

Potencial de Geração de Matéria Orgânica das Esteiras Microbianas com Base em Proxies Biogeoquímicos em Lagunas Hipersalinas do Rio de Janeiro, Brasil

Potential of Organic Matter Generation of Microbial Mats Based on Biogeochemical Proxies in Hypersaline Lagoons of Rio de Janeiro, Brazil

Sinda Beatriz Vianna Carvalhal-Gomes¹ , Frederico Sobrinho da Silva¹ ,
Mirian Araújo Carlos Crapez²  & João Graciano Mendonça Filho¹ 

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Universidade Federal Fluminense, Instituto de Biologia, Niterói, RJ, Brasil

E-mails: sinda@lafo.geologia.ufrj.br; fsobrinho@gmail.com; graciano@igeo.ufrj.br; mirian@gmail.com

Corresponding author: Sinda Beatriz Vianna Carvalhal Gomes; sinda@lafo.geologia.ufrj.br

Resumo

As esteiras microbianas são estruturas biossedimentares formadas por um consórcio de bactérias autótrofas e heterótrofas, cuja produtividade primária gera Matéria Orgânica Amorfa Bacteriana (MOAB). Este trabalho tem por finalidade avaliar a produção de matéria orgânica de esteiras microbianas de três lagunas costeiras do Sudeste do Rio de Janeiro, utilizando proxies biogeoquímicos e estabelecendo relação com sedimentos superficiais. Valores elevados de COT, S, CIT e concentração de biopolímeros nas esteiras microbianas quando comparados aos sedimentos revelam produção local da matéria orgânica. As análises de agrupamento definiram duas Associações de Palinofácies baseadas na origem e qualidade da matéria orgânica. Dois grupos de amostras ressaltaram principalmente as diferenças composicionais e de potencial de preservação da matéria orgânica entre esteiras microbianas e sedimentos. *Palinofácies 1*, foi representada pelas amostras de sedimentos e uma esteira microbiana arenosa que é caracterizada por matéria orgânica amorfa bacteriana (MOAB) e fitoclastos não-opacos (FNOP) bem preservados. *Palinofácies 2*, composta pelas amostras de esteiras microbianas caracterizadas principalmente por EPS (precursor da MOAB) com alta fluorescência indicando um sistema altamente produtivo gerador da matéria orgânica do Tipo I. A ocorrência das esteiras microbianas pode contribuir significativamente para a produção de matéria orgânica do tipo *oil-prone* nos ambientes que suportam seu desenvolvimento se a precipitação de carbonatos acompanhar os processos de sedimentação.

Palavras-chave: Biopolímeros; Matéria orgânica amorfa; Palinofácies

Abstract

Microbial mats are biosedimentary structures formed by a bacterial consortium of autotrophic and heterotrophic bacteria, whose primary productivity generates Amorphous Organic Matter. The aim of this paper was to evaluate the organic matter production of microbial mats using biogeochemical proxies and establishing relationship with superficial sediments. High values of total organic carbon (TOC), total sulfur (S), total inorganic carbon (TIC) and biopolymers concentrations (lipids, proteins, carbohydrates) in the microbial mats, when compared to the sediments, shows high bacterial productivity and local production of the organic matter. The cluster analyzes defined two Palynofacies Associations based on the origin and quality of the organic matter. Two groups of samples highlighted the compositional differences and the potential of preservation of the organic matter between microbial mats and sediments. *Palynofacies 1*, was represented by sediment samples and sand microbial mat, which is characterized of bacterially derived amorphous organic matter (Bacterial AOM) and well preserved non-opaque phytoclasts. *Palynofacies 2*, composed of the samples of microbial mats characterized mainly by EPS (Bacterial AOM precursor) with high fluorescence indicating a highly productive system generator of Type I organic matter. The occurrence of microbial mats can contribute significantly to the production of type oil-prone organic matter in the environments that support its development if the carbonate precipitation accompanies the sedimentation processes.

Keywords: Biopolimers; Amorphous organic matter; Palynofacies

1 Introdução

As esteiras microbianas são microecossistemas compostos principalmente por procariotos fotoautotróficos, quimiolitotróficos e heterotróficos organizados estrategicamente em resposta aos gradientes de luz, oxigênio, potencial de redução, sulfetos e pH (Guézennec et al. 2011; Pearl, Steep & Reid 2001; Stolz 2000). O sinergismo entre esses diferentes grupos de microorganismos favorece a produção de matéria orgânica e a precipitação de carbonatos como a calcita, aragonita e dolomita (Giralt, Julia & Klerkx 2001; Stal 2010).

São considerados ecossistemas altamente produtivos que sustentam robustos ciclos biogeoquímicos, sendo eficientes na produção e transformação da matéria orgânica (Canfield & Desmarais 1993; Slowakiewicz et al. 2016). Seus constituintes microbianos são reconhecidamente importantes como fontes de matéria orgânica amorfa (Pacton, Gorin & Vasconcelos 2011; Tyson 1993).

Compõem o mais antigo registro da vida no planeta datando, o mais antigo, de 3,5 Ga e foram muito abundantes durante o Proterozoico, quando apresentaram ocorrência global (Schopf 2006). O vasto registro fóssil sugere que estas comunidades são flexíveis e adaptáveis às mudanças ambientais contínuas (Prieto-Barajas, Valencia-Cantero & Santoyo 2018) contudo, atualmente, tendem a se desenvolver em ambientes restritivos onde as condições extremas limitam ou eliminam a ocorrência de organismos pastadores e a competição com as macrófitas, como nos lagos hipersalinos, fontes termais e fontes sulfurosas (Arp, Hofmann & Reitner 1998; Belkova et al. 2004).

No Brasil, a ocorrência de esteiras microbianas, até o presente momento, predomina nos ambientes hipersalinos mais especificamente nas lagunas costeiras do estado do Rio de Janeiro, que além das esteiras abrigam o desenvolvimento de seus sucessores líticos, os estromatólitos e trombólitos (Silva e Silva, Damazio & Iespa 2005, 2007; Silva e Silva et al. 2004, 2007). A importância e singularidade destes ambientes já intensamente exploradas no âmbito acadêmico (Knoppers, Bidone & Abrão 1999; Laut et al. 2017; Ramos et al. 2017; Rocha & Borghi 2017; Silva e Silva et al. 2004; Silva e Silva & Carvalho 2005; Silva e Silva, Damazio & Iespa 2005; Silva e Silva & Damazio 2006; van Lith et al. 2003) ganhou ainda mais força e visibilidade depois das descobertas de petróleo na “camada pré-sal”, de possível natureza microbial (Wright & Barnett 2015).

Assim, a fim de avaliar o potencial das esteiras microbianas recentes na produção de matéria orgânica, o objetivo principal deste trabalho é caracterizar a matéria orgânica, através dos proxies biogeoquímicos e palinofaciológicos, de três lagunas costeiras holocênicas no sudeste do Estado do Rio de Janeiro, estabelecendo comparação com os sedimentos superficiais lagunares.

1.1 Área de Estudo

O litoral sudeste do Rio de Janeiro é marcado pela ocorrência de uma série de lagunas costeiras holocênicas, rasas, hipersalinas e carbonáticas resultantes do microclima semiárido influenciado pelo regime de ventos e por uma zona de ressurgência (Barbieri 1984; Knoppers Bidone & Abrão 1999) (Figura 1).

A Lagoa de Araruama ($22^{\circ}50' - 22^{\circ}57'S$ e $42^{\circ}00' - 42^{\circ}44'W$) abrange 206,8 km² de área e profundidade média de 2,5 m sendo a maior e mais profunda lagoa do complexo. Apresenta salinidade de 52 ‰ e está permanentemente ligada ao oceano por um canal de 5,5km de comprimento, o canal de Itajuru (Lessa 1991; Primo & Bizerril 2002). O interior do corpo lagunar é caracterizado pela presença de extensos cordões arenosos que a subdividem parcialmente em sete pequenos bolsões, e conferem-lhe o aspecto botrioidal característico.

Localizada no centro do Distrito de Praia Seca, a Lagoa Pernambuco ($22^{\circ}55'31'' - 22^{\circ}52'02''S$ e $42^{\circ}20'21'' - 42^{\circ}17'26''W$) tem formato alongado e é constituída por uma série de bolsões separados por marnéis de salina. Apresenta área de 1,89km² com 5km de comprimento, largura máxima de 0,55km e salinidade variando de 65 a 75‰ (Primo & Bizerril 2002; Silva e Silva et al. 2007). Apresenta ligação com a laguna de Araruama através de um canal artificial com cerca de 300m de comprimento (Primo & Bizerril 2002). Dentre as lagunas satélites do complexo lagunar de Araruama, é a que possui maior ocupação humana de entorno e por isso sofre maior influência antropogênica.

A Lagoa Pitanguinha ($22^{\circ}55'42'' - 22^{\circ}56'00''S$ e $42^{\circ}20'45'' - 42^{\circ}21'30''W$), menor dentre as lagunas satélites possui área de 0,55 km², com 1,5 km de comprimento e 0,75 km de largura (Primo & Bizerril 2002). Mais de dois terços de seu perímetro é rodeado por salinas e, internamente, marnéis a segmentam em várias porções. Atualmente é considerada a mais salina dentre as lagunas do complexo com salinidade variando entre 73 e 84‰ (Silva e Silva, Damazio & Iespa 2005; Silva e Silva & Damazio 2006).

2 Material e Métodos

2.1 Amostragem

Seis pontos amostrais foram estabelecidos tendo como parâmetro principal de escolha a ocorrência de esteiras microbianas de morfologia ampla dos tipos Liso e Poligonal, sendo os pontos P1 e P2 na laguna de Araruama, P3 e P4 na laguna Pernambuco e P5 e P6 na laguna Pitanguinha (Figura 1).

As esteiras microbianas e os sedimentos imediatamente abaixo foram amostrados em tubos de PVC com 10cm de diâmetro. Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em sacos de polipropileno, identificadas e transportadas sob refrigeração.

2.2 Análises Morfológicas

Em campo as esteiras microbianas foram classificadas em morfotipos de acordo com a geometria, textura e coloração. No laboratório, foram caracterizadas quanto à presença de laminações internas e da coloração das camadas através de microscopia estereoscópica (Carvalho 2007).

2.3 Análises de Carbono Orgânico Total (COT) e Enxofre Total (S)

As análises de COT e S foram realizadas no aparelho LECO ©SC 144, após acidificação para remoção de carbonatos segundo os métodos ASTM D 4239 (ASTM 2008) e NCEA-C-1282 (United States Environmental Protection Agency-USEPA 2002).

O teor de carbonato (carbono inorgânico Total – CIT) foi obtido indiretamente pela diferença gravimétrica entre as massas da amostra original e a descarbonatada.

2.4 Determinação dos Biopolímeros

A análise de proteína (PTN) foi realizada após extração com hidróxido de sódio (NaOH 0.2N) como determinado pelo método de Hartree (1972) modificado por Rice (1982) com as concentrações registradas como equivalentes em albumina bovina. Os carboidratos (CHO) foram analisados segundo método de Gerchacov e Hatcher (1972) para utilização em sedimentos, com a concentração expressa em equivalentes de glicose. Os lipídios (LIP) foram obtidos segundo método de Marsh e Wenstein (1966) e sua concentração convertida em equivalentes de tripalmitina.

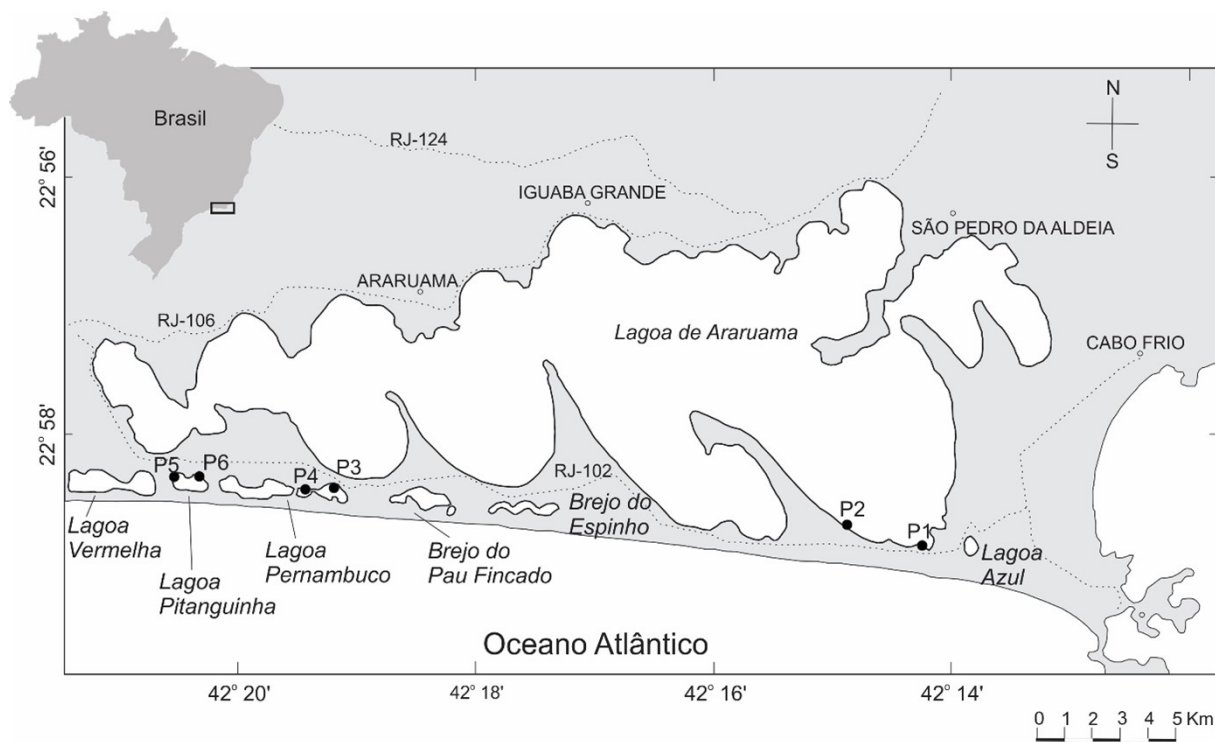


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo mostrando as três lagoas costeiras e seus respectivos pontos amostrais.

O carbono orgânico biopolimérico (BPC) foi obtido pela soma do equivalente em carbono do total de carboidratos (0,4), proteínas (0,49) e lipídios (0,75) (Fabiano, Danovaro & Frascchetti 1995).

2.5 Análise de Palinofácies

A análise palinofaciológica envolveu o isolamento da fração particulada da matéria orgânica através do procedimento padrão, não-oxidativo, descrito por e Mendonça Filho et al. (2010) e Tyson (1995).

O exame qualitativo e quantitativo dos componentes da matéria orgânica particulada, através da utilização de técnicas de Microscopia em Luz Branca Transmitida (MLBT) e Microscopia em Luz Ultravioleta/Azul Incidente (Modo Fluorescência) envolve: 1- a identificação dos grupos e subgrupos da matéria orgânica de acordo com tamanho, forma, estado de preservação e coloração de fluorescência; 2- contagem de 300 partículas em cada lâmina determinando as proporções relativas e absolutas de cada grupo como proposto por Mendonça Filho et al. (2010) e Mendonça Filho e Gonçalves (2017).

2.6 Análise Estatística

O tratamento estatístico aplicado aos dados obtidos consistiu na análise de agrupamento (cluster analysis), entre os Teores de COT, S, CIT, biopolímeros e grupos e subgrupos da matéria orgânica (modo R) e entre as amostras (modo Q) modelados pelo método Ward e distância euclidiana. As análises foram realizadas no programa Statistica versão 7.0 para Windows (Valentin 1995).

3 Resultados e Discussão

3.1 Análises Morfológicas

Os tipos morfológicos apresentaram características bem definidas. A esteira Lisa apresentou-se como um tapete contínuo recoberto o substrato, exibindo superfície totalmente plana, sem saliências ou cavidades. O tipo Poligonal apresentou-se com morfologia clássica, formando polígonos bem delimitados por bordas salientes, muitas vezes dobradas, com superfície ligeiramente rugosa e recoberta por tufo de cianobactérias. O tipo Filme, por sua vez, apresentou estrutura pouco coesa, sem formato padrão, superfície

de textura rugosa com grãos quartzosos proeminentes e recobertos por fina camada de carbonato de cálcio.

Internamente apresentaram-se subdivididas em camadas de colorações diferentes. As esteiras Poligonal e Lisa apresentaram uma camada superior verde, seguida de uma intermediária avermelhada e uma mais profunda com coloração variando entre cinza e o negro. O tipo Filme, por sua vez, apresentou apenas as duas primeiras, verde e vermelha. Subdividindo estas camadas coloridas, lâminas carbonáticas se alternaram com o biofilme e a matéria orgânica mostrando-se em geral bem finas, em média 0,98mm, com pontos de descontinuidade e maior número na última camada, cinza. As esteiras Poligonais das lagoas Pernambuco e Pitanguinha apresentaram o maior número destas lâminas carbonáticas (Tabela 1).

O posicionamento e a geometria das morfologias Lisa (1S1 e 1S7), Poligonal (1S5, 1S7 e 1S9) e Filme (1S11) concordam com as características tipológicas definidas originalmente por Golubic (1976) e Horodyski, Bloeser e Vonder Haar (1977) e se assemelham com as já descritas para estas e outras lagunas hipersalinas brasileiras (Iespa & Silva 2005; Silva e Silva & Carvalho 2005; Silva e Silva et al. 2004; Silva e Silva, Iespa e Damazio 2006).

A esteira Lisa (1S3) se diferenciou das outras por apresentar-se muito friável, ser composta de grãos quartzosos de areia fina e não apresentar lâminas carbonáticas em seu interior. Devido a sua estrutura estar suportada por grãos arenosos esta esteira poderia ser classificada como do tipo Filme (Carvalho 2007; Iespa 2006). No entanto, ela se diferencia deste tipo por não estar inserida no mesmo horizonte do sedimento, mas formando uma camada uniforme que se desenvolve sobre este, como um grande tapete, classificada então como tipo Lisa.

Os sedimentos superficiais lagunares foram caracterizados por grãos quartzosos tamanho areia média a fina variando de sub arredondados a subangulosos e condizem com os descritos por Primo e Bizerril (2002).

3.2 Análises de COT, S e CIT

Os valores de COT, S e CIT nos sedimentos superficiais foram de 0,33-3,10%; 0,04 - 0,21% e 4 - 21%, respectivamente com os valores máximos registrados nas amostras 1S6 e 1S10. Nas esteiras estes percentuais foram maiores, variando de 1,72 - 8,60%, 0,11 - 0,50% e 15 - 77% com valores mais altos registrados para amostras 1S5 e 1S9 (Tabela 2).

Tabela 1 Descrição dos pontos amostrais e amostras de Esteiras microbianas.

Descrição do Ponto	Descrição amostra								Espes. total (mm)
	Tipo de amostra	Estrato Verde		Estrato Vermelho		Estrato Marrom			
		Espes. (mm)	Lâmina Carb. (mm)	Espes. (mm)	Lâmina Carb. (mm)	Espes. (mm)	Lâmina Carb. (mm)		
Lagoa de Araruama	P1 Piscina temporária	1S1 Esteira Lisa	3,55	Descontínua <1	5,95	Ausente	5,48	Ausente	14,98
	P2 Margem Lagoa	1S3 Esteira Lisa	5,3	Ausente	6,4	Ausente	28,8	Ausente	40,5
Lagoa Pernambuco	P3 Piscina artificial	1S5 Esteira Poligonal	2,7	Descontínua <1	3,4	Fina descontínua <1	24,6	Finas descontínuas <1; contínua definida 1,6	30,8
	P4 Margem Lagoa	1S7 Esteira Lisa	3,45	Descontínua < 1	2,5	Fina descontínua <1	32,8	Finas descontínuas <1	40,7
Lagoa Pitanguiinha	P5 Piscina artificial	1S9 Esteira Poligonal	2,4	Bem definida 1,2	2,9	Fina descontínua <1	27,9	Finas descontínuas <1	33,2
	P6 Margem Lagoa	1S11 Esteira Filme-	2,3	Fina definida <1	3,7	Fina bem definida <1	14,6	Finas descontínuas <1	20,6

Tabela 2 Resultados dos proxies biogeoquímicos aplicados as esteiras microbianas e sedimentos (Lipídios (LIP), Proteínas (PTN), Carboidratos (CHO), Carbono Biopolimérico (BPC), Carbono Orgânico Total (COT), Enxofre Total (S), Carbono Inorgânico Total (CIT)).

Amostras		COT (%)	S (%)	CIT (%)	BPC (Cmg g ⁻¹)	LIP (Cmg g ⁻¹)	PTN (Cmg g ⁻¹)	CHO (Cmg g ⁻¹)	CHO/COT	FITO	AMORFO		PALINO	
											MOA	EPS		
Araruama	P1	1S1 – Est.Polig.	6,13	0,39	29	48,48	0,29	3,2	45,0	0,18	2,02	13,12	80,37	4,49
		1S2 – Sedim.	0,33	0,05	6	6,62	0,36	0,2	6,1	0,46	3,15	26,52	64,92	5,41
	P2	1S3 – Est. Lisa	1,72	0,11	15	9,60	0,58	1,7	7,3	0,11	0,56	3,39	94,34	1,71
		1S4 – Sedim.	0,46	0,06	10	2,71	0,37	0,3	2,1	0,11	2,48	10,68	73,73	13,11
Pernambuco	P3	1S5 – Est.Polig	8,58	0,46	77	35,69	0,22	3,6	31,8	0,09	2,86	12,29	78,79	6,06
		1S6 – Sedim.	1,10	0,10	21	4,53	0,21	1,0	3,3	0,08	2,20	59,42	34,88	3,50
Pernambuco	P4	1S7 – Est. Lisa	7,40	0,39	75	17,77	0,22	3,2	14,3	0,05	1,14	11,42	86,24	1,20
		1S8 – Sedim.	0,38	0,04	4	3,64	0,27	1,7	1,7	0,11	6,34	82,41	10,30	0,95
Pitanguiinha	P5	1S9 – Est. Polig.	8,60	0,50	60	21,06	0,31	2,7	18,0	0,05	1,46	4,94	91,13	2,44
		1S10 – Sedim.	3,10	0,21	4	3,21	0,26	0,9	2,0	0,02	2,50	23,95	67,42	6,12
	P6	1S11 – Est.Film	6,00	0,32	50	34,40	0,22	3,2	31,0	0,13	0,52	10,75	84,46	4,27
		1S12 – Sedim.	0,42	0,04	8	7,59	0,20	1,0	6,4	0,38	3,60	40,77	51,94	3,69

Nos ambientes aquosos uma relação entre o conteúdo de COT e S costuma ser encontrada. A MO metabolizável, disponível para a redução do SO_4^{2-} pelas bactérias, incrementa a quantidade total de matéria orgânica depositada na interface água-sedimento, frequentemente fazendo com que a quantidade de S seja correlacionada positivamente com COT. Assim existe uma correlação entre o COT e S que reflete mudanças no ambiente de sedimentação, a razão C/S. Os valores da razão C/S acima de 3 indicam ambientes oxidantes, já abaixo indicam ambientes redutores (Bernner 1995; Borrego et al. 1998). Em ambos os tipos de amostras, esteiras microbianas e sedimentos a razão C/S foi muito superior a 3, variando de 6-18, indicando que processos de oxidação são predominantes nos sedimentos.

Os valores elevados de COT encontrados nas esteiras microbianas se devem a atividade metabólica atuante que é baseada, principalmente, na fotoautotrofia. Uma esteira de aproximadamente 3mm pode apresentar taxa de produtividade tão alta quanto $14,96 \text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ (Bender & Philips 2004). Os valores de COT encontrados foram muito semelhantes aos encontrados para as esteiras microbianas de Al Qanadir, em média 8,4% (Alsharhan & Kendall 2003).

O COT também esteve relacionado positivamente aos teores de CIT (Tabela 2). Os teores mais elevados de S e CIT nas esteiras microbianas podem ser justificados pela atividade do consórcio bacteriano, onde as bactérias sulfato redutoras além da produção de sulfetos contribuem efetivamente para a precipitação de carbonatos (Dupraz & Visscher 2005; Dupraz et al. 2004; Franks & Stolz 2009; Vasconcelos et al. 2006).

3.3 Biopolímeros

A composição química da matéria orgânica nos sedimentos depende da natureza dos organismos contribuintes (Fabiano & Danovaro 1994) e como já esperado as concentrações dos biopolímeros (lipídios, proteínas e carboidratos) foram maiores nas esteiras microbianas, geradoras de matéria orgânica, do que nos sedimentos, receptores da matéria orgânica (Figura 2). Contudo, as relações bioquímicas foram iguais tanto para as esteiras quanto para os sedimentos: carboidratos > proteínas > lipídios, ressaltando a dominância dos carboidratos em todas as amostras seguidos das proteínas. Os Lipídios compuseram a fração biopolimérica de menor valor e foram maiores nos sedimentos do que nas esteiras.

A elevada concentração de carboidratos e proteínas encontrada nas amostras está diretamente relacionada com a produtividade primária que acrescenta biomassa às esteiras microbianas e aos sedimentos (Burdige, Skoog & Gardner et al. 2000). Os lipídios são os componentes mais

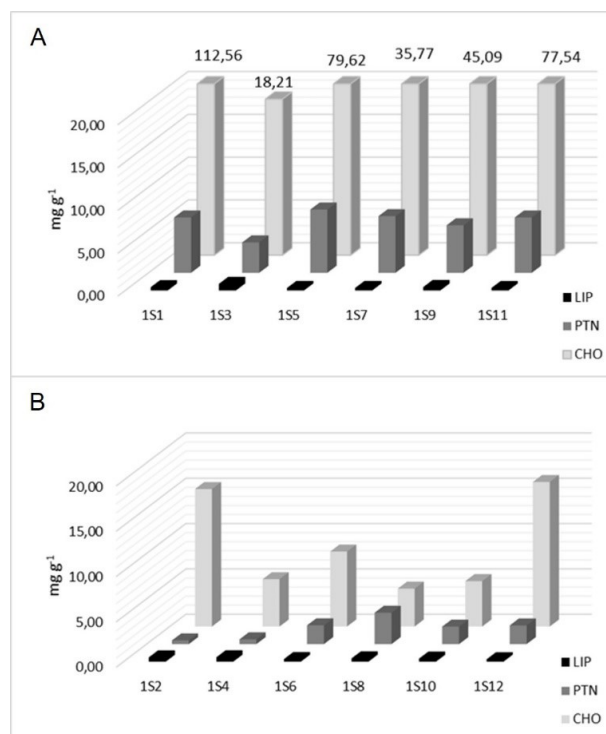


Figura 2 Concentração dos biopolímeros: A. Esteiras microbianas; B. Sedimentos

refratários da matéria orgânica acumulando-se naturalmente nos sedimentos (Danovaro, Dell'Anno e Fabiano 2001; Tyson 1995).

O carbono biopolimérico (BPC), que corresponde ao equivalente em carbono dos biopolímeros é uma ferramenta utilizada para caracterização e interpretação da origem da matéria orgânica acumulada nos sedimentos, bem como para acessar a quantidade e qualidade do que está biodisponível aos organismos (Danovaro, Fabiano & Della Croce 1993). Nas amostras o BPC variou de 9,6 – 48,5 C mg g⁻¹ para as esteiras microbianas e de 2,7 – 7,6 C mg g⁻¹ nos sedimentos (Tabela 2).

Os carboidratos foram a fração biopolimérica dominante tanto nas esteiras microbianas, quanto no sedimento, contribuindo com cerca de 75 - 92% e de 45 - 84%, respectivamente, ao BPC (Figura 3). A contribuição das proteínas variou muito entre as amostras sendo mais alta nas esteiras (6 - 18%) do que no sedimento (3 - 9%) nas amostras 1S1, 1S2, 1S3 e 1S4. O inverso foi observado nas demais amostras onde a contribuição das proteínas foram maiores nos sedimentos (13 - 46%) do que nas esteiras (9 - 18%). Na amostra de sedimento 1S8 a contribuição das proteínas e carboidratos ao BPC foi equiparada, 46 e 45%, respectivamente. Em sedimentos costeiros os valores de proteínas podem, muitas vezes, exceder a concentração

de carboidratos (Fabiano & Danovaro 1994) (Figura 3). A fração lipídica contribuiu menos, variando de 0,6 - 1,4% nas esteiras e de 2 - 13% do BPC nos sedimentos. Os valores de BPC obtidos para os sedimentos foram menores que os encontrados para os sedimentos da Lagoa Vermelha (Laut et al. 2017) (Figura 3).

A mineralização da matéria orgânica começa com a quebra dos biopolímeros em monômeros e oligômeros, que são transportados para dentro da célula bacteriana, ficando disponíveis para as reações de óxido-redução, que culminam na geração de energia, gás carbônico e água – produtos da mineralização (Fenchel, King & Blackburn 1988). Sabe-se que após incorporados aos sedimentos muito do carbono orgânico produzido é decomposto. Devido aos seus compostos nitrogenados, importantes para nutrição heterotrófica, as proteínas tendem a ser mineralizadas mais rapidamente seguidas dos carboidratos e por fim os lipídios, que tendem a se acumular (Pusceddu et al. 2010). Contudo, em sedimentos recentes valores elevados de proteínas são esperados e muitas vezes podem ultrapassar as concentrações de carboidratos (Fabiano & Danovaro 1994).

Desta maneira, seria possível de se esperar que houvesse um aumento relativo nas concentrações de lipídios nos sedimentos (Fabiano & Danovaro 1994) e redução considerável dos níveis de carboidratos e proteínas. Contudo, a manutenção das relações poliméricas e o acúmulo de proteínas nos sedimentos apontam para um elevado e frequente aporte de compostos facilmente degradados, o que possivelmente está mantendo essas relações estabilizadas.

A razão CHO:TOC é usada para distinção qualitativa da origem do material orgânico, se autóctone (oriundo da produtividade primária) ou alóctone (como efluentes

domésticos ou agricultura). De acordo com Paez-Osuna, Bojórquez-Leyva & Green-Ruiz (1998) em sistemas costeiros valores de CHO:COT <20 indicam matéria orgânica de origem natural, enquanto >20 podem estar ligados a entrada de efluentes. A razão CHO:COT encontrada apresentou valores variando de 0,97 - 3,67 nas esteiras microbianas e de 0,32 - 9,19 nos sedimentos indicando uma contribuição autóctone à produção de matéria orgânica (Tabela 2).

3.4 Análise de Palinofácies

A análise de Palinofácies permitiu verificar a ocorrência de componentes dos três grupos da matéria orgânica particulada (Fitoclasto, Amorfo e Palinomorfo) com o predomínio absoluto do grupo Amorfo em todas as amostras (Tabela 2).

O grupo Fitoclasto foi o que apresentou menor representatividade (0,52 – 6,34%) com os subgrupos Não Opacos Bioestruturados e Cutículas como os mais representativos, variando de 0,1 – 2,1% e 0,1 – 3,0%, respectivamente. Partículas do subgrupo Opaco foram consideradas raras (0,1 – 0,6%) e apresentaram dimensões pequenas, próximas do mínimo aceitável para contagem (10 µm) (Tabela 2).

Embora os percentuais de fitoclastos tenham sido maiores nos sedimentos do que nas esteiras, a baixa expressividade deste grupo já era esperada uma vez que percentagens elevadas de fitoclastos estão relacionadas normalmente a áreas próximas de fontes fluviais ou com forte influência terrígena divergindo, por isso, da característica colmatada destas lagunas (Mendonça Filho et al. 2010; Tyson 1995).

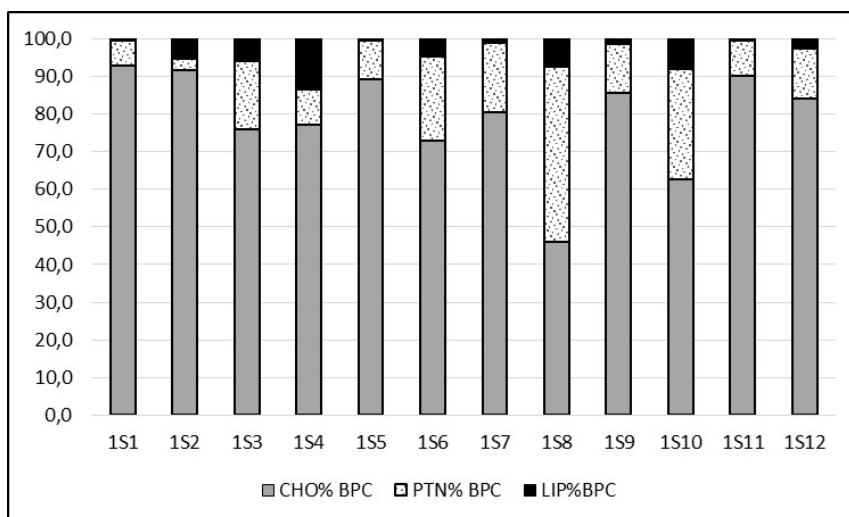


Figura 3 Percentual relativo da contribuição dos biopolímeros ao Carbono Biopolimérico (BPC). CHO: Carboidratos; PTN: Proteínas; LIP: Lipídios.

O grupo Amorfo foi predominante em todas as amostras variando de 84,42 – 97,73% confirmando a teoria de que este grupo domina a assembleia palinofaciológica nos ambientes carbonáticos (Mendonça Filho et al. 2010; Tyson 1995).

Devido à singularidade do material analisado, esteiras microbianas vivas, as partículas oriundas da atividade bacteriana foram subdivididas em duas categorias para a contagem. Partículas totalmente amorfas que ocorrem sob a forma de grumos ou dispersa, com diferentes tonalidades de marrom (MLBT), fluorescência amarelada e heterogênea (Modo Fluorescência) foram consideradas como MOA (matéria orgânica amorfa). Partículas amorfas e/ou apresentando vestígios das capsulas ou envelopes mucilaginosos das cianobactérias, incolores ou translúcidas (MLBT) e fluorescência verde ou amarelo muito intenso (Modo Fluorescência) foram consideradas ainda não totalmente retrabalhadas pelos processos de degradação bacteriana e por isso foram denominados EPS (Substância Polimérica Extracelular). O EPS produzido pelos microrganismos constituintes dos biofilmes consiste em biopolímeros altamente hidratados (incluindo polissacarídeos, proteínas, lipídios e ácidos nucleicos) contribuindo, dentre outras funções, para a imobilização e proteção dos agregados microbianos (Decho 2000; Flemming & Wingender 2010).

Os maiores valores de MOA foram registrados para os sedimentos especialmente nas amostras 1S6 (59%), 1S8 (82%) e 1S12 (40%) (Tabela 2). O EPS foi mais abundante nas esteiras microbianas variando de 78 – 94%, em relação a matéria orgânica total, assim como encontrado nas esteiras microbianas de Al Qanatir e Abu Dhabi, Emirados Árabes (Alsharhan & Kendall 2003) e para as esteiras microbianas Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro (Mota et al. 2016; Pacton, Gorin & Vasconcelos 2011).

Muito embora esses dois componentes do grupo amorfo tenham sido considerados, MOA e EPS, ambos se encaixam nas definições estabelecidas por Mendonça Filho et al. (2010) para MOAB, matéria orgânica amorfa bacteriana sendo o EPS considerado seu precursor.

O grupo Palinomorfo está representado pelos de origem terrestre, esporos e grãos de pólen, com baixos valores percentuais, apresentando o maior valor na amostra 1S4, 13% em relação da matéria orgânica total. Os raros componentes marinhos restringiram-se a algas prasinófitas, com frequência não ultrapassando 1% da matéria orgânica total, nas amostras 1S5 e 1S6.

Estes palinórfos marinhos exibem coloração de fluorescência (variando de amarelo a castanho claro) muito mais baixa que a dos outros componentes da matéria orgânica, mostrando-se degradadas e quebradas, indicando que poderiam ter sido retrabalhados dos sedimentos mais antigos pela atividade salina (Höhn, Tobschal, & Maddock 1986).

3.5 Análises de Agrupamento

A análise de agrupamento *modo-R* realizada com base nos percentuais dos grupos e subgrupos da matéria orgânica, teores de COT, S, CIT e concentração de biopolímeros definiu duas Associações de Palinofácies baseadas principalmente na origem e qualidade da matéria orgânica (Figura 4).

Na associação A reuniram-se componentes da matéria orgânica particulada, cuja composição é mais refratária como lipídios, MOA, fitoclastos e palinórfos. Na associação B foram agrupadas as variáveis relacionadas a produtividade primária representadas como PTN, CHO, EPS, bem como COT, S, CIT.

O dendrograma obtido a partir da análise de cluster *modo-Q*, revela a formação de duas Palinofácies de acordo com a abundância dos grupos e subgrupos da matéria orgânica (Figura, 5)

A **Palinofácies 1** agrupou as 7 amostras de sedimentos (1S2, 1S3, 1S4, 1S6, 1S8, 1S10 e 1S12) e ainda uma amostra de esteira microbiana da lagoa de Araruama (1S3). Foi caracterizada por baixos teores de COT (0,33-3,10%), CIT (4 a 15%), e MOA (59,4 a 26,5%). O grupo Palinomorfo, com algas prasinófitas, apresentou frequência baixa, contudo indicam um ambiente lagunar raso com alguma influência marinha.

A presença de componentes do grupo Fitoclasto, principalmente do tipo não-opaco e cutículas bem preservadas, indica uma forte proximidade da área fonte. Postula-se que o aporte destas partículas ocorra por contribuição pluvial, que arrasta material da vegetação de entorno. A alta concentração de matéria orgânica amorfa e fitoclastos, bem preservados, revela um ambiente de baixa energia, concordando com as condições de confinamento e estagnação descritos para as lagunas (Primo & Bizerril 2002; Iespa 2006).

A esteira Lisa (1S3) foi incluída nesta palinofácies devido às peculiaridades que a diferenciam das outras esteiras microbianas. Estruturalmente suportada por grãos arenosos e laminações de carbonato ausentes, essa esteira microbiana apresentou baixas concentrações biopoliméricas e baixos teores de COT, CIT e S sendo por isso caracterizada como uma esteira ainda imatura, corroborando Noffke, Gerdes e Klenke (2003) e Stal (2010). Os baixos teores de COT e CIT demonstram que apesar da matéria orgânica estar sendo produzida, muito dela é perdida. Awramik, Margulis e Barghoorn (1976) relatam que o potencial de preservação da matéria orgânica nas esteiras pode variar de quase inexistente, quando os processos de captura e adesão dos grãos minerais ocorrem sem a precipitação dos carbonatos, a elevado, quando a precipitação carbonática acompanha os processos sedimentares.

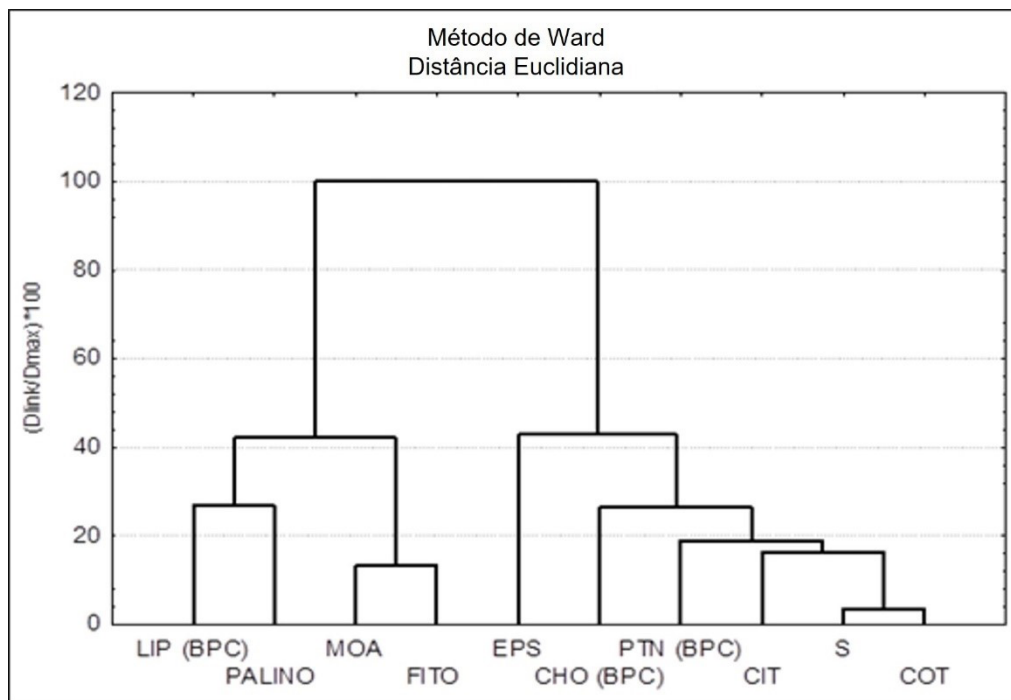


Figura 4 Dendrograma obtido pela análise de agrupamento modo-R. LIP: Lipídios; PTN: Proteínas; CHO: Carboidratos; COT: Carbono orgânico total; S: Enxofre; CIT: Carbono inorgânico total. FITO: Fitoclasto Total; MOA: Matéria orgânica amorfa; EPS: EPS total; PALINO: Palinomorfos.

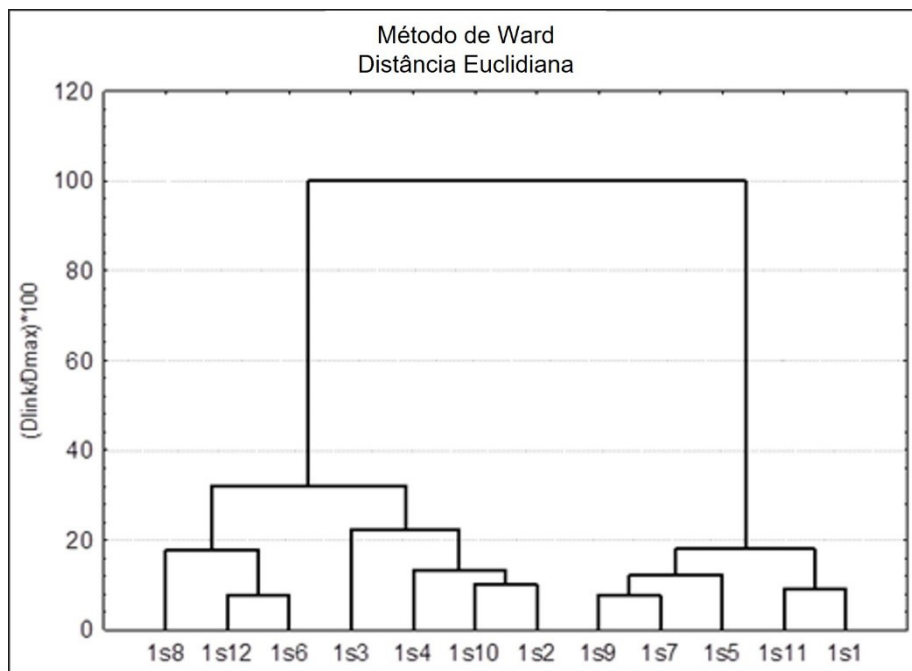


Figura 5 Dendrograma obtido pela análise em modo-Q das amostras dividindo-as em duas Palinofácies.

A *Palinofácies 2* apresentou-se exclusivamente composta pelas amostras de esteiras microbianas (IS1, IS5, IS7, IS9 e IS11) apresentando os valores mais altos de COT (6 a 8,60%), S (0,32 e 0,50%) e CIT (29 a 75%). O componente particulado predominante é o EPS (91,1 a 78,8%), corroborando os resultados de Pacton, Gorin e Vasconcelos (2011), que afirmam que a matéria orgânica das esteiras é proveniente de material algal, de alta fluorescência e relativamente bem preservado.

De acordo com a classificação de Mendonça Filho e Gonçalves (2017) a matéria orgânica particulada encontrada nas esteiras microbianas estudadas é do Tipo I. Este Tipo de matéria orgânica particulada pode ser derivada de lipídios de algas de água doce ou material derivado da produtividade primária bacteriana (matéria orgânica amorfa bacteriana – MOAB) que tem alto potencial de geração de hidrocarbonetos.

Segundo a classificação de Tyson (1995) que reúne dados de palinofácies, COT e Índice de Hidrogênio, a matéria orgânica gerada pelas esteiras microbianas pode ser do Tipo I e II. Alsharhan e Kendall (2003) encontraram querogênio tipo II para as esteiras de Al Qanatir, Golfo Pérsico e sugerem que este material tem potencial para geração de hidrocarbonetos. Franco et al. (2016) em seu experimento de hidropirólise utilizando esteiras microbianas da Lagoa Vermelha, nas temperaturas de 280°C, 330°C e 350°C, observaram que a esteira imatura possui alto potencial de geração de hidrocarbonetos líquidos lipídicos, com aumento das proteínas e diminuição dos carboidratos. Completa inversão entre carboidratos e lipídios ficou evidenciado a 350°C como reflexo do craqueamento da matéria orgânica produzida na esteira.

A geração de duas Palinofácies bem distintas demonstra que as esteiras microbianas são locais onde a matéria orgânica é produzida, inicialmente remineralizada (transformação do EPS em MOAB) e/ou exportada aos sedimentos, como ficou claramente evidenciado pela distribuição dos componentes do Grupo Amorfo e das relações biopoliméricas (Carboidratos>Proteínas>Lipídios). Contudo, essa matéria orgânica exportada aos sedimentos não está se preservando devido às características inerentes destes como granulometria na fração areia, inadequada para conservação da matéria orgânica, comprovado pelos valores de COT que não ultrapassam a média de 0,9% e da drástica redução nas concentrações de biopolímeros e do Carbono Biopolimérico. Além disso as condições oxidantes do sistema, caracterizadas pelos resultados da razão COT/S reforçam as condições de baixa preservação.

4 Conclusão

As esteiras microbianas que estão se desenvolvendo nas lagoas Araruama, Pernambuco e Pitanguinhas estão bem definidas em seus aspectos morfológicos externos e internos.

Os elevados teores de COT, S, CIT e concentração de biopolímeros indicam que essa estrutura é um sistema produtivo, que está em franca atividade, gerando consideráveis quantidades de matéria orgânica, tanto dissolvida, quanto particulada. A matéria orgânica particulada é predominantemente, composta por MOAB, derivada da produtividade primária bacteriana, que pode preservar-se no ambiente como querogênio tipo I com alto potencial de geração de hidrocarbonetos, desde que processos de precipitação carbonática acompanhem os processos sedimentares.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânica (LAFO), Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ pelo apoio de campo e infraestrutura laboratorial. Agradecem também ao Laboratório de Microbiologia Marinha, Departamento de Biologia Marinha, Universidade Federal Fluminense - UFF, pela infraestrutura laboratorial disponibilizada nas análises dos biopolímeros.

6 Referências

- Alsharhan, A.S. & Kendall, C.G.C. 2003, 'Holocene coastal carbonates and evaporites of the southern Arabian Gulf and their ancient analogues', *Earth-Science Reviews*, vol. 61, no. 3-4, pp. 191-243, DOI:10.1016/S0012-8252(02)00110-1.
- Arp, G., Hofmann, J. & Reitner, J. 1998, 'Microbial fabric formation in spring mounds ("microbialites") of alkaline Salt Lake in the badain Jaran Sand Sea, PR China', *Palaio*, vol. 13, no. 6, pp. 581-92, DOI:10.2307/3515349.
- ASTM American Society for Testing and Materials 2008, *Standard test methods for Sulfur in the analysis sample of coal and coke using high-temperature tube furnace combustion methods ASTM D 4239*, visualizado 4 Agosto 2022, <[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1123932](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1123932)>.
- Awramik, S.M., Margulis, L. & Barghoorn, E.S. 1976, 'Evolutionary processes in the formation of stromatolites', in M.R. Walter (ed.), *Stromatolites*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp. 149-62, DOI:10.1016/S0070-4571(08)71135-X.
- Barbieri, E. 1984, 'Cabo Frio e Iguaba Grande, dois microclimas distintos a um curto intervalo espacial', in L.D. Lacerda (ed.), *Restingas: Origem, estrutura e processos*, CEUFF, Niterói, pp. 3-13.

- Belkova, N.L., Zakharova, J.R., Takazi, K., Okrugin, V.M. & Parfenova, V.V. 2004, 'Fe-Si biominerals in the Vilyuchinsk hot springs, Kamchata Peninsula, Russia', *International Microbiology*, vol. 7, no. 3, pp. 193-8.
- Bender, J. & Phillips, P. 2004, 'Microbial mats for multiple applications in aquaculture and bioremediation', *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 3, pp. 229-38, DOI:10.1016/j.biortech.2003.12.016.
- Bernner, R.A. 1995, 'Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis-a comment', *Marine Chemistry*, vol. 49, pp. 121-2.
- Borrego, J., Lopez, M., Pedon, J.G. & Morales, J.A. 1998, 'C/S ratios in estuarine sediments of C/S ratios in estuarine sediments of the Odiel River-mouth, S.W. Spain', *Journal of Coastal Research*, vol. 14, no. 4, pp. 1276-86.
- Burdige, D.J., Skoog, A. & Gardner, K. 2000, 'Dissolved and particulate carbohydrates in contrasting marine sediments', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 64, no. 6, pp. 1029-41, DOI:10.1016/S0016-7037(99)00361-0.
- Canfield, D.E. & Desmarais, D.J. 1993, 'Biogeochemical cycles of carbono, sulfúrf and free oxygen in a microbial mat', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 57, no. 16, pp. 3971-84, DOI:10.1016/0016-7037(93)90347-Y.
- Carvalho, S.B.V. 2007, 'Caracterização geomicrobiológica das esteiras microbianas da laguna Vermelha (Estado do Rio de Janeiro)', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Danovaro, R., Dell'Anno, A. & Fabiano, M. 2001, 'Bioavailability of organic matter in the sediments of the Porcupine Abyssal Plain, northeastern Atlantic', *Marine Ecology Progress Series*, vol. 220, pp. 25-32, DOI:10.3354/meps220025.
- Danovaro, R., Fabiano, M. & Della Croce, N. 1993, 'Labile organic matter and microbial biomass in deep-sea sediments (Eastern Mediterranean Sea)', *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 40, no. 5, pp. 953-65, DOI:10.1016/0967-0637(93)90083-F.
- Decho, A.W. 2000, 'Microbial biofilms in intertidal systems: An overview', *Continental Shelf Research*, vol. 20, no. 10-11, pp. 1257-73, DOI:10.1016/S0278-4343(00)00022-4.
- Dupraz, C. & Visscher, P.T. 2005, 'Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats', *Trends in Microbiology*, vol. 13, no. 9, pp. 429-38, DOI:10.1016/j.tim.2005.07.008.
- Dupraz, C., Visscher, P.T., Baumgartner, L.K. & Reid, R.P. 2004, 'Microbe-mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas)', *Sedimentology*, vol. 51, no. 4, pp. 745-65, DOI:10.1111/j.1365-3091.2004.00649.x.
- Fabiano, M. & Danovaro, R. 1994, 'Composition of organic matter in sediments facing a river estuary (Tyrrhenian Sea): Relationships with bacteria and microphytobenthic biomass', *Hydrobiologia*, vol. 277, pp. 71-84, DOI:10.1007/BF00016755.
- Fabiano, M., Danovaro, R. & Frascchetti, S. 1995, 'Temporal trend analysis of the elemental composition of the sediment organic matter in subtidal sandy sediments of the Ligurian Sea (NW Mediterranean): a three years study' *Continental Shelf Research*, vol. 15, no. 11-12, pp. 1453-69, DOI:10.1016/0278-4343(94)00088-5.
- Fenchel, T., King, G.M. & Blackburn, T.H. 1988, *Bacterial biogeochemistry: the ecophysiology of mineral cycling*, Academic Press, San Diego.
- Flemming, H.C. & Wingender, J. 2010, 'The biofilm matrix', *Nature Reviews Microbiology*, vol. 8, pp. 623-33, DOI:10.1038/nrmicro2415.
- Franco, N., Mendonça Filho, J.G., Silva, T.F., Stojanović, K., Fontana, L.F., Carvalho-Gomes, S.B.V., Silva, F.S. & Furukawa, G.G. 2016, 'Geochemical characterization of the hydrous pyrolysis products from a recent cyanobacteria-dominated microbial mat', *Geologica Acta*, vol. 14, no. 4, pp. 385-401, DOI:10.1344/GeologicaActa2016.14.4.4.
- Franks, J. & Stolz, J.F. 2009, 'Flat laminated microbial mat communities', *Earth-Science Reviews*, vol. 96, no. 3, pp. 163-72, DOI:10.1016/j.earscirev.2008.10.004.
- Gerchacov, S.M. & Hatcher, P.G. 1972, 'Improved technique for analysis of carbohydrates in sediments', *Limnology and Oceanography*, vol. 17, no. 6, pp. 938-43, DOI:10.4319/lo.1972.17.6.0938.
- Giralt, S., Julia, R. & Klerkx, J. 2001, 'Microbial Biscuit of Vaterite in Lake Issyk - Kul (Republic of Kyrgyzstan)', *Journal of Sedimentary Research*, vol. 71, no. 3, pp. 430-5, DOI:10.1306/2DC40951-0E47-11D7-8643000102C1865D.
- Golubic, S. 1976, 'Organisms that build stromatolites', in M.R. Walter (ed.), *Stromatolites*, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 113-26, DOI:10.1016/S0070-4571(08)71132-4.
- Guézennec, J., Moppert, X., Raguénès, G., Richert, L., Costa, B. & Simon-Colin, C. 2011, 'Microbial mats in French Polynesia and their biotechnological applications', *Process Biochemistry*, vol. 46, no. 1, pp. 16-22, DOI:10.1016/j.procbio.2010.09.001.
- Hartree, E.F. 1972, 'Determination of proteins: a modification of the Lowry method that gives a linear photometric response', *Analytical Biochemistry*, vol. 48, no. 2, pp. 422-7, DOI:10.1016/0003-2697(72)90094-2.
- Höhn, A., Tobschal, H.J. & Maddock, J.E.L. 1986, 'Biogeochemistry of a hypersaline lagoon east of Rio de Janeiro, Brazil', *Science of the Total Environment*, vol. 58, no. 1-2, pp. 175-85, DOI:10.1016/0048-9697(86)90086-0.
- Horodyski, R.J., Bloeser, B. & Vonder Haar, S. 1977, 'Laminated algal mats from a coastal lagoon, Laguna Mormona, Baja California, México', *SEPM Journal of Sedimentary Research*, vol. 47, no. 2, pp. 680-96, DOI:10.1306/212F7220-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Iespa, A.A.C. & Silva e Silva, L.H. 2005, 'Laminitos microbianos e cianobactérias na lagoa Pernambuco, Neogeno do Rio de Janeiro, Brasil', *Geociências*, vol. 4, no. 1, pp. 5-10.
- Iespa, A.A.C. 2006, 'Estudo Geomicrobiológico da Laguna Pernambuco, Região dos Lagos (Estado do Rio de Janeiro)', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Knoppers, B.A., Bidone, E.D. & Abrão, J.J. 1999, *Environmental geochemistry of coastal Lagoon systems of Rio de Janeiro, Brazil*, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Laut, L., Martins, M.V.A., Frontalini, F., Ballalai, J.M., Belart, P., Habib, R., Fontana, L.F., Clemente, I.M.M.M., Lorini, M.L., Mendonça Filho, J.G., Laut, V.M. & Figueiredo, M.S.L. 2017, 'Assessment of the trophic state of a hypersaline-carbonatic environment: Vermelha Lagoon (Brazil)', *PLoS One*, vol. 12, no. 9, e0184819, DOI:10.1371/journal.pone.0184819.

- Lessa, G.C. 1991, 'Dinâmica de Maré e Transporte de Sedimentos no Canal de Itajuru, Araruama (RJ)', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 21, no. 4, pp. 378-86.
- Marsh, J.B. & Weinstein, D.B. 1966, 'A simple charring method for determination of lipids', *Journal of Lipid Research*, vol. 7, pp. 574-6.
- Mendonça Filho, J.G. & Gonçalves, P.A. 2017, 'The sedimentary organic matter', in I. Suárez-Ruiz & J.G. Mendonça Filho (eds), *The role of organic petrology in the exploration of conventional and unconventional hydrocarbon systems*, Bentham Science publishers, pp. 1-33.
- Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R., Mendonça, J.O., Oliveira, A.D., Carvalho, M.A., Sant'Anna, A.J. & Souza, J.T. 2010, 'Palinofácies', in I.S. Carvalho (ed.), *Paleontologia*, vol. 2, Editora Interciência, Rio de Janeiro, pp. 379-413.
- Mota, F., Carvalho-Gomes, S., Gonçalves, P., Silva, F., Mendonça Filho, J.G. & Flores, D. 2016, 'Caracterização da matéria orgânica presente em sedimentos carbonatados da Lagoa Vermelha (Rio de Janeiro, Brasil)', *Comunicações Geológicas*, vol. 103, no. 1, pp. 113-6.
- Noffke, N., Gerdes, G. & Klenke, T. 2003, 'Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic)', *Earth-Science Reviews*, vol. 62, no. 1-2, pp. 163-76, DOI:10.1016/S0012-8252(02)00158-7.
- Pacton, M., Gorin, G.E. & Vasconcelos, C. 2011, 'Amorphous organic matter - Experimental data on formation and role of microbes', *Review of Palaeobotany and Palynology*, vol. 166, no. 3-4, pp. 253-67, DOI:10.1016/j.revpalbo.2011.05.011.
- Paez-Osuna, F., Bojórquez-Leyva, H. & Green-Ruiz, C. 1998, 'Total carbohydrates: organic carbon in lagoon sediments as indicator of organic effluents from agriculture and sugar-cane industry', *Environmental Pollution*, vol. 102, no. 2-3, pp. 321-6, DOI:10.1016/S0269-7491(98)00045-1.
- Pearl, H.W., Steep, T.F. & Reid, R.P. 2001, 'Bacterially mediated precipitation in marine stromatolites', *Environmental Microbiology*, vol. 3, no. 2, pp. 123-30, DOI:10.1046/j.1462-2920.2001.00168.x.
- Prieto-Barajas, C.M., Valencia-Cantero, E. & Santoyo, G. 2018, 'Microbial mat ecosystems: Structure type, functional diversity and biotechnological application', *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 31, pp. 48-56, DOI:10.1016/j.ejbt.2017.11.001.
- Primo, P.B.S. & Bizerril, C.R.S.F. 2002, *Laguna de Araruama: Perfil do maior ecossistema lagunar hipersalino do mundo*, SEMADS, Rio de Janeiro.
- Pusceddu, A., Bianchelli, S., Canals, M., Sanchez-Vidal, A., Madron, X.D., Heussner, S., Lykousis, V., Stigter, H., Trincardi, F. & Danovaro, R. 2010, 'Organic matter sediments of canyons and open slopes of the Portuguese, Catalan, Southern Adriatic and Cretan Sea margins', *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 57, no. 3, pp. 441-57, DOI:10.1016/j.dsr.2009.11.008.
- Ramos, V.M.C., Castelo-Branco, R., Leão, P.N., Martins, J., Carvalho-Gomes, S., Silva, F.S., Mendonça Filho, J.G. & Vasconcelos, V.M. 2017, 'Cyanobacterial diversity in microbial mats from the hypersaline lagoon system of Araruama, Brazil: An in-depth polyphasic study', *Frontiers in Microbiology*, vol. 8, pp. 12-33, DOI:10.3389/fmicb.2017.01233.
- Rice, D.L. 1982, 'The detritus nitrogen problem: New observations and perspectives from organic geochemistry', *Marine Ecology Progress Series*, vol. 9, pp. 153-62.
- Rocha, L. & Borghi, L. 2017, 'Análise de Microbiofácies das Esteiras Microbianas da Lagoa Pitanguinha (Região dos Lagos, RJ, Brasil)', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 40, no. 1, pp. 191-205, DOI:10.11137/2017_1_191_205.
- Schopf, J.W. 2006, 'Fossil evidence of Archaean life', *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 361, pp. 869-85, DOI:10.1098/rstb.2006.1834.
- Silva e Silva, L.H. & Carvalho, S.B.V. 2005, 'Biolaminóides calcários holocênicos da Lagoa Vermelha, Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 28, no. 2, pp. 59-70.
- Silva e Silva, L.H. & Damazio, C.M. 2006, 'Cianobactérias em esteiras microbianas coliformes da laguna Pitanguinha, Rio de Janeiro, Brasil', *Revista Brasileira de Paleontologia*, vol. 9, no. 1, pp. 165-70.
- Silva e Silva, L.H., Damazio, C.M. & Iespa, A.A.C. 2005, 'Composição cianobacteriana em trombólitos da laguna Pitanguinha (Holoceno), Estado do Rio de Janeiro, Brasil', *GAEA*, vol. 1, no. 2, pp. 75-81.
- Silva e Silva, L.H., Damazio, C.M. & Iespa, A.A.C. 2007, 'Estudo Sedimentológico e Geomicrobiológico das Esteiras Microbianas Tipo Filme da Lagoa Pitanguinha, Região dos Lagos, Estado do Rio de Janeiro, Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 30, no. 1, pp. 67-72, DOI:10.11137/2007_1_67-72.
- Silva e Silva, L.H., Hayakawa, R.C.S., Iespa, A.A.C., Damazio, C.M., Delfino, D.O. & Lopes, F.A.S. 2007, 'Cianobactérias planctônicas da lagoa Pitanguinha, RJ, Brasil', *Revista de Biociências de Taubaté*, vol. 13, no. 1-2, pp. 63-70.
- Silva e Silva, L.H., Iespa, A.A.C. & Damazio, C.M. 2006, 'Caracterização e composição cianobacteriana das esteiras microbianas lisas da lagoa de Araruama, Rio de Janeiro, Brasil', *GAEA*, vol. 2, no. 1, pp. 18-23.
- Silva e Silva, L.H., Iespa, A.A.C. & Damazio, C.M. 2007, 'Trombólitos e cianobactérias da Laguna Pernambuco, Holoceno do Rio de Janeiro, Brasil', *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, vol. 6, no. 2, pp. 243-50.
- Silva e Silva, L.H., Senra, M.C.E., Faruolo, T.C.L.M., Carvalho, S.B.V., Alves, S.A.P.M.N., Damazio, C.M., Shimizu, V.T.A., Santos, R.C. & Iespa, A.A.C. 2004, 'Composição paleobiológica e tipos morfológicos das construções estromatolíticas da Lagoa Vermelha, RJ, Brasil', *Revista Brasileira de Paleontologia*, vol. 7, no. 2, pp. 193-8.
- Slowackiewicz, M., Whitaker, F., Thomas, L., Tucker, M.E., Zheng, Y., Gedl, P. & Pancost, R.D. 2016, 'Biogeochemistry of intertidal microbial mats from Qatar: New insights from organic matter characterisation', *Organic Geochemistry*, vol. 102, pp. 14-29, DOI:10.1016/j.orggeochem.2016.09.006.
- Stal, L.J. 2010, 'Microphytobenthos as a biogeomorphological force in intertidal sediment stabilization', *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 236-45, DOI:10.1016/j.ecoleng.2008.12.032.
- Stolz, J.F. 2000, 'Structure of microbial mats and biofilms', in R.E. Riding & S.M. Awramik (eds), *Microbial sediments*, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 1-8, DOI:10.1007/978-3-662-04036-2_1.

- Tyson, R.V. 1993, 'Palynofacies analysis', in D.J. Jenkins (ed.), *Applied micropaleontology*, Kluwer Academic Publishers, pp. 153-91.
- Tyson, R.V. 1995, *Sedimentary organic matter: Organic facies and palynofacies*, Chapman & Hall, Londres.
- United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA) 2002, *Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments*, Ecological Risk Assessment Support Center, Office of Research and Development, Las Vegas, visualizado 4 Agosto 2022, <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100S8MB.PDF?Dockey=P100S8MB.PDF>>.
- Valentin, J.L. 1995, 'Agrupamento e ordenação', in P.R. Peres-Neto, J.L. Valentin & F.A.S. Fernandes (eds), *Tópicos em tratamento de dados biológicos*, vol. 2, Oecologia Brasiliensis, Rio de Janeiro, pp. 27-55.
- van Lith, Y.V., Warthmann, R., Vasconcelos, C. & McKenzie, J.A. 2003, 'Microbial fossilization in carbonate sediments: A result of the bacterial surface involvement in dolomite precipitation', *Sedimentology*, vol. 50, no. 2, pp. 237-45, DOI:10.1046/j.1365-3091.2003.00550.x.
- Vasconcelos, C., Warthmann, R., McKenzie, J.A., Visscher, P.T., Bittermann, A.G. & van Lith, Y. 2006, 'Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern precambrian relics?' *Sedimentary Geology*, vol. 185, no. 3-4, pp. 175-83, DOI:10.1016/j.sedgeo.2005.12.022.
- Wright, V.P. & Barnett, A.J. 2015, 'An abiotic model for the development of textures in some South Atlantic early Cretaceous lacustrine carbonates', in D.W.J. Bosence, K.A. Gibbons, L.E. Heron, D.P. Morgan, W.A.T. Pritchard & B.A. Vining (eds), *Microbial carbonates in space and time: Implications for global exploration and production*, vol. 418, Geological Society, Special Publications, London, pp. 209-19.

Contribuições dos Autores

Sinda Beatriz Vianna Carvalho Gomes: conceituação; análise formal; metodologia; validação; visualização; redação – rascunho original; redação – revisão e edição. **Frederico Sobrinho da Silva:** análise formal; metodologia; validação; redação - revisão e edição. **Mírian Araújo Carlos Crapez:** análise formal; Metodologia, supervisão. **João Graciano Mendonça Filho:** conceituação; análise formal; supervisão.

Conflito de interesse

Os autores não possuem potenciais conflitos de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Todos os dados incluídos neste estudo estão disponibilizados publicamente na literatura.

Financiamento

Bolsa Doutorado CAPES.

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editora Associada

Dra. Joalice Mendonça

Como citar:

Carvalho-Gomes, S.B.V., Silva, F.S.S., Crapez, M.A.C. & Mendonça Filho, J.G. 'Potencial de Geração de Matéria Orgânica das Esteiras Microbianas com Base em Proxies Biogeoquímicos em Lagunas Hipersalinas do Rio de Janeiro, Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:49516. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_49516