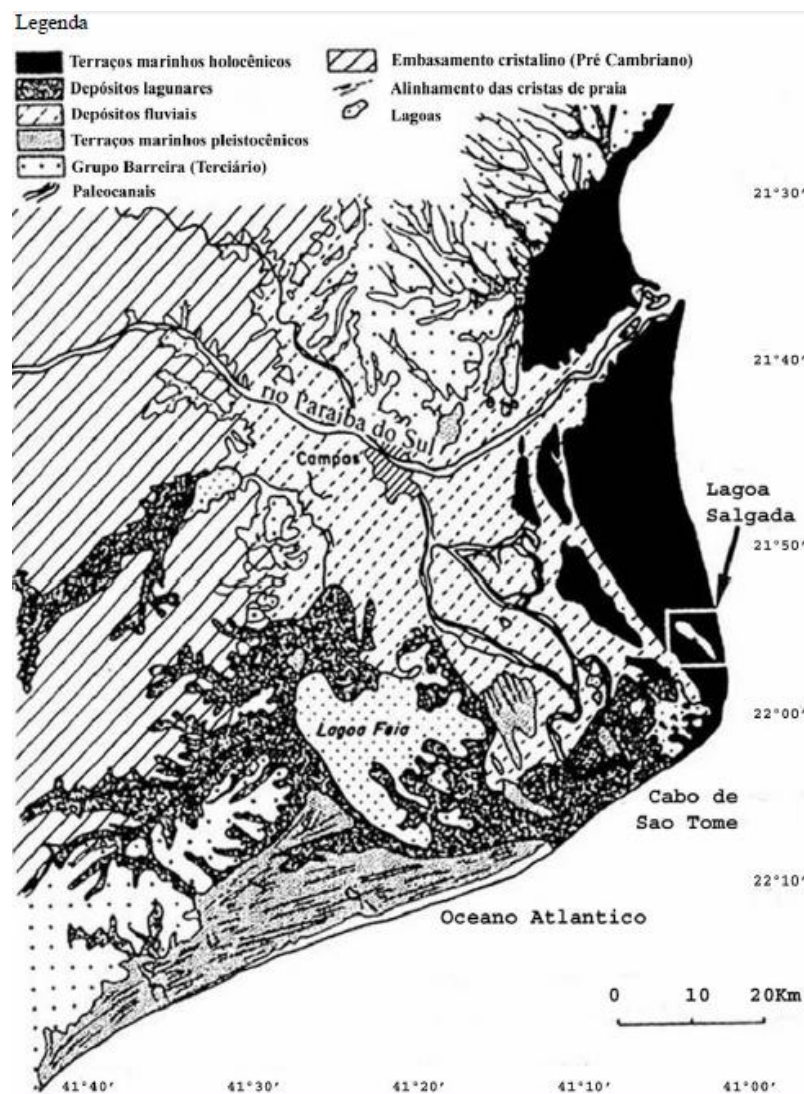


Figura 2. Mapa geológico da região do delta do rio Paraíba do Sul, RJ, com ênfase aos depósitos sedimentares cenozoicos. Este delta teria evoluído de uma fase intralagunar para a atual fase de mar aberto ou domínio por ondas). Notar os paleocanais do rio Paraíba do Sul e a distribuição, a eles associada, dos depósitos estuarino-lagunares. Notar também o contexto de ocorrência da Lagoa Salgada, em meio a terraços de construção marinhos holocênicos. Modificado de Martin *et al.* (1993) por Iespa (2008).

A intensa ocupação, facilitada pela regularidade topográfica, tem implicado alterações das características morfológicas da planície quaternária na região. Por exemplo, um grande sistema de canais de drenagem artificial rebaixou o lençol freático e contribuiu para acelerar o processo de recuo de lagos e lagoas (Lemos, 1995), favorecido pela tendência de declínio de nível relativo do mar na escala dos últimos 5 a 6 mil anos (Angulo *et al.*, 2006). Além disso, diques marginais artificiais foram construídos ao longo do rio Paraíba do Sul, para impedir ou inibir o seu transbordamento, antes frequente, sobre grande parte da porção holocênica da planície (Lemos, 1995).

## **6.2. Dinâmica climática**

O Sistema de Monções da América do Sul (SMAS) leva umidade do Atlântico equatorial para a região amazônica, rumo SW, até defletir-se na cadeia andina, onde passa a dirigir-se para SE. A faixa de nebulosidade assim defletida define a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), especialmente ativa no verão, a qual intercepta a costa do Brasil na Região Sudeste. A posição da ZCAS coincide grosso modo com a separação entre a costa influenciada pelo Anticiclone Polar, associado a frentes frias, a sul, e a costa dominada pelo Anticiclone do Atlântico Sul, a norte, este mais ligado a tempo bom.

A SMAS intensifica-se no inverno boreal e verão austral, quando reforça a ZCAS. Analogamente, em escala de tempo milenar, a SMAS intensifica-se também durante eventos climáticos de resfriamento do hemisfério norte e aquecimento do sul (por exemplo, eventos Heinrich, no Pleistoceno, e eventos Bond, no Holoceno), o que submete a Região Sudeste, em geral, e o Rio de Janeiro, em particular, a condições mais úmidas (Cruz *et al.* 2009).

Dentro deste contexto climático geral, a região que vai de Cabo Frio aos lagos do Rio de Janeiro, representa caso específico. Por efeito da mudança abrupta de orientação da costa em Cabo Frio e da forte atuação dos ventos de NE no verão, capazes de retirar as águas superficiais costeiras aquecidas rumo costa fora, esta é a mais importante área de ressurgência no país, o que acarreta microclima semi-árido, com balanço precipitação/evaporação negativo, pelo menos durante parte do ano (Barbière 1984). Segundo Martin *et al.* (1997), a pluviosidade, que é de 1400 mm/ano em Maricá, menos de 100 km a W de Cabo Frio, não passa de 700 mm/ano em Arraial do Cabo.

Esta inserção da Lagoa Salgada em área hoje caracterizada por microclima semiárido reflete-se na presença de vegetação típica de caatinga. Favorece também, por um lado, a ação deposicional do vento na formação dos campos de dunas eólicas de Cabo Frio e Massambaba, e, por outro lado, o *superavit* sazonal de evaporação sobre precipitação em lagunas, como Araruama, e corpos lacustres a elas associados, como a Lagoa Vermelha, ou delas derivados, como a própria Lagoa Salgada. Este desbalanço entre evaporação e precipitação, por sua vez, cria condições para a formação de microbialitos, haja visto que as cianobactérias indutoras da precipitação carbonática ocorrem hoje preferencialmente em costas de condições extremas e estressantes. Assim, paleodunas e estromatólitos fósseis devem ser analisados em conjunto na discussão da evolução paleoclimática quaternária desta região.

A Lagoa Salgada situa-se sob a isoterma de 22° C. Os ventos que dominam são os de quadrante NE, embora sejam também frequentes ventos de SW (Silva e Silva, 2002).

### **6.3. Hidroquímica da Lagoa Salgada**

Quando cheia, a Lagoa Salgada alcança 1 m de coluna de água. A temperatura da água varia de 27° até 32° C entre março e abril e o pH oscila de 8,0 até 9,7 em direção à porção central da lagoa (Lemos, 1996). O rio Açu, que faz sua conexão com o mar, apresenta salinidade de 42,3 ‰ e pH de 8,2. Parâmetros físico-químicos obtidos por Silva e Silva (2002) no mês de abril fornecem os seguintes valores: condutividade elétrica de 52.000 a 86.200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; alcalinidade de 7,0 m Eq/l, salinidade de 64,7 ‰; temperatura da água de 26,91° C;  $\text{CO}_2$  (total): 233,6 mg/l;  $\text{O}_2$  (dissolvido): 3,2 a 3,6 mg/l;  $\text{SO}_4$ : 733,3 ppm; Cl: 13.720,2 ppm; Ca: 71,8 ppm; Fe: 0,5 ppm; K: 543 ppm; Na: 8,846 ppm; Mg: 664 ppm; Mn: traço;  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ : 1,3 mg/l; P (total dissolvido): 143,0  $\mu\text{g}/\text{l}$ . A água é classificada como clara, com visibilidade de 0,63 cm.

### **6.4. Origem e sedimentação da Lagoa Salgada**

A Lagoa Salgada apresenta evolução geológica vinculada às oscilações do nível relativo do mar durante o Holoceno (Martin *et al.* 1997) e à formação da configuração atual do complexo deltaico do rio Paraíba do Sul (Figura 2). Lamego (1946, 1955) foi um dos primeiros autores a sugerir um modelo evolutivo para a região

do complexo deltaico. Nesse modelo, já considerava que seus processos formadores deram origem a várias lagunas, entre elas a Lagoa Salgada.

O delta é constituído por cordões litorâneos com forma de cúspide (Dias & Gorini, 1980), o que é uma característica comum aos chamados deltas dominados por ondas. A Lagoa Salgada ocorre em meio a esta planície arenosa de cordões, o que a levou a ser classificada como “lagoa de planície de restinga” por Soffiati (1998). Sua idade oscila em torno de 2.000 anos A.P., estimada por Srivastava (2002) com base em datações de sedimentos subjacentes associados. Do ponto de vista sedimentológico, uma das suas principais características é a presença de estruturas biogênicas, relacionadas ao desenvolvimento e crescimento de comunidades microbianas bentônicas (Srivastava, 1997).

As investigações dos sedimentos da lagoa realizadas a partir de testemunhos de sondagens (Rodrigues *et al.*, 1981; Lemos, 1995) revelaram que os sedimentos basais da lagoa são areias marinhas, de granulação média a grossa, cor cinza escuro esverdeado, com abundantes foraminíferos. Sobreposto a este pacote arenoso são encontrados estromatólitos carbonáticos, o que indicaria a transição do ambiente marinho para o misto, lagunar, sob a influência de condições hipersalinas (Dias 1981). Finalizando a coluna, encontram-se sedimentos lagunares a lacustres, representados por argilas cinza, ricas em matéria orgânica, intercalados com esteiras microbianas ligeiramente carbonáticas, restos vegetais, gastrópodos, diatomáceas, bivalves, crustáceos e bioclastos de vertebrados.

Martin *et al.* (1984, 1993, 1997) propuseram, com base em datações  $^{14}\text{C}$  de conchas coletadas nos sedimentos por eles interpretados como basais da Lagoa Salgada, uma idade em torno de 3850 anos A.P. para a formação da laguna inicial. Esta idade corresponderia, na interpretação dos autores, a uma subida do nível do mar entre 3900 e 3000 anos A.P.. Deve-se considerar, no entanto, que, sendo clásticas, e portanto retrabalhadas, as conchas indicam apenas a idade máxima do depósito. Além disso, trabalhos posteriores (Angulo & Lessa, 1997; Angulo *et al.*, 2006) demonstraram não haver sustentação para a subida de nível do mar admitida por aqueles autores no intervalo de tempo indicado.

Lacerda *et al.* (1984) realizaram estudos físico-químicos e biológicos da coluna de água da Lagoa Salgada, determinando as concentrações de diversos íons e nutrientes. Os resultados obtidos apontaram alta concentração de clorofila em comparação com outros ecossistemas brasileiros, o que seria indicativo, segundo os autores, de elevada taxa de produção primária.

Lemos (1995), em estudo sobre as fácies deposicionais e as estruturas estromatolíticas da lagoa Salgada, constatou que os estromatólitos só ocorrem na borda da lagoa e variam localmente em espessura, desde crostas milimétricas laminadas, até cabeças decimétricas bem formadas. Atribuiu a variação das estruturas internas, entre a base e o topo das cabeças estromatolíticas, a mudanças nas condições ambientais.

Silva & Silva (1999) e Silva & Silva *et al.* (1999) identificaram 19 espécies de cianofíceas (cianobactérias) em amostras de água da lagoa, de esteiras microbianas e de estromatólitos ligeiramente litificados. As espécies pertencem às famílias Chroococcaceae, Dermocarpaceae, Hydrococcaceae, Mycrocystaceae, Oscillatoriaceae, Entophysalidaceae, Pleurocapsaceae, Rivulariaceae e Xenococcaceae. São, em maior parte, idênticas às da zona supramaré da região de Cabo Frio. Entre as espécies de cianofíceas identificadas, encontraram *Phormidium komarovii*, *P. hypolimneticum*, *P. tenue*, *Oscillatoria terebriformis*, *Lyngbya aestuarii*, *Calotrix confervicola*, *C. crustacea*, *Chroococcus turgidus*, *Aphanocapsa litoralis*, *Aphanothece saxicola* e *A. halophyica*. Mesmos autores evidenciaram também a presença de clorofíceas e crisofíceas, tanto na água como em esteiras microbianas.

### 6.5. Estromatólitos e outras estruturas biogênicas

De acordo com Srivastava (2002), os estromatólitos encontrados nas bordas da lagoa são geralmente recobertos por solo ou vegetação ou submersos na época de cheia, formando pequenas bioermas ou bióstromas de espessura variadas, mas raramente superior a 1m. Segundo mesmo autor, existem os seguintes tipos de estruturas biogênicas na Lagoa Salgada: (a) esteiras microbianas, (b) estromatólitos colunares; (c) oncoídes; e (d) trombólitos. Elas podem ser caracterizadas como segue.

**(a) Esteiras microbianas:** sucessões gelatinosas compostas por alternância entre lâminas delgadas (0,5 mm a 1,0 mm em espessura) planas a crenuladas cinza escuro, ricas em matéria orgânica, e cinza claro, mais carbonáticas. São ocasionalmente cobertas ou intercaladas com gastrópodos e ostracodes milimétricos, e podem conter palinórmfos. Elas são expostas na borda da lagoa, onde ocorrem de duas formas: com superfície lisa, quando cobertas por fina lâmina de água; ou com polígonos de gretação e superfície carbonática esbranquiçada, quando emersas.

**(b) Estromatólitos colunares:** bioermas e bióstromas litificados, dômicos a subesféricos (10 a 20 cm em diâmetro), com apresenta colunas discretas que se unem

lateralmente em lâminas irregulares. Em planta, os bioermas são ovais a elipsoidais. A superfície externa dos bioermas estromatolíticos é muito cimentada e o seu interior friável, com alta porosidade, e ocasionalmente preenchido por bioclastos de bivalves e gastrópodos e material terrígeno, além de ser cortado por tubos de vermes. Os estromatólitos colunares são constituídos de aragonita, calcita magnesiana e calcita e são geralmente subcilíndricos, coalescendo no topo. Alguns possuem terminação cônica na superfície. A laminação interna, ondulada em hemisferoides menores que 2cm , varia de pouco a moderadamente convexa, com presença de microdiscordâncias.

**(c) Oncóides:** pequenas estruturas microbianas (2 a 5 cm de diâmetro) com laminações concêntricas, ainda em fase de crescimento. São encontradas na borda oriental da lagoa. A forma varia de esfeóide a elipsoide e são indicadores de águas ligeiramente mais profundas (submarés) e agitadas.

**(d) Trombólitos:** estruturas microbianas semelhantes, em suas feições externas, aos estromatólitos colunares e colunares-laminares, formando pequenos bioermas dômicos, Porém com laminação interna difusa, pouco nítida, devido às atividades parasíticas de pequenos gastrópodos, vermes, ostracodes e outros organismos. Esta bioturbação destrói as estruturas internas, deixando como resultado uma textura grumelosa.

## **7. Materiais e métodos**

A etapa inicial do cronograma previsto foi o levantamento bibliográfico sobre as ocorrências de estromatólitos quaternários no Brasil e no mundo, com ênfase às do Estado do Rio de Janeiro, e sobre a evolução quaternária do complexo lagunar norte fluminense.

A compilação bibliográfica foi feita a partir da consulta de bancos de teses, livros-texto e periódicos recentes de geologia costeira, sedimentologia e ciências do Quaternário. Dentre os temas compilados, a gênese e classificação de depósitos carbonáticos microbianos, com ênfase em estromatólitos, as variações climáticas no Holoceno (intensificações da SMAS, eventos Bond, El Niño etc) e a gênese da Lagoa Salgada, e de seus depósitos carbonáticos, foram três dos assuntos prioritários, paralelamente aos de âmbito regional. Esta etapa foi importante para que o quadro de questões por responder, esboçado no item introdutório do projeto, fosse ampliado e detalhado, de modo a estabelecer estratégias e prioridades de abordagem.

O trabalho de sensoriamento remoto visou situar a Lagoa Salgada em relação ao sistema de cordões do delta do rio Paraíba do Sul. Para esta finalidade, o exame de imagens de satélite disponíveis no programa *Google Earth* mostrou-se suficiente. Antes da etapa de campo, realizada previamente ao início do Trabalho de Formatura, o aluno consultou também mapas geológicos e folhas topográficas para ter uma noção prévia do contexto geomorfológico e do acesso à região. Para a localização em campo, selecionaram-se a Carta Topográfica “Muçurepê – SF-24-V-C-V-4”, na escala de 1:50.000 (IBGE, 1970), e o mapa georreferenciado da própria lagoa, extraído do sítio eletrônico do INEA (Instituto Estadual do Ambiente).

A visita à Lagoa Salgada, com duração de dois dias, destinou-se a análise de fácies sedimentares e caracterização estratigráfica, mais coleta das amostras previstas. Ela inseriu-se no âmbito de uma campanha de campo mais abrangente, com enfoque regional, sobre o Quaternário costeiro aflorante entre Saquarema, a S, e Campos dos Goytacazes, a N.

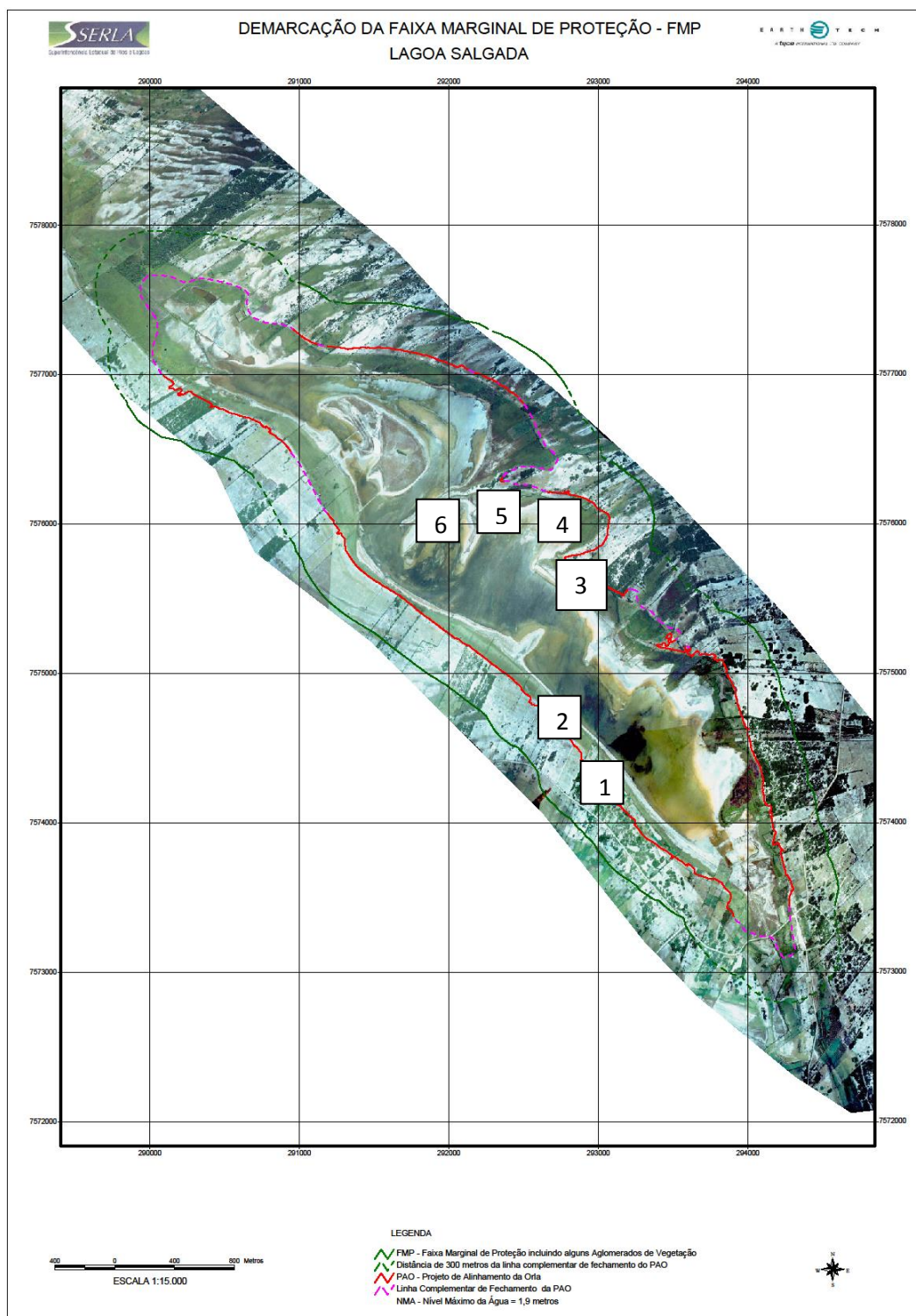
A viagem à região estendeu-se de 15 a 22 de dezembro de 2012. Os dias 15 e 16 foram reservados à campanha de campo na Lagoa Salgada. E os dias 17 a 21, à etapa de campo nas paleodunas da barreira de Massambaba. Especificamente na visita à Lagoa Salgada do dia 15, contou-se também com a participação de dois docentes pesquisadores do Laboratório Nacional de Engenharia de Petróleo (LNEP) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), os doutores Severiano Ribeiro e Roseane Missagia.

O acesso à Lagoa Salgada fez-se pela rodovia BR-101 (Rio de Janeiro - Campos – 280 km) e depois pela rodovia RJ-216 (Campos - Farol de São Tomé – 50 km), percorrendo-se em seguida cerca de 20 km da estrada de terra secundária que passa pelos povoados de Santa Rosa e Quixabá, em direção a Barra de Açu.

A estratégia de campo consistiu em avaliar a distribuição horizontal e vertical de fácies deposicionais. Para o exame da distribuição horizontal, em planta, foram levantados perfis, transversais às margens da Lagoa Salgada, desde o topo da zona submersa até a vegetação pioneira. Fácies morfológicas ou de superfície foram estabelecidas ao longo destes perfis, com base sobretudo na granulação e constituição do sedimento e nas estruturas sedimentares sindeposicionais (formas de leito, linhas de deixa, bioconstruções) e penecontemporâneas (bioturbações, gretas etc). Em seguida, para a verificação do empilhamento vertical de fácies, abriram-se trincheiras de até 1,5m de comprimento por 1,0m de profundidade, junto à parte mais interna do perfil horizontal.

Nestas trincheiras, as fácies deposicionais foram distintas utilizando-se critérios como cor, estrutura, textura, mineralogia, grau de bioturbação e assembleia paleontológica (faunística). Estudaram-se, desse modo, seis locais nas margens oeste e leste da lagoa, LS.1 a LS.6 (Figura 3). As fácies superficiais, ao longo de cada perfil, foram designadas por números (por exemplo, para o ponto LS.1, fácies 1.1, 1.2 etc), enquanto as fácies reconhecidas em seção vertical (trincheira) foram designadas por letras (por exemplo, 1a, 1b, 1c etc), Este procedimento visou facilitar a relação entre os processos deposicionais, observados em operação nos perfis superficiais, e seus respectivos produtos, descritos nas sucessões verticais de fácies das trincheiras.





Nos perfis superficiais, onde os sedimentos geralmente mostraram-se inconsolidados, coletaram-se amostras sobretudo para ensaios sedimentológicos texturais. Já nas seções verticais, coletaram-se, sempre que possível, amostras tridimensionais, indeformadas e orientadas, destinadas à confecção da lâmina

petrográfica. Estas amostras foram cortadas *in loco*, em tijolos cúbicos com dimensão aproximada de 5 cm, com ajuda de faca e espátula. Coletou-se assim um total de 24 amostras, nas margens da lagoa, destinadas à petrografia, todas com controle faciológico e estratigráfico. As amostras foram coletadas com uso de martelo e espátula de pedreiro, sendo posteriormente condicionadas e embaladas em sacos plásticos devidamente identificados.

Deste conjunto de amostras, apenas as carbonáticas consolidadas (microbialitos) foram submetidas a análises laboratoriais neste Trabalho de Formatura. Estas análises contemplaram: captação de amostras digitais de amostras de mão, à lupa; impregnação de amostras com resina colorida; encaminhamento para laminação e análise petrográfica de seções delgadas; e coleta de amostras, com broca, para análise de isótopos estáveis de Carbono e Oxigênio.

Quatro alíquotas da amostra de microbialito (LS-1a, LS-1b, LS-1c e LS-1d, de baixo para cima) foram impregnadas a vácuo com resina epóxi tingida de azul, antes de serem encaminhadas para a seção de laminação do IGc-USP. Estas alíquotas compõem um perfil vertical de cerca de 10 cm de espessura, logo acima do horizonte basal de bioclastos de *Anomalocardia brasiliiana*.

O objetivo da impregnação foi permitir a diferenciação entre os poros preexistentes e os artificiais, induzidos durante o processo de corte e laminação. Foram feitas duas seções delgadas por alíquota, uma com e outra sem lamínula. A primeira destinou-se à descrição e captação de imagens digitais; e a segunda, ao tingimento com alizarina, utilizado para a diferenciação entre calcita/aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{Ca/Mg}(\text{CO}_3)_2$ ).

A finalidade do estudo petrográfico foi caracterizar a trama, a textura e a porosidade nas diferentes fácies e microfácies do carbonato bioinduzido, atentando-se ainda para aspectos como microfósseis, impurezas terrígenas e feições diagenéticas, incluindo cimentação. Fotomicrografias digitais das feições individuais consideradas relevantes foram gravadas em arquivos digitais no sistema *Leica Q-Win*. As classificações de calcários utilizadas foram as de Folk (1962) e Dunham (1962).

Já a análise isotópica teve como método a extração de pó a partir da pulverização com broca milimétrica (*microdrill*). Fora retiradas 12 subamostras (alíquotas), a partir da amostra de campo do microbialito consolidado referente ao ponto LS-1 (Figura 4), com inter espaçamento de 2 cm, de modo a compor um perfil vertical. A determinação dos isótopos foi feita nos equipamento de Espectômetro de

Massa de fonte gasosa: GEO 20-20, da Europa, e Delta E, Finnigan. Os códigos das alíquotas são LS-A a LS-L, da base para o topo.



Figura 4: Amostra referente ao ponto LS-1, a qual foi posteriormente serrada ao meio e submetida à extração, com broca, de 12 amostras, destinadas à análise de isótopos estáveis de Carbono e Oxigênio.

A etapa derradeira do projeto constou do tratamento integrado dos diferentes resultados obtidos, da discussão destes resultados frente à bibliografia disponível e da elaboração da Monografia (Quadro 1).

**Quadro 1** – Cronograma do projeto de pesquisa de Trabalho de Formatura

Atividade programada ou realizada	Meses de 2013*									
	00	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Revisão bibliográfica	X	X	X	X			X	X	X	X
Trabalho de campo	X									
Caracterização faciológica	X	X	X							
Confecção de seções delgadas		X	X	X						
Petrografia				X	X	X	X			
Elaboração de Relatório de Progresso					X	X				
DRX						X	X	X		
Datação, MEV e análise isotópica							X	X	X	
Tratamento de resultados analíticos								X	X	
Elaboração da Monografia								X	X	X

\* Mês 00 refere-se a atividades realizadas previamente ao início da disciplina Trabalho de Formatura.

Atividades em vermelho são as planejadas, mas não realizadas.

## **8. Apresentação e discussão dos resultados**

### **8.1. Breve caracterização da área por sensoriamento remoto**

Com 6 km de comprimento, sub-paralelo à linha de costa, e pouco mais de 1 km de largura máxima, a Lagoa Salgada encontra-se entre dois feixes do sistema de cordões litorâneos do delta do rio Paraíba do Sul, com orientações ligeiramente distintas entre si. O feixe ao interior da lagoa é formado por cordões com direção NW (N310 a N320), levemente côncavos para o mar, enquanto que o feixe a E é dominado por alinhamentos NNW (N320 a N330), convexos para o mar (Figura 5).

Este contraste de orientação de cordões litorâneos permite interpretar origens distintas para os dois feixes, possivelmente ligadas a uma inversão no rumo de deriva litorânea longitudinal. O feixe interno corresponderia à paleopraia que deve ter existido entre duas desembocaduras do delta do Paraíba do Sul: a ativa até hoje, a N, e a atualmente inativa, que ajudou a configurar a cúspide arenosa do cabo de São Tomé, a S. A deriva litorânea resultantente seria talvez para SE. Já o feixe de cordões externo formou-se após a desativação da desembocadura sul, quando a deriva litorânea longitudinal para NW deve, portanto, ter-se intensificado, devido ao desaparecimento do efeito de bloqueio hidráulico que era exercido por esta desembocadura e seu delta de vazante.

Conclui-se assim que a Lagoa Salgada é um lago residual de corpo lagunar formado ao interior de um antigo esporão arenoso, que cresceu para NNW logo após a desativação da desembocadura sul do delta. A hiper-salinidade das águas do lago, descrita por Dias (1981), Silva & Silva (2002) e Srivastava (2002), deve-se a conexão eventual com o mar, nas fases de abertura do canal do Açú e à influência da cunha salina subterrânea, associados ao superávit evaporação/precipitação.

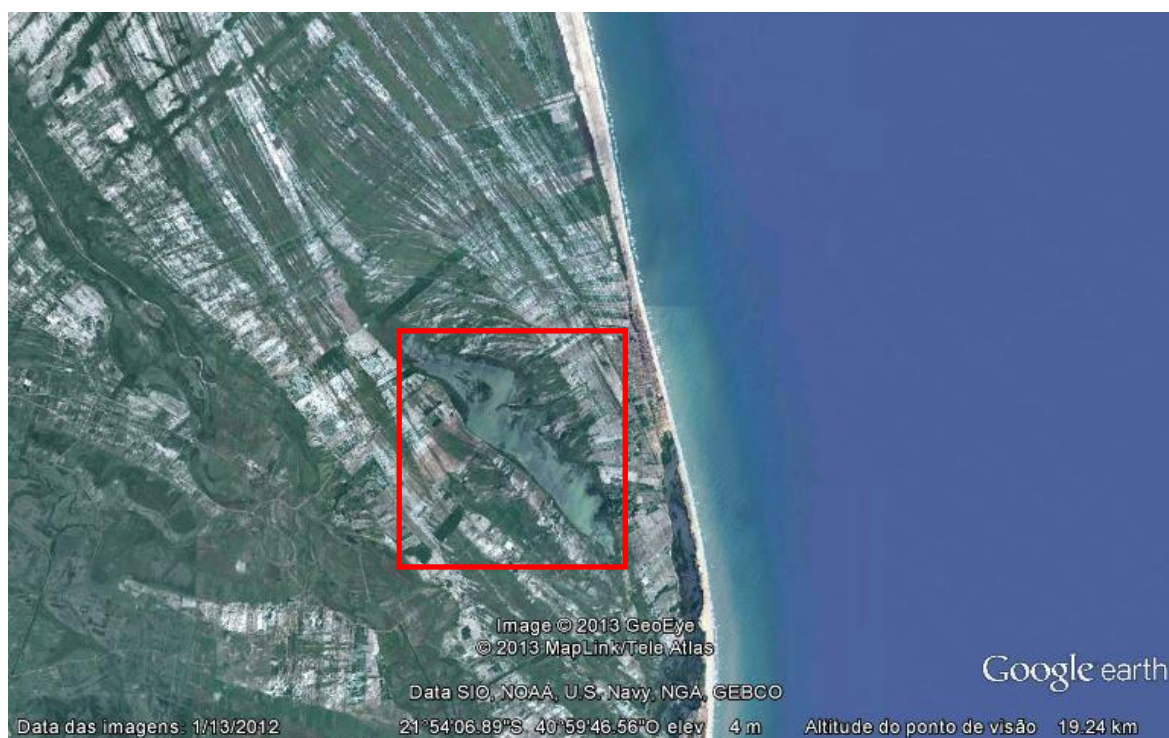


Figura 5. Imagem de satélite *Geo Eye* da Lagoa Salgada (destacada em vermelho), extraída do programa *Google Earth*. Notar que a lagoa situa-se entre dois feixes de cordões, o mais externo dos quais tem padrão de crescimento para NNW. Notar também a presença de canal de escoamento de maré (Açu), a SE do lago.

## 8.2. Resultados de Campo

Foram estudados seis pontos nas margens da Lagoa Salgada, LS-1 a LS-6, que se encontram descritos a seguir.

### Ponto LS-1: UTM (24 K): 292913 E x 7574489 N

O ponto LS-1 situa-se na margem interna (oeste) da lagoa, exposta diretamente aos ventos dominantes, *onshore*, e às ondas por eles geradas. Embora o vento de maior *fetch* (pista de atuação) seja o paralelo ao alongamento da lagoa, com direção NW, o vento mais ativo, inclusive durante a visita de campo, é o para SW (N210°-230°), responsável por formar pequenas ondas na margem oeste da Lagoa Salgada, bem como as várias linhas de deixa observadas na praia. Neste ponto, coletou-se amostra de estromatólito, previamente extraída do substrato (menos de 0,5m de profundidade) por um morador local para a construção do muro que delimita sua propriedade.



Trata-se de estromatólito laminar a colunar, supostamente referente às fácies LLH, LLH-SH e SH no sentido de Logan *et al.* (1964). Ele ocorre aparentemente sob lama carbonática preta, que efervesce intensamente com HCl 10% frio, com gretas de dessecação (Figura 6).

Na linha de água, algas (variedades de cianobactérias) crescem e induzem a precipitação de carbonato, por aprisionamento de partículas em virtude do EPS (polímero extracelular). Mais ao interior, junto à vegetação, encontram-se algas recentemente mortas, incrustadas por  $\text{CaCO}_3$ , provavelmente depositadas por ondas com energia acima da média. Formam assim uma espécie de linha de deixa de tempestade.



Figura 6. À esquerda, placa do INEA sobre as evidências de vida primitiva na Lagoa Salgada. À direita, zoneamento faciológico presente no perfil em planta.

A amostra de estromatólito coletada inclui, na base, uma lâmina (<2cm) de arenito coquinoide, rico em conchas desarticuladas e às vezes fragmentadas de *A.brasiliiana*, passando acima a laminito (<3cm) com túbulos carbonáticos incrustados (serpulídeos), estromatólitos laminares, com hemisferoides de menos de 5 cm (espessura total de aproximadamente 12 cm), e, finalmente, no topo (15 cm superiores), hemisferoides decimétricos (“cabeças”).

## Ponto LS-2

O ponto LS-2 também se situa na margem interna (oeste) da Lagoa Salgada, exposta diretamente à ação de ondas gerada pelos ventos dominantes (*onshore*). Neste ponto, a amostragem foi feita tanto em perfil horizontal (em planta), como em seção vertical.

### **Perfil LS-2: UTM (24 K): 292783 E x 7574613 N**

No perfil em planta, com extensão total de 5,6m, desde a vegetação pioneira até a linha de água da laguna, reconheceram-se nos 5 cm superficiais as seis fácies descritas a seguir:

- Fácies 2.1: placas e/ou moldes de algas dessecadas e encurvadas, por vezes concrecionadas, e com superfície esbranquiçada, atribuída a possível concentração de sais, inclusive carbonato.
- Fácies 2.2: areia de granulação média a fina, cor cinza escuro a preta, rica em bioclastos de cracas e gastrópodes, com destaque, entre estes últimos, para carapaças milimétricas inteiras de *Heliobia sp.*
- Fácies 2.3: polígonos de gretação de lama centimétricos a decimétricos, com três a seis lados, ligeiramente arqueados para cima, com bioclastos (carapaças inteiras de *Heliobia sp.*) no preenchimento das gretas.
- Fácies 2.4: lama micrítica bege coberta por filme milimétrico de restos de algas (verdes e fibrosas) e com vestígios de deixa de espuma.
- Fácies 2.5: lama arenosa preta com odor sulfídrico.
- Fácies 2.6: algas verdes e filamentosas, na zona de espuma atual.

As seis fácies reconhecidas intercalam-se e/ou recobrem-se por linhas de deixa bioclásticas, formadas inclusive por areia grossa a grânulos de *Heliobia sp.* As várias linhas de deixa podem ser atribuídas ao espraiamento de ondas com energia acima da média.

Cortes verticais nos sedimentos do perfil mostram empilhamento grosso modo regressivo, com recobrimento da fácies 2.2 pela 2.1, da 2.3 pela 2.2, e assim sucessivamente. A sucessão vertical tem no máximo 30 cm, profundidade a partir da qual se encontra o estromatólito endurecido, supostamente fóssil, descrito no ponto LS-1.

### Seção vertical LS-2: UTM (24 K): 292779 E x 7574600 N

Nas paredes de vala artificial de cerca de 0,6m de profundidade e a 10m da margem do lago (ponto LS 2.6), reconheceram-se quatro fácies, descritas a seguir de baixo para cima (Figura 7).

- Fácies 2a (de 30 a 60 cm de profundidade): areia média a grossa, em parte bioclástica, com grânulos e seixos de conchas inteiras e quebradas, cor cinza-esverdeado a azulado.
- Fácies 2b (de 30 a 23 cm): areia muito grossa a grânulo, bioclástica, com seixos de bivalves, cor bege.
- Fácies 2c (de 23 a 13 cm): areia fina a grossa, bioclástica, cor cinza escuro, com concreções carbonáticas sub-horizontais de cor cinza.
- Fácies 2d (de 13 ao 0 cm): horizonte de solo O (“orgânico”), turfoso, húmico, de cor preta, com textura porosa e fibrosa, conferida pela presença de raízes de gramíneas.

Foram coletadas, nesta sucessão, duas amostras de cada fácies, sendo uma, desagregada, para estudos texturais e/ou composicionais, e outra, indeformada e orientada, para petrografia.



Figura 7. Parede de vala com exposição da seção vertical LS-2. À esquerda, sucessão completa, da fácies 2a (base) a 2d (topo). À direita, fácies 2a, com bioclastos do bivalve *Anomalocardia brasiliiana*.

### Ponto LS-3

O ponto LS-3 situa-se na margem externa, oriental, da Lagoa Salgada (Figura 8), com ventos *onshore* voltados para o interior do corpo de água (rumo de NNE para SSW, N190°-N200°, no momento da coleta).



### Perfil LS-3: UTM 292766 E x 7576056 N

No perfil em planta, com extensão total de 5,0 m, desde a vegetação pioneira até a linha de água da lagoa, reconheceram-se quatro fácies (Figuras 8 e 9):

- Fácies 3.1: polígonos de gretação de micrita arqueados em padrão côncavo para cima, localmente com crosta esbranquiçada de espessura milimétrica (possível concentração de carbonato e/ou sais).
- Fácies 3.2: linha de deixa rica em carapaças inteiras de *Heliobia sp*, as quais diminuem de concentração rumo à laguna.
- Fácies 3.3: lama micrítica com textura vesicular, aparentemente correspondente a linha de deixa de espuma, sinuosa em planta, com raras carapaças de *Heliobia sp*.
- Fácies 3.4: lama carbonática (micrita) de superfície grumosa ou verrugosa, possivelmente correlata aos oncoides descritos por Srivastava (2002).



Figura 8. Vista geral da lagoa a partir da margem externa (esquerda), com destaque para as gretas de dessecação (direita).

### Seção Vertical LS-3

Em trincheira de 30 cm de profundidade, aberta junto à vegetação pioneira, encontrou-se em LS-3 a seguinte sucessão de fácies, da base para o topo (Figura 9):

- Fácies 3a (30 a 22 cm de profundidade): lama carbonática rica (mais de 30% em volume) em bioclastos (carapaças inteiras de *Heliobia sp*), cor cinza esverdeado.
- Fácies 3b (22 a 15 cm): lama carbonática semelhante à anterior, exceto pela menor concentração em volume (< 30%) de *Heliobia sp*.

- Fácies 3c (15 a 0 cm): lama carbonática cinza escuro a preto, com menos de 30% de carapaças de *Heliobia sp* e com bioturbação crescente, para o topo, dominada por tubículos subverticais de morada de serpulídeos.



Figura 9. Trincheiras cavadas no ponto LS-3: perfil transversal à laguna, à esquerda, e seção vertical, à direita.

#### **Ponto LS-4: UTM: 292699 E x 7576041 N**

Na raiz de um pontal sedimentar, transversal à margem barlavento do lago (supostamente formado segundo o modelo de circulação lagunar de Zenkovitch 1967), expõem-se em superfície polígonos de gretação endurecidos, recobertos por película branca milimétrica (talvez salina) e hemisferoides subcentimétricos. Coletou-se amostra indeformada e orientada de um polígono (amostra 4.1).

#### **Ponto LS-5: UTM (24 K): 292669 E x 7575983 N**

O ponto LS-5 representa a continuidade, lagoa adentro, do pontal cuja raiz foi amostrada em LS-4. Este pontal (Figura 10) apresenta-se na forma de cordão arenoso curvilíneo, com azimuth variável entre N150° e N190°, e com porção mais interna coberta por gramíneas. Nas margens, marcas onduladas formam-se devido à ação de fluxo oscilatório gerado pelo vento local na lâmina de água rasa. Este fluxo retrabalha e seleciona os sedimentos micríticos e principalmente bioclásticos (*Anomalocardia brasiliensis* e *Heliobia sp*).



Figura 10. Pontal arenoso curvilíneo (“pontal de Zenkovitch”) que compartimenta a lagoa, coberto por gramíneas em sua porção interna (detalhe, à direita).

Notou-se na margem a formação de nódulos de micrita, de cor preta esverdeada, ainda moles. Estes nódulos corresponderiam talvez a oncoides (estruturas SS ou *sferoidal stromatholites*, de Logan *et al.* 1964), compatíveis com águas relativamente agitadas de inframaré, tendo-se em vista a influência das ondas locais no retrabalhamento dos sedimentos.

### Perfil LS-5

No perfil horizontal transversal ao pontal, foram descritas três fácies (5.1, 5.2 e 5.3), da porção submersa para a porção exposta (Figura 8), com coleta de amostras para análise textural e petrográfica em laboratório.

- Fácies 5.1: concreções centimétricas de material micrítico (oncoides SS), parte delas com algas incrustadas.
- Fácies 5.2: lama com superfície verrugosa e gastrópodes dispersos.
- Fácies 5.3: lama micrítica com bioclastos, dominados por carapaças inteiras de *Heliobia sp.*

### Seção vertical LS-5

A seção LS-5 foi descrita em trincheira aberta na parte mais alta e seca do pontal. Reconheceram-se duas fácies, a e b da base para o topo, em sucessão aparentemente regressiva (Figura 11).

- Fácies 5a: lama arenosa cinza escuro esverdeado.

- Fácies 5b: lama esverdeada a preta, rico em carapaças inteiras de gastrópodes (*Helioobia sp*) e bioturbada por serpulídeos.



Figura 11. Perfil transversal do cordão arenoso à esquerda, com a variação faciológica da lâmina de água para o cordão. À direita, seção vertical escavada na barra arenosa.

#### **Ponto LS-6: UTM (24 K): 292421 E x 7576035 N**

O ponto LS-6 dista cerca de 500m, para NW, de LS-5. Em meio aos pavimentos gretados da faixa supramarés, na margem leste da lagoa, cocorutos decimétricos de rocha carbonática ocorrem dispersos, inter espaçados de cerca de 5m. Eles são encontrados a até poucos metros da vegetação pioneira de gramíneas. Trata-se de bioermas de tubos calcificados de serpulídeos, revestidos por possível crosta estromatolítica de espessura centimétrica. Outra provável lâmina estromatolítica ocorre abaixo do bioerma.

Os túbulos de serpulídeos (Figura 12) apresentam disposição sub-horizontal, em trama radial a partir de centro das bioconstruções.

#### **Seção Vertical LS-6**

Em trincheira de 20 cm de profundidade, a sucessão sedimentar encontrada em LS-6 (tabela de bioclastos no anexo I) é composta por cinco fácies, assim descritas da base para o topo (Figura 13).

- Fácies 6a (abaixo de 17 cm de profundidade): areia fina a média, aparentemente terrígena, com grânulos e pequenos seixos bioclásticos (fragmentos de gastrópodes e principalmente bivalves), de cor cinza escuro, mosqueada. Valvas e carapaças inteiras ocorrem dispersas.



- Fácies 6b (de 17 a 13 cm): cascalho arenoso bioclástico bege.
- Fácies 6c (de 13 a 10cm): crosta carbonática, possivelmente estromatolítica.
- Fácies 6d (de 10 a 6 cm): bioconstrução de serpulídeos, ancorada nas fácies b e c.
- Fácies 6e (acima de 6cm de profundidade): areia média a grossa bege, bioclástica, com grânulos e pequenos seixos também bioclásticos, em sua maioria conchas quebradas de moluscos.

Nesta seção, foram coletadas duas amostras de cada fácies, uma indeformada, para petrografia, e outra desagregada, para análise granulométrica.



Figura 12. Bloco bioconstruído por serpulídeos (fácies 6d), observado de baixo para cima (esquerda), incrustado em conchas de bivalves (fácies 6b). No topo (direita), a bioconstrução de serpulídeos apresenta cobertura por possível estromatólito, de cor branca.



Figura 13. À esquerda, detalhe para concha de bivalve encontrada na base da sucessão (fácies 6a). À direita, trincheira, com as fácies 6a a 6d, em que foram coletados os bioclastos presentes na tabela do anexo I.

### 8.3. Petrografia

As quatro seções delgadas de estromatólito do ponto LS-1 acima do *lag* de bioclastos de *Anomalocardia brasiliiana* (Figuras 14 a 22) foram divididas em sete microfácies, numeradas em ordem crescente de acordo com sua primeira aparição da base para o topo.

- Microfácies 1: calcirrudito bioclástico ou *rudstone* (coquina), formado predominantemente por valvas inteiras, articuladas, fechadas e não fragmentadas do bivalve *Anomalocardia brasiliiana* (Figura 14). Esta microfácies caracteriza-se por porosidade primária elevada (maior que 30%), inter e intragranular.

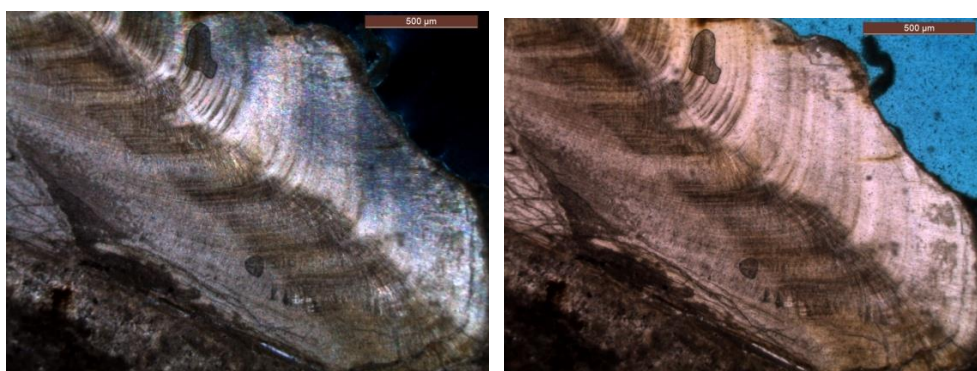


Figura 14. Valva de *Anomalocardia brasiliiana* da microfácies 1, a nicóis cruzados, à esquerda, e paralelos, à direita. Notar os anéis concêntricos de crescimento da carapaça carbonática e a microporosidade intragranular entre estes anéis.

- Microfácies 2: calciarenito bioclástico ou *grainstone* impuro, dominado por carapaças inteiras do gastrópode *Heliobia sp.*, na granulometria areia média a muito grossa, parcialmente preenchidos por areia muito fina a areia fina terrígena, quartzosa, e por pelotilhas micríticas (*pellets*) e raros intralitoloclastos (Figuras 15 e 16). As carapaças são de calcita magnesiana e a porosidade primária, inter e intragranular, é alta, em torno de 60%.

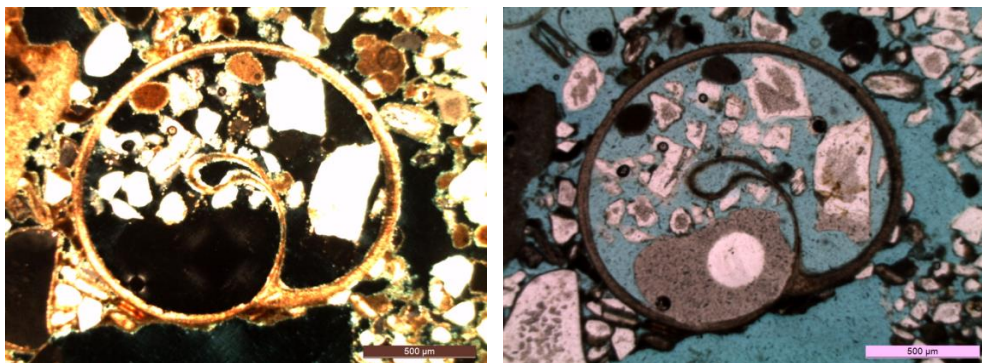


Figura 15. Calciarenito bioclástico impuro da microfácies 2, a nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita), com gastrópode do gênero *Heliobia* sp., em corte basal. Notar a alta porosidade primária (~60%) inter e intragranular, em azul, o preenchimento por material terrígeno essencialmente quartzoso e a presença de pelotilhas (clastos micríticos maciços) e intraliticlasto (grão composto no canto superior direito).

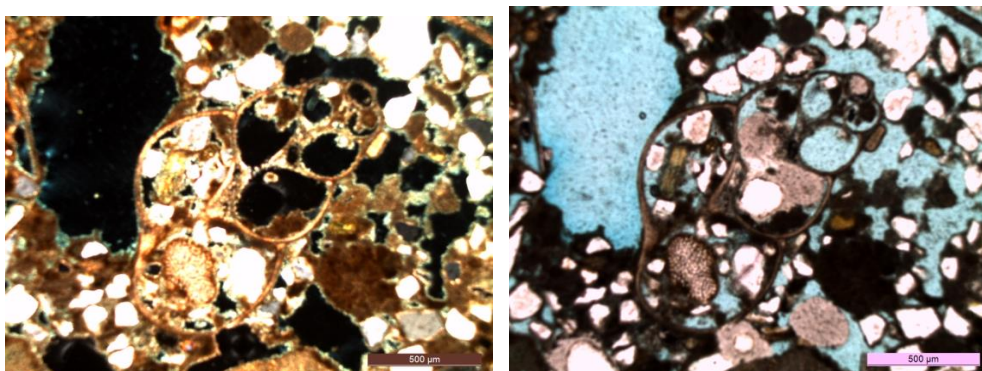


Figura 16. Calciarenito bioclástico impuro da microfácies 2, a nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita), com gastrópode do gênero *Heliobia* sp., em corte longitudinal. Notar a presença de pelotilhas.

- Microfácies 3: calciarenito bioclástico ou *grainstone* impuro, dominado por carapaças de composição calcítica, tanto de *Heliobia* sp. quanto de ostracodes (Figura 17). A impureza terrígena é essencialmente quartzosa. A disposição espacial da matriz de micrita, concentrada no topo da lâmina e impregnando parte dos enrolamentos dos gastrópodes, é sugestiva de origem por infiltração mecânica a partir da microfácies posicionada estratigraficamente acima.



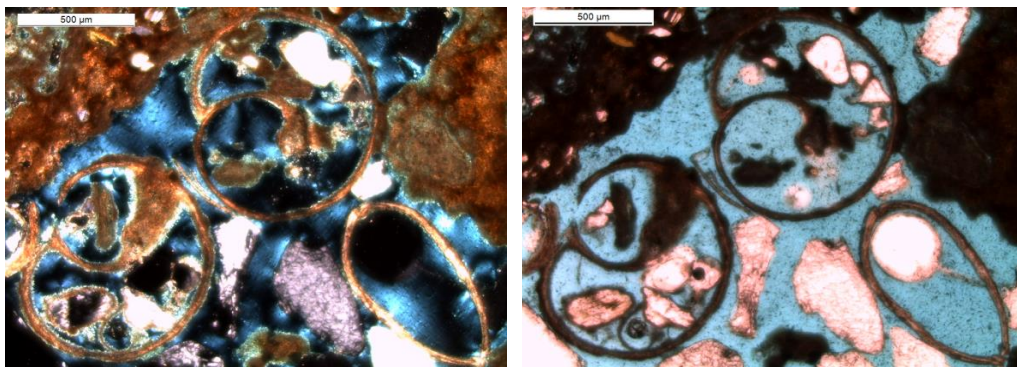


Figura 17. Microfósseis de gastrópode e ostracode em calcarenito impuro da microfácies 3 (nicóis cruzados à esquerda e paralelos à direita). Notar a porosidade elevada, em azul, e a presença de areia fina a muito fina terrígena, inclusive como preenchimento intragranular. Notar ainda a aparente impregnação das carapaças de gastrópode por lama micrítica, provalmente infiltrada da microfácies imediatamente acima, visível no topo das fotomicrografias (4).

- Microfácies 4: micrito biolítico ou *bindstone*, que marca a primeira ocorrência de microbialitos ao longo da sucessão. Ocorrem tanto laminações plano-paralelas a ligeiramente onduladas, típicas de estromatólitos, quanto trama ou textura “coagulada”, sem laminação evidente, mais característica de trombólitos (Figura 18).

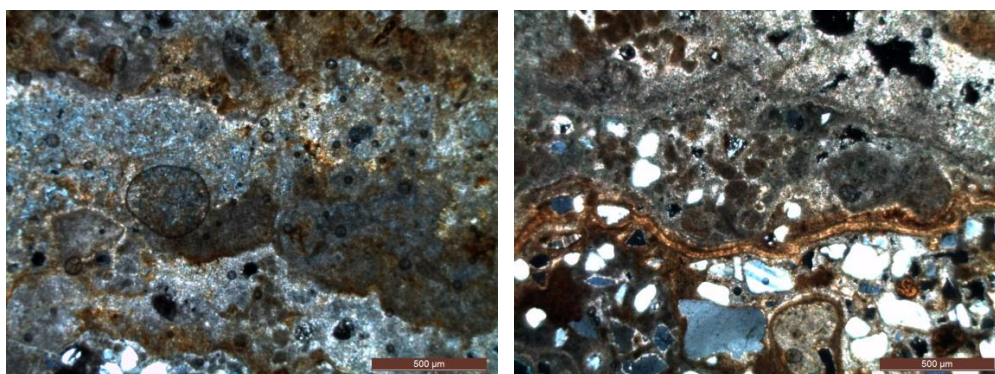


Figura 18. Fotomicrografias da microfácies 4, ilustrando a diferença entre microbialitos de trama “coagulada” ou grumosa, com laminação pouco evidente, mais característicos de trombólito (esquerda), e microbialitos com laminação crenulada nítida, mais típicos de estromatólito (direita). Neste último, notar a presença de terrígenos e pelotilhas.

- Microfácies 5: calcarenito biomicrito impuro ou *packstone*, com arcabouço formado por grãos de quartzo e feldspato, pelotilhas micríticas e bioclastos de gastrópodes e ostracodes (Figura 19). A menor porosidade (~25%) em comparação com microfácies sotopostas deve-se à presença de matriz micrítica, muito provavelmente de origem eodiagenética mecânica, isto é, por infiltração.



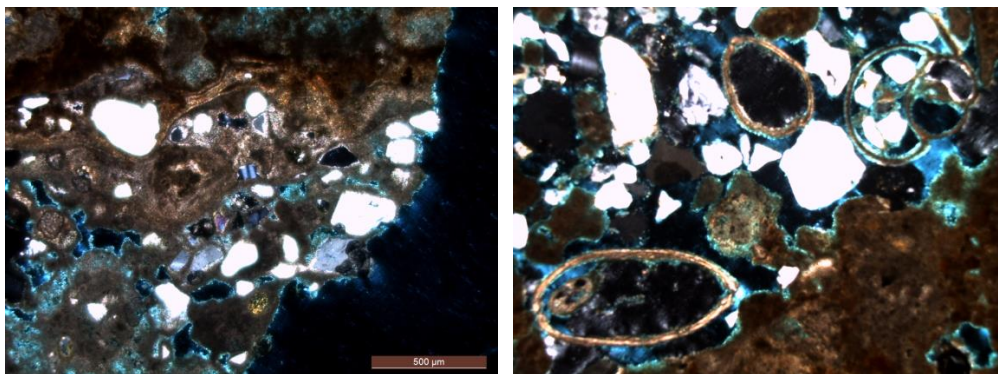


Figura 19. *Packstone* terrígeno-bioclástico da microfácies 5, composto por quartzo, feldspato, pelotilhas micríticas, gastrópodes e ostracodes.

- Microfácies 6: dismicrito biolítico ou *bindstone*, em que os estromatólitos apresentam laminações bem crenuladas, segundo hemisferoides milimétricos colunares, e crescem diretamente sobre substrato composto por bioclastos do bivalve *A. brasiliana* (Figura 20).

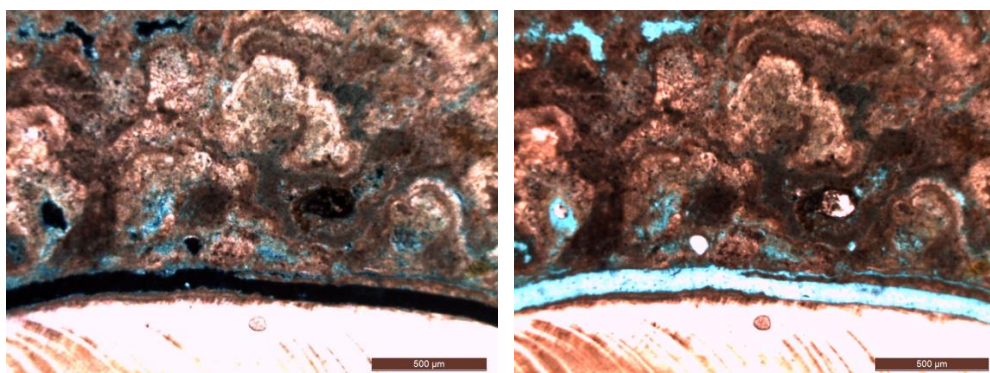


Figura 20. Lâminas crenuladas de estromatólito da microfácies 6, crescendo sobre substrato conchífero (bivalve *Anomalocardia brasiliana*). Nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Notar porosidade fenestral.

Microfácies 7: dismicrito biolítico ou *bindstone* impuro com perda ascendente de estrutura estromatolítica, passando de laminitos crenulados na base a trombólitos no topo (Figuras 21 e 22). O material terrígeno, formado por grãos angulosos, mal selecionados e pouco arredondados de quartzo e de feldspato, aumenta sua concentração para cima.

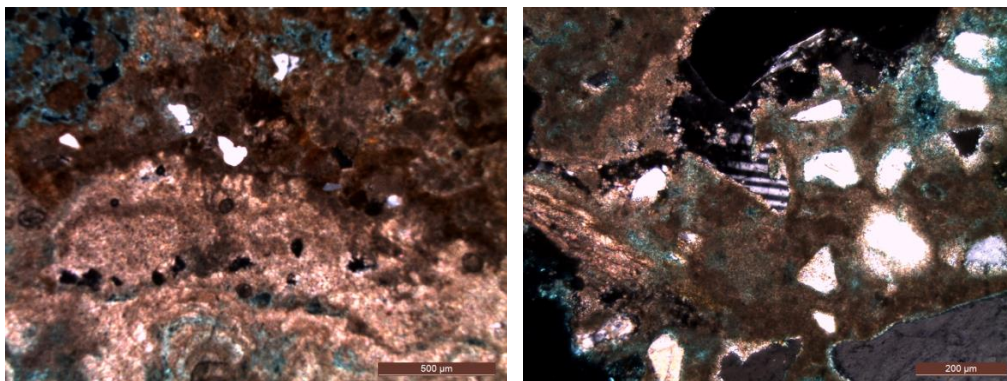


Figura 21. Contraste estrutural/textural entre estromatólito, na base da microfácies 7 (base da fotomicrografia da esquerda) e trombólito no topo da mesma microfácies (topo da micrografia da esquerda e micrografia da direita). Notar maior presença de areia terrígena no trombólito, inclusive plagioclásio com geminação polissintética (direita).

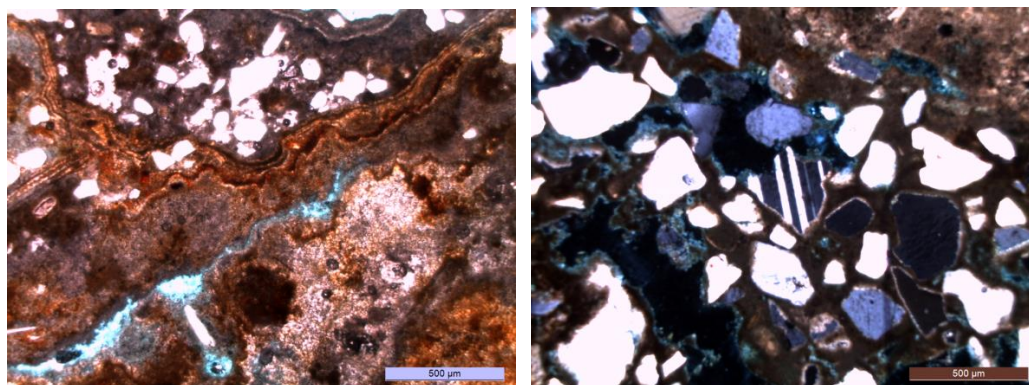


Figura 22. Detalhes da microfácies 7: laminações de esteira microbiana (esquerda) e material terrígeno em meio a micrita supostamente trombólica, com destaque para a presença de plagioclásio subanguloso (direita).

#### 8.4. Isótopos estáveis

As doze alíquotas retiradas em perfil vertical da amostra LS.1 (A a L, da base para o topo) e submetidas a análise de isótopos estáveis distribuem-se do seguinte modo: a amostra A pertence ao laminito basal, logo acima do pavimento de *A. brasiliana*; as amostras B a G, ao estromatólito laminar com hemisferoides menores que 5 cm; e as amostras H a L, ao hemisferoide decimétrico (cabeça) do topo da sucessão. As sete microfácies descritas correspondem aproximadamente aos 8 cm inferiores da sucessão e, portanto, às subamostras A a D.

Os resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 23 e Anexo II) mostram baixa co-variância entre si (coeficiente de correlação linear  $r = -0,5$ ), o que significa que o C e o O incorporados no carbonato não estavam em equilíbrio fechado com seu ambiente (Abell *et al.* 1982). A amplitude total de variação do  $\delta^{13}\text{C}$  é de cerca de 16 permil. A do

$\delta^{18}\text{O}$ , em contraposição, é de apenas 2,5 permil. Segundo Talbot (1990), baixa co-variância entre  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  ( $r$  menor que 0,7), associada a amplitude de variação de  $\delta^{18}\text{O}$  pequena (menor que 4 permil) e de  $\delta^{13}\text{C}$  grande, é característica típica de lagos abertos. Já Li & Ku (1997) demonstram que estas características podem ser encontradas também em lagos fechados hiper-alcalinos. Em lagos fechados, o  $\delta^{13}\text{C}$  é controlado pelo fracionamento isotópico entre gás carbônico e íon bicarbonato, com concentração do isótopo leve no primeiro e do pesado no segundo.

Este fracionamento faz-se principalmente através da evaporação, que reduz o volume de água do lago, e/ou do consumo de gás carbônico via fotossíntese (Talbot 1990). Os seres fotossintetizantes, como as cianobactérias, assimilam o Carbono por difusão gasosa e absorvem preferencialmente, por esta razão, o seu isótopo mais leve, o  $^{12}\text{C}$  (Craig, 1953). Desse modo, quando a produtividade primária aumenta, mais  $^{12}\text{C}$  fica retido na biomassa e mais  $^{13}\text{C}$  sobra nas águas em contato com ela e no íon bicarbonato. Segundo esse raciocínio, o  $\delta^{13}\text{C}$  do carbonato pode ser também um indicador direto da produtividade do meio (Ehleringer & Rundel, 1989; Aitken, 1990; Libes, 1992) ou, ainda, do grau de influência dos seres fotossintetizantes na água. Ocorre que, em condições hiperalcalinas, o  $\delta^{13}\text{C}$  se torna insensível a variações de volume do lago, passando portanto a refletir mais intensamente a produtividade biológica (Li & Ku 1997).

Como o padrão de co-variância de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  nos estromatólitos da Lagoa Salgada pode ser tanto de sistema lacustre fechado hiper-salino quanto aberto, os resultados de isótopos encontrados podem ser interpretados de pelo menos dois modos diferentes: como resultado de mudanças climáticas e/ou de produtividade e como resultado de mudanças no aporte de água marinha via canal do Açú.

Os resultados de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$  revelam tendência para aumento contínuo de A até H, portanto, grosso modo, dentro das duas fácies inferiores, desde valores de cerca de 2 permil, na base, até mais de 18 permil, no topo (Figura 23). Os quatro pontos superiores do perfil vertical de amostragem, correspondentes aproximadamente a fácies de hemisferoide decimétrico, apresentam, por sua vez, estabilidade de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$  entre 11 e 12 permil. De acordo com estes dados e com a premissa de que o  $\delta^{13}\text{C}$  no caso reflete a produtividade biológica, a influência das cianobactérias nas águas da Lagoa Salgada teria aumentado até o estabelecimento da fácies com hemisferoides decimétricos, quando então se estabilizou. Os resultados de análise de microfácies no trecho do perfil correspondente ao intervalo de A a D são compatíveis com esta interpretação, pois revelam aumento gradual, para cima, na

representatividade das microfácies microbianas (presentes nas microfácies 4, 6 e 7). A interpretação alternativa, para a hipótese de sistema aberto, é que o  $\delta^{13}\text{C}$  reflita mudanças na influência do canal Açú. Como o  $\delta^{13}\text{C}$  passa de valores típicos de carbonatos continentais (menores que 12 a 13 permil) na base para valores compatíveis com águas oceânicas acima da amostra D, o padrão encontrado indicaria aumento da influência marinha ao longo de grande parte da sucessão.

Já os resultados de  $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$  mostram relativa estabilidade entre 1,1 e 1,6 permil, de A a D, e entre -0,5 e -1,1 permil, de I a L, mas exibem tendência de diminuição no trecho intermediário do perfil de amostragem, desde 1,6 permil, em D, até -1,1 permil, em I (Figura 23). Este trecho pertence quase inteiramente a fácies de estromatólito laminar. O  $\delta^{18}\text{O}$  em águas lacustres possui correlação direta com a temperatura e a evaporação (Emiliani 1970) e, por extensão, com a salinidade. Admitindo-se a Lagoa Salgada como um sistema lacustre essencialmente fechado, torna-se possível interpretar uma redução de temperatura e de salinidade das águas ao longo do perfil vertical, sobretudo na fácies intermediária, o que poderia estar relacionado a mudanças climáticas. Admitindo-se a Lagoa Salgada como sistema aberto e a sua vocação hipersalina, a queda de  $\delta^{18}\text{O}$  no tempo poderia representar aumento da influência das águas oceânicas (de salinidade normal) na laguna, portanto com redução relativa da salinidade lagunar. Esta hipótese parece compatível com o fato de que a sucessão de fácies estudada é aparentemente de caráter transgressivo (estromatólitos dômicos, de zona intermarés, sobre laminados horizontais, de zona emersa).

O que se destaca como ponto em comum aos resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  é que a fácies superior, dos estromatólitos dômicos e a de águas mais profundas da sucessão, representa um momento de relativa estabilização das condições ambientais. Esta fácies é típica de zona intermarés. Acima dela, ocorrem os sedimentos carbonáticos inconsolidados da zona inter a supramarés atual. O contraste entre calcários litificados e inconsolidados de profundidades de sedimentação diferentes sugere hiato sedimentar, representado por regressão da linha de costa lagunar. É possível que a litificação das cabeças tenha-se dado justamente com a exposição subaérea favorecida por esta regressão. Desse modo, a suposta estabilização da salinidade e da produtividade biológica no topo da fácies das cabeças pode ser um indício do fim do ciclo transgressivo em que foi gerada a sucessão.

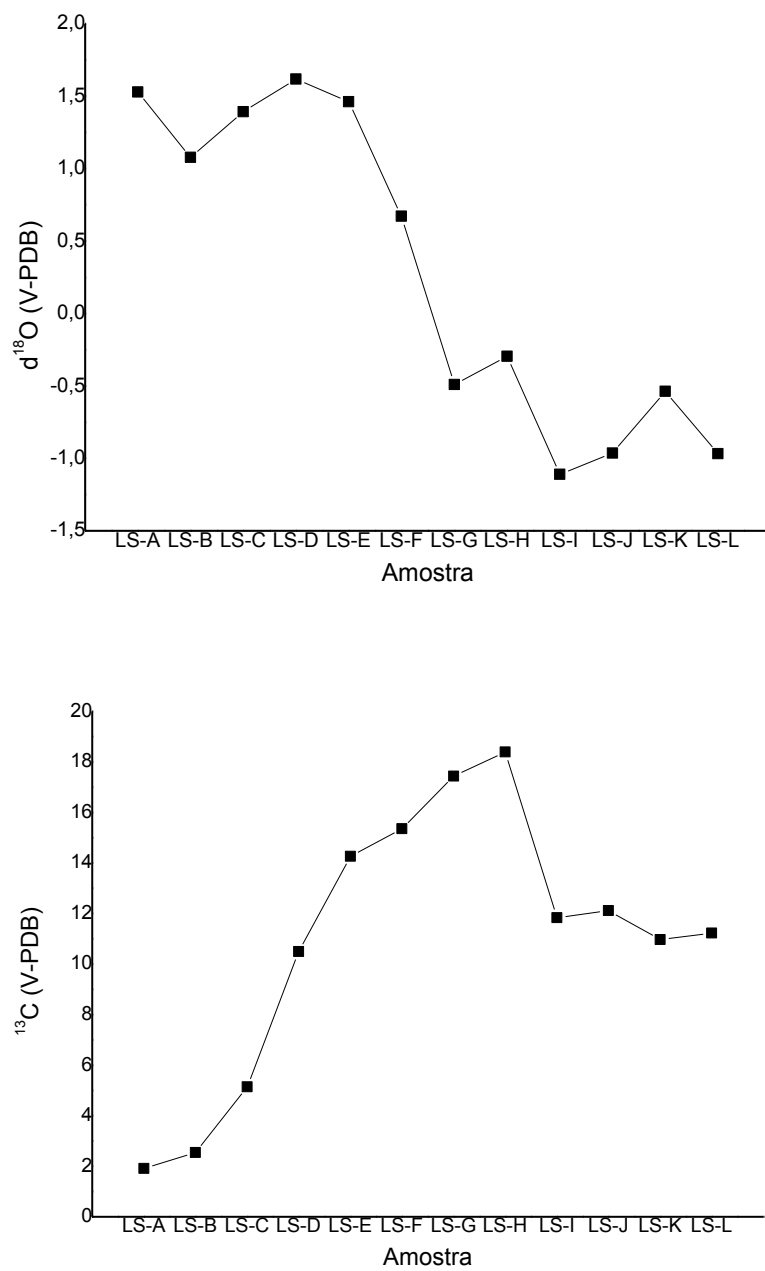


Figura 23. Gráficos de distribuição dos valores de isótopos estáveis de C e O (padrão PDB), da base (A) para o topo (L) da sucessão do microbialito litificado do ponto LS.01.



## 9. Conclusões

De maneira geral, pode-se dizer que no Holoceno o litoral brasileiro tenha sido submetido à submersão até cerca de 5500 anos A.P. e, em seguida, à emersão. As costas em emersão são caracterizadas pela presença de planícies de cordões litorâneos (*beach* e *dune ridges*), tão mais extensas quanto maior o aporte continental, das quais a planície costeira junto à desembocadura do rio Paraíba do Sul é um exemplo. Nestas costas, pequenas lagunas podem formar-se à retaguarda de esporões arenosos desenvolvidos por deriva litorânea longitudinal (progradação lateral). Com o prosseguimento da progradação no sentido transversal à costa, estas lagunas isolam-se progressivamente, evoluindo de modo gradual para lagos.

A Lagoa Salgada enquadra-se dentro deste caso. Ela desenvolveu-se sobre cordões litorâneos subparalelos à atual linha de costa, à retaguarda de um esporão de deriva litorânea longitudinal para NNW, e hoje representa fase de transição entre laguna e lago, uma vez que sua conexão com o mar faz-se, via canal do Açú, de modo apenas esporádico. O atual caráter hiper-salino das águas desta lagoa deve-se a esta comunicação eventual com o mar e ao microclima semi-árido da região, determinado pela influência da zona de ressurgência de Cabo Frio.

As imagens de satélite corroboram a hipótese de se tratar de um corpo de água em processo de restrição, haja vista a presença de uma geração mais nova de cordões curvilíneos, subparalelos às margens irregulares da lagoa. Esta irregularidade das margens deve-se à formação de pontais, formados pela ação de ondas induzidas pelos ventos subparalelos ao eixo maior da lagoa (pontais de Zenkovitch).

As fácies sedimentares de campo demonstram o predomínio de sedimentação clástica nos sedimentos recentes, expostos nas trincheiras rasas escavadas nas margens da lagoa. Algas, porém, estão presentes e, juntamente com as cianobactérias, continuam influenciando na sedimentação, a julgar pela existência de lama micrítica em toda a margem. Além disso, na parte oriental da lagoa foram encontrados possíveis oncoides (fácies SS) em formação, sob a lâmina de água rasa (decimétrica). Microbialitos litificados na forma de estromatólitos (fácies LLH-SH) e trombólitos, abaixo da cobertura clástica recente, encontraram-se apenas na margem oeste. Nas porções mais frequentemente emersas da margem leste, observou-se a bioconstrução de edifícios por serpulídeos.

Fácies marinha descrita na literatura, composta por areia de granulação média a grossa com bioclastos identificados como foraminíferos, deve refletir a fase de sedimentação costeira contemporânea ou imediatamente anterior à configuração da

laguna por deriva litorânea. No presente estudo, foram reconhecidas apenas fácies lagunares e lacustres (até cerca de 1 m de espessura), estratigraficamente acima das marinhas costeiras, começando, na base, pelos microbialitos litificados.

Estes microbialitos compõem uma sucessão decimétrica abaixo dos sedimentos clásticos inconsolidados recentes. O contato entre os dois representa provavelmente um hiato deposicional. Os microbialitos litificados repousam sobre um pavimento de conchas lagunares logo acima das areias terrígenas de cordões litorâneos. Representam a instalação da laguna e a crescente colonização das suas margens por cianobactérias, em contexto transgressivo deduzido pelo empilhamento de fácies (estromatólitos dômicos, de zona intermarés, sobre laminados horizontais, de zona emersa).

As análises de fácies deposicionais em geral e das seções delgadas do estromatólito litificado em particular mostraram aporte misto terrígeno-intraclástico dentro da sucessão bioquímica carbonática, com predomínio de quartzo e feldspato, dentre os terrígenos, e de bioclastos (bivalves, ostracodes e gastrópodes) e pelotilhas, dentre os clastos intrabacinais.

A petrografia permitiu observar ainda: os contrastes microestruturais entre trombólitos (sem laminação e com textura coagulada) e estromatólitos (com laminação sub-horizontal crenulada, construindo hemisferoides milimétricos em domos e colunas); a alta porosidade primária, sobretudo das fácies clásticas, onde perfaz cerca de 50 a 70% da rocha; e a escassez de cimento e matriz, exceto micrita eodiagenética formada por calcita magnesiana.

As sete microfácies identificadas nas quatro lâminas petrográficas estudadas do microbialito litificado podem ser agrupadas em duas associações de microfácies: as dominadas por deposição clástica (calciarenitos e calcirruditos bioclásticos impuros) e as com predomínio de sedimentação bioinduzida (micritos biolitíficos). Estas associações recorrem na estratigrafia, com tendência de aumento, para cima, das fácies bioinduzidas. Há também coexistência de ambos os tipos de materiais, clásticos e bioinduzidos, sobretudo nas microfácies micríticas maciças, de trama grumelosa, atribuída a trombólitos. Assim, os momentos de intensa bioturbação penecontemporânea que geraram os trombólitos devem ter sido acompanhados por aporte de material clástico, sobretudo terrígeno, constituído majoritariamente por grãos de quartzo e plagioclásio, bem selecionados e subangulosos. A matriz, quando presente, é constituída por micrita introduzida mecanicamente na eodiagênese.

No mesmo estromatólito consolidado, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  variam de 1,91 a 18,40 ‰, e os de  $\delta^{18}\text{O}$  variam de -1,11 a 1,62 ‰, no padrão PDB. Já no padrão SMOW os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  vão de 29,77 a 32,58 ‰. Em vista do caráter semi-fechado da Lagoa Salgada, o fracionamento isotópico de carbono e oxigênio dá-se em função principalmente da evaporação e da atividade fotossintética de algas e esteiras microbianas presentes na água, mas não se pode descartar a influência do fluxo de água subterrânea e superficial (através sobretudo da comunicação com o mar pelo canal do Açú). De fato, a baixa co-variância encontrada entre  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  ( $r = -0,5$ ), associada a amplitude de variação de  $\delta^{18}\text{O}$  pequena (2,5 permil) e de  $\delta^{13}\text{C}$  grande (16 permil), é um padrão isotópico que pode ser atribuído tanto a lagos abertos quanto a lagos fechados hiper-salinos.

O  $\delta^{13}\text{C}$  varia entre valores compatíveis com carbonatos oceânicos, no meio da sucessão analisada, e valores “mais continentais”, na base e no topo. Este conjunto de resultados indica fracionamento isotópico variável dependendo principalmente da temperatura e evaporação, da produtividade biológica e, talvez, do grau de conexão e influência marinha. Admitida a hipótese de sistema lacustre essencialmente fechado, a influência das cianobactérias nas águas da Lagoa Salgada teria aumentado até o estabelecimento da fácies com hemisferoides decimétricos, quando então se estabilizou. Admitida a hipótese de laguna ou lago aberto, o padrão encontrado indicaria aumento da influência marinha ao longo de grande parte da sucessão.

Os valores SMOW (*standard mean ocean water*) muito positivos de  $\delta^{18}\text{O}$ , refletem provavelmente o ambiente transicional hiper-salino. A pequena variação destes valores ao longo do perfil vertical estudado resulta do caráter restrito da lagoa, com escasso escoamento superficial de água doce e com pouca variação da comunicação com o mar.

O  $\delta^{18}\text{O}$  mostra relativa estabilidade a valores mais altos, na base, e a valores mais baixos, no topo da sucessão, com tendência de diminuição no trecho intermediário. Admitindo-se a Lagoa Salgada como um sistema lacustre essencialmente fechado, pode-se interpretar redução de temperatura e de salinidade das águas ao longo do perfil vertical, sobretudo no trecho intermediário, o que poderia estar relacionado a mudanças climáticas. Admitindo-se a Lagoa Salgada como sistema aberto, e em vista de sua vocação hipersalina, a queda de  $\delta^{18}\text{O}$  no tempo poderia representar aumento da influência das águas oceânicas (de salinidade normal) na laguna, portanto com redução relativa da salinidade lagunar. Esta hipótese parece



compatível com o fato de que a sucessão de fácies estudada é aparentemente de caráter transgressivo.

## Referências bibliográficas

- ABELL, P.I., AWRAMIK, S.M., OSBORNE, R.H. AND TOMELLINI, S. 1982. Plio-Pleistocene Lacustrine Stromatolites from lake Turkana, Kenya: Morphology, Stratigraphy and Stable Isotopes. *Sedimentary Geology*, 32: 1-26.
- ANGULO, R.J. & LESSA, G.C. 1997. The Brazilian sea-level curves: a critical review with emphasis on the curve from Paranaguá and Cananéia regions. *Marine Geology*, 140: 141 – 166.
- ANGULO, R.J., LESSA, G.C., SOUZA, M.C. 2006. A critical review of mid-to-late Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, 25: 486-506.
- BARBIÉRE, E. B. Cabo Frio e Iguaba Grande, dois microclimas distintos a um curto intervalo espacial. Restingas: origem, estrutura, processos. Niterói, CEUFF, p. 3-13, 1984.
- BURNE, R.V. & MOORE, L.S. 1987. Benthic Microbial Communities. *Palaos*, 2: 241-254.
- CARVALHO, J.C. & FRANCISCONI, O. 1981. *Análise de depocentros e suas associações com a geomorfologia e a estrutura da Margem Continental Brasileira*. In: Asmus, H.E., Ed. Estruturas e tectonismo da Margem Continental Brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais. Rio de Janeiro, CENPES/DINTEP, p. 171-186, (Série Projeto REMAC 9).
- CASANOVA, J. 1991. Biosedimentology of Quaternary stromatolites in intertropical Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 12(1/2): 409-415.
- CASANOVA, J. and HILLAIRES-MARCEL, C. 1992. Chronology and Paleohydrology of Late Quaternary High Lake Levels in the Manyara Basin (Tanzania) from Isotopic Data ( $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ , Th/U) on Fossil Stromatolites. *Quaternary Research*, 38: 205-226.
- CRAIG, H. 1953. The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochim et Cosmochim Acta*, v.3, p. 53-92.

- CRUZ JUNIOR, F.W., VUILLE, M., BURNS, S.J., WANG, X., WERNER, M.R., LAWRENCE, E., KARMANN, I., AULER, A., NGUYEN, H. 2009. Orbitally driven east-west anti-phasing of South American precipitation. *Nature Geoscience*, 2: 210–214.
- DÉTRICHÉ, S., BRÉHÉRET, J.G., KARRATS, L., HINSCHBERGER, F., MACAIRE, J.J. 2013. Environmental controls on the Late Holocene carbonate sedimentation of a karstic lake in the Middle-Atlas Mountains (Lake Afourgagh, Morocco). *Sedimentology*, 60: 1231-1256.
- DIAS, G.T.M. 1981. Complexo deltaico do rio Paraíba do Sul. In: Simpósio sobre o Quaternário do Brasil. 4, Rio de Janeiro, 1981, CTQC/SBG. *Publicação Especial*, 2: 58-79.
- DIAS, G.T.M., & GORINI, M.A. 1980. A Baixada Campista: Estudo morfológico dos ambientes litorâneos. Anais XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, vol.1: 588-602, Camboriú (SC).
- DUNHAM, R. J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (ed.), Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir, p. 108-121.
- EHLERINGER, J. R. & RUNDEL, P. W. 1989. Stable Isotopes: History, Units, and Instrumentation. In Rundel, P. W., Ehleringer, J. R. and Nagy, K. A., eds. Stable Isotopes in Ecological Research. Springer Verlag, New York.
- EMILIANI, C. 1955. Pleistocene Temperatures. *Journal of Geology*, v. 63, p. 538-578.
- EMILIANI, C. 1970. *Pleistocene paleotemperatures*. *Science* 168:822–825.
- FRANÇA, A.M.C. 1979. *Geomorfologia da Margem Continental Leste Brasileira e da Bacia Oceânica Adjacente*. In: Chaves, H.A.F. (ed.). Geomorfologia da Margem Continental Brasileira e das Áreas Oceânicas Adjacentes (Relatório Final). Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/DINTEP, p.89-128 (Série Projeto REMAC), v.7.
- FOLK, R.L. 1962. Spectral subdivision of limestone types, in Ham, W.E., ed., Classification of carbonate Rocks-A Symposium: American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, p. 62-84.
- GIANNINI, P.C.F. 2007. *Sistemas Depositionais Eólicos no Quaternário Costeiro do Brasil*. São Paulo, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo. Tese de Livre Docência. 200p.

- HILLAIRE-MARCEL, C. *et al.*  $^{14}\text{C}$  and Th/U Dating of Pleistocene and Holocene Stromatolites from East African Paleolakes. *Quaternary Research* 25, p. 312-329, 1986.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 1970. Carta Topográfica “Muçupê – SF-24-V-C-V-4”, na escala de 1:50.000.
- IESPA, A.A.C., DAMAZIO-IESPA, C.M., ALMEIDA, L.B.F. 2008. Microestratigrafia do Complexo Estromatólito, Trombólito e Oncóide Holocênico da Lagoa Salgada, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista de Geologia*, 22(1): 7-14. Disponível em [www.revistadegeologia.ufc.br](http://www.revistadegeologia.ufc.br).
- KING, L.C. 1956. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geogr.* **18**: 147-265.
- KLEIN, R. T., LOHMANN, K. C., KENNEDY, G. L. 1997. Elemental and isotopic proxies of paleotemperature and paleosalinity: Climate reconstruction of the marginal northeast Pacific ca. 80 ka. *Geology*, v. 25, pp. 363-366.
- LAMEGO, A.R. 1946. *O Homem e a Restinga, Brasil*. Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Geografia.
- LAMEGO, A.R. 1955. Geologia das Quadrículas de Campos, São Tomé, Lagoa Feia e Xexé. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, *Boletim* **154**: 1-60.
- LAST, F.M., LAST, W.M., HALDEN, N.M. 2012. Modern and late Holocene dolomite formation: Manito Lake, Saskatchewan, Canada. *Sedimentary Geology* 281, p. 222-237.
- LEMOES, R.M.T. 1995. *Estudo das Fácies Depositionais e das Estruturas Estromatolíticas da Lagoa Salgada – Rio de Janeiro*. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha da Universidade Federal Fluminense, Niterói, (Dissertação de Mestrado), 122p.
- LEMOES, R.M.T., SILVA, C.G., SPADINI, A.R. 1994. Estratigrafia e estromatólitos recentes da Lagoa Salgada – RJ. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Camboriú/SC, 1994, SBG. *Anais*, 3: 258-260.
- LI, H.C. AND KU, T.L. 1997.  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$  covariance as a paleohydrological indicator for closed-basin lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 133: 69-80.
- LIBES, S. M. 1992. *Introduction to Marine Biogeochemistry*, 1st edition. New York: Wiley.
- LOGAN, B.W., REZAK, R., GINSBURG, R.N. 1964. Classification and environmental significance of algal stromatolites. *Journal of Geology* 72: 68–83.

- MARTIN, L., SUGUIO, K., DOMINGUEZ, J.M.L., FLEXOR, J.M. AZEVEDO, A.E.G. 1984. Evolução da planície costeira do Rio Paraíba do Sul (RJ) durante o Quaternário: Influência do nível do mar. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, Rio de Janeiro, SBG. *Anais*, 1: 84-97.
- MARTIN, L., SUGUIO, K., FLEXOR, J.M. 1993. As flutuações de nível do mar durante o Quaternário Superior e a Evolução Geológica de “Deltas” Brasileiros. *Boletim IG-USP, Publ. Esp.*, São Paulo, SP, Nº 15, 186 p.
- MARTIN, L., SUGUIO, K., DOMINGUEZ, J.M.L. AND FLEXOR, J.M. 1997. Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Publicação CPRM (Serviço Geológico do Brasil) & FAPES (Texto explicativo, 2 folhas coloridas na escala do 1/250 000. Folha do Espírito Santo e Folha do Norte do Estado do Rio), 104 p.
- MAUGHER, C.L. AND COMPTON, J.S. 2011. Formation of modern dolomite in hypersaline pans of the Western Cape, South Africa. *Sedimentology* 58: 1678–1692.
- PEDLEY, M. 2013. The morphology and function of thrombolytic calcite precipitation biofilms: A universal model derived from freshwater mesocosm experiments. *Sedimentology*, doi: 10.1111/sed.12042.
- RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. 1990. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, 415 p.
- RODRIGUES, M.A., CARVALHO, M.G.P., DIAS, G.T.M. 1981. Interpretação paleoambiental das Lagoas Salgadas e das Ostras (RJ), Brasil. *In: Congresso Latino-Americano de Paleontologia*, II, Porto Alegre/RS. *Anais*: 893-906.
- SILVA E SILVA, L.H. 1999. Estromatólitos e Cianofíceas na Lagoa Salgada, Rio de Janeiro, R.J. Levantamento Preliminar. *In: Congresso Brasileiro de Paleontologia*, 16, Crato/CE, SBP. *Boletim de Resumos*: 106-107.
- SILVA E SILVA, L.H. 2002. *Contribuição ao conhecimento da composição microbiana e química das estruturas estromatolíticas da Lagoa Salgada, Quaternário do Rio de Janeiro, Brasil*. Tese de Doutorado em Geologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 176 f.
- SILVA E SILVA, L.H., IESPA, A.A.C., DAMAZIO-IESPA, C.M. 2008. Composição dos Estromatólitos Estratiformes da Lagoa Salgada, Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ – Vol. 31-2*, p. 42-49.

- SILVA E SILVA, L.H., SENRA, M.C.E., SRIVASTAVA, N.K. 1999. Composição Ficológica dos Estromatólitos Estratiformes e Esteiras Algais com Biodetritos Associados na Lagoa Salgada, Rio de Janeiro, Brasil. *In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos Quaternários, Porto Seguro/BA, 1999, ABEQUA.*
- SILVA E SILVA, L.H., SRIVASTAVA, N.K., IESPA, A.A.C., IESPA, C.M.D. 2007. Evidência de oncóides recentes na Lagoa Salgada, norte do Estado do Rio de Janeiro, sudeste brasileiro. *Revista UnG – Geociências* v.6, N. 1, p.201-206.
- SOFFIATI, A. 1998. *Aspectos históricos das lagoas do norte do Estado do Rio de Janeiro. In: ESTEVES, F.A. Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ).* Rio de Janeiro, Editora Universidade Federal do Rio de Janeiro, p.8.
- SRIVASTAVA, N.K. 2007. Os mais antigos fósseis. *Ciência Hoje*, v.22, p. 18-19.
- SRIVASTAVA, N.K. 2002. Lagoa Salgada, RJ: Estromatólitos Recentes. *Sigep* 41. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, p. 203-209.
- SRIVASTAVA, N.K. 2010. Estromatólitos. *Paleontologia: Conceitos e Métodos.* CARVALHO, I.S. (ed.), 3ª edição - Rio de Janeiro: Interciência. Volume 1, cap. 13, p. 229-259.
- TALBOT, M.R. 1990. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 80: 261-279.
- TEWARI, V. & SECKBACK, J. (eds.). 2011. *Stromatolites: Interactions of Microbes with Sediments. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology.* p.291-444.
- TUCKER, M.E. 2001. *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks.* Third Edition. Blackwell Science, p. 110-165.
- ZENKOVITCH, V.P. 1971. *Processes of Coastal Development*, Edinburgh-London, Oliver & Boyd, 738 p.

# **Anexo I: Tabela de bioclastos da trincheira LS-6**

Número da concha	Articulação	Fragmentação	Orientação	Perióstraco	Concavidade	Táxon
1	D	S	H	N	B	A
2	D	S	H	N	C	A
3	D	S	H	N	C	A
4	D	S	H	N	C	A
5	D	N	H	N	B	A
6	D	N	V	N	B	A
7	D	S	O	N	B	A
8	D	S	H	N	B	A
9	D	N	H	N	C	A
10	D	N	H	N	B	A
11	D	N	H	N	C	A
12	D	N	V	N	B	N
13	D	S	V	N	N	A
14	D	N	H	N	N	A
15	D	N	H	N	B	A
16	N	N	H	N	N	G
17	D	N	H	N	C	A
18	D	N	H	N	C	A
19	D	N	H	N	C	A
20	A	N	H	N	N	A
21	D	N	H	N	C	A
22	D	N	H	N	C	A
23	N	N	H	N	N	G
24	N	S	H	N	N	G
25	D	N	H	N	C	A
26	D	N	H	N	C	A
27	N	N	H	N	N	G
28	N	N	H	N	N	G
29	D	N	H	N	B	A
30	D	N	H	N	C	A
31	D	N	H	N	C	A
32	N	S	H	N	N	G
33	D	N	H	N	B	A

34	D	N	H	N	C	A
35	D	N	H	N	C	A
36	D	N	H	N	B	A
37	D	N	H	N	B	A
38	D	N	O	N	B	A
39	D	N	H	N	C	A
40	D	N	H	N	C	A
41	D	N	H	N	B	A
42	N	N	H	N	N	G
43	D	N	H	N	C	A
44	N	N	H	N	N	G
45	D	N	H	N	C	A
46	D	N	H	N	C	A
47	D	N	H	N	C	A
48	D	N	H	N	C	A
49	D	N	H	N	C	A
50	D	N	H	N	C	A
51	D	N	H	N	B	A
52	D	N	H	N	C	A
53	D	N	H	N	B	A
54	D	N	H	N	B	A
55	D	N	H	N	C	A
56	D	N	H	N	B	A
57	D	N	H	N	B	A
58	D	N	H	N	C	A
59	D	N	H	N	B	A
60	D	S	H	N	N	A
61	N	N	H	N	C	G
62	D	N	H	N	C	A
63	D	N	H	N	N	A
64	N	N	H	N	C	G
65	D	N	H	N	C	A
66	D	N	H	N	B	A
67	D	N	H	N	C	A
68	N	S	H	N	N	G
69	D	N	H	N	C	A

70	D	N	H	N	B	A
71	N	N	H	N	N	G
72	D	S	H	N	C	A
73	N	N	H	N	B	G
74	D	N	H	N	C	A
75	D	N	H	N	C	A
76	D	S	H	N	C	A
77	D	N	H	N	C	A
78	D	N	H	N	C	A
79	D	N	H	N	B	A
80	D	N	H	N	C	A
81	D	N	H	N	C	A
82	D	N	H	N	C	A
83	D	N	H	N	C	A
84	D	N	H	N	B	A
85	D	N	H	N	B	A
86	D	N	H	N	B	A
87	D	N	H	N	C	A
88	D	N	H	N	B	A
89	D	N	H	N	B	A
90	D	N	H	N	B	A
91	D	N	H	N	C	A
92	D	N	H	N	C	A
93	D	N	H	N	B	A
94	D	N	H	N	B	A
95	D	N	H	N	C	A
96	D	N	H	N	B	A
97	D	N	H	N	B	A
98	D	N	V	N	N	A
99	D	N	V	N	N	A
100	D	N	H	N	C	A



### **Legenda:**

- Articulação: D = Desarticulada; A = Articulada; N = Não se aplica.
- Fragmentação: S = Sim; N = Não.
- Orientação: V = Vertical; H = Horizontal; O = Oblíqua.
- Perióstraco: S = Sim; N = Não.
- Concavidade: B = para Baixo; C = para Cima; N = Não se aplica.
- Táxon: A = *Anomalocardia brasiliiana*; G = Gastrópode.

## Anexo II: Tabela de Isótopos Estáveis de C e O

CERTIFICADO DE ANÁLISE - Laboratório Isótopos Estáveis						
		Contato: <a href="mailto:iksonoki@usp.br">iksonoki@usp.br</a> (Ivone - Setor de Informática)		Fone (11) 3091-3984		
PROJETO: G97-TF		USUÁRIO: Caio-Giannini-Thomas			DATA: 16-out-13	
SPE	AMOSTRA	Rocha	Material	$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
58289	LS-A	Calcário	RTOT	1,91	1,53	32,49
58290	LS-B	Calcário	RTOT	2,54	1,08	32,02
58291	LS-C	Calcário	RTOT	5,14	1,39	32,35
58292	LS-D	Calcário	RTOT	10,50	1,62	32,58
58293	LS-E	Calcário	RTOT	14,26	1,46	32,42
58294	LS-F	Calcário	RTOT	15,35	0,67	31,60
58295	LS-G	Calcário	RTOT	17,43	-0,49	30,40
58296	LS-H	Calcário	RTOT	18,40	-0,30	30,61
58297	LS-I	Calcário	RTOT	11,83	-1,11	29,77
58298	LS-J	Calcário	RTOT	12,11	-0,96	29,92
58299	LS-K	Calcário	RTOT	10,97	-0,54	30,36
58300	LS-L	Calcário	RTOT	11,22	-0,97	29,91
CONTROLE						
PADRÕES		$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB)‰	DP $\delta^{13}\text{C}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB)‰	DP $\delta^{18}\text{O}$ ‰	
	NBS-18 (N=3)	-5,04	0,06	-23,18	0,16	
	NBS-19 (N=3)	1,95	0,07	-2,16	0,21	
	REI (N=3)	-7,91	0,12	-7,89	0,13	
NOTAS:						
SPE: número de laboratório		Precisão instrumental para: $\delta^{13}\text{C}$ - 0.05‰ e $\delta^{18}\text{O}$ - 0.07‰				
Valores convertidos da escala V-PDB para a escala V-SMOW segundo Coplen T.B. (1983), Nature, 302, 236-238						
OBS: Os valores finais foram corrigidos pelos valores dos padrões internacionais (NBS-18 e NBS-19) e interno (REI), rodados juntamente com as amostras.						
N indica o número de vezes que o padrão/controle foi rodado juntamente com o lote de amostras.						
Valores padrão NBS-18: $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) ‰ = $-5.01 \pm 0.04$ ; $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) ‰ = $-23.20 \pm 0.10$ e $\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰ = $+6.99$						
Valores padrão NBS-19: $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) ‰ = $+1.95$ ; $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) ‰ = $-2.20$ e $\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰ = $+28.64$						
						Analista: Osmar Antunes Junior