



SALINIDADE E DISPONIBILIDADE DE SUBSTRATOS: IMPLICAÇÕES SOBRE A ATIVIDADE METANOGÊNICA EM DUAS LAGOAS COSTEIRAS DO NORTE FLUMINENSE

Murilo Minello^{1}, André Luiz dos Santos Fonseca², Cláudio Cardoso Marinho³ & Francisco de Assis Esteves⁴*

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro - campus Arraial do Cabo, Rua José Pinto de Macedo, s/n, CEP 28930-000, Prainha, Arraial do Cabo, RJ, Brazil.

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - campus Cabo Frio, Estrada Cabo Frio-Búzios, s/n, CEP 28909-971, Baía Formosa, Cabo Frio, RJ, Brazil.

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Biologia, Laboratório de Limnologia, Av. Brigadeiro Trompowski, s/n, CEP 21941-540, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

⁴ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade, Avenida São José Barreto, 764, CEP 27965-045, São José do Barreto, Macaé, RJ, Brazil.

E-mails: murilo.minello@ifrj.edu.br (*autor correspondente); andre.fonseca@iff.edu.br; claudiocardosomarinho@gmail.com; festeves@globo.com.

Resumo: Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos das alterações dos valores de salinidade e da disponibilidade de substratos sobre a metanogênese em duas lagoas costeiras do Norte Fluminense (lagoa Cabiúnas, de água doce à salobra, e lagoa Piripiri, de salobra à hipersalina). Para tanto, realizou-se: (1) levantamento bibliométrico na base Scopus (Elsevier) sobre o tema ‘methanogenesis’ e ‘salinity’; (2) experimentos onde alteramos as concentrações de salinidade e as concentrações de sulfato e acetato. O levantamento bibliométrico demonstrou o aumento das publicações sobre o tema ao longo do tempo, indicando uma nova tendência desse campo de pesquisa no cenário científico. Quanto à adição de NaCl, houve crescimento na produção de metano na lagoa Cabiúnas no aumento de salinidade de 0,9 para 4,0. Na lagoa Piripiri o incremento na produção de metano foi observado com aumento da salinidade de 69,1 para 155,0. Os aumentos maiores da salinidade inibiram a produção de metano na lagoa Cabiúnas e não alteraram na lagoa Piripiri. A adição de sulfato reduziu significativamente a produção de metano na lagoa Cabiúnas, enquanto a adição de acetato a fez aumentar. A adição de sulfato e acetato não alterou a produção de metano na lagoa Piripiri. Estes resultados demonstram o efeito da alteração nos valores de salinidade sobre a produção de metano em ambas as lagoas e que há competição entre a biota metanogênica e a sulfato-redutora na lagoa Cabiúnas enquanto o mesmo não ocorre na lagoa Piripiri.

Palavras-chave: acetato; metano; metanogênese; osmorregulação; sulfato.

SALINITY AND SUBSTRATE AVAILABILITY: IMPLICATIONS FOR METHANOGENIC ACTIVITY IN TWO COASTAL LAGOONS IN THE NORTH OF THE STATE OF RIO DE JANEIRO, BRAZIL: This study aimed to evaluate the effects of changes in salinity values and availability of substrates on methanogenesis in two coastal lagoons in Northern Fluminense (Cabiúnas lagoon, from fresh to brackish water, and Piripiri lagoon, from brackish to hypersaline). To this end, it was carried out: (1) a bibliometric survey on the Scopus (Elsevier) base on the theme ‘methanogenesis’ and ‘salinity’; (2) experiments where we changed the salinity concentrations and the sulfate and acetate concentrations. The bibliometric survey showed an increase in publications on the subject over time, indicating a new trend in this field of research in

the scientific scenario. As for the addition of NaCl, there was an increase in the production of methane in the Cabiúnas lagoon, with an increase in salinity from 0.9 to 4.0. In the Piripiri lagoon the increment in methane production was observed with an increase in salinity from 69.1 to 155.0. Higher increases in salinity inhibited methane production in the Cabiúnas lagoon and did not change in the Piripiri lagoon. The addition of sulfate reduced while the addition of acetate significantly increased the production of methane in the Cabiúnas lagoon. The addition of sulfate and acetate did not alter the methane production in the Piripiri lagoon. These results demonstrate the effect of the change in salinity values on methane production in both lagoons and that there is competition between methanogenic and sulfate-reducing biota in the Cabiúnas lagoon while the same does not occur in the Piripiri lagoon.

Keywords: acetate; methane; methanogenesis; osmoregulation; sulfate.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, um dos temas mais discutidos pela comunidade científica atual, estão intimamente interligadas com o ciclo do carbono. Como resultado espera-se uma mudança nos padrões de temperatura e precipitação na Terra, além da acidificação e aumento do nível dos oceanos. Com isso, os ambientes costeiros deverão ser afetados diretamente e, em muitos casos, deve haver maior contribuição da água do mar em ambientes aquáticos costeiros, alterando seus valores de salinidade (Reed 1995, Werner & Simmons 2009, Mahmuduzzaman *et al.* 2014). A salinização dos ambientes costeiros poderá representar uma grande mudança negativa para diversos organismos (Jeppensen *et al.* 2020). Os ecossistemas lagunares costeiros desempenham um importante papel no ciclo do carbono (Mcleod *et al.* 2011) e variáveis como temperatura, salinidade e diferentes fontes de carbono orgânico, podem influenciar comunidades metanogênicas (Waldron *et al.* 2007).

Em sua revisão sobre diferenças entre ambientes com distintos graus de salinidades, Odum (1988) propôs um modelo com dados hipotéticos para exemplificar a variação da emissão de gases em ambientes aquáticos com diferentes valores de salinidade. Neste modelo proposto, observa-se uma diminuição na emissão de metano com o aumento nos valores de salinidade. Isso ocorre devido ao aumento das concentrações de sulfato nos ambientes mais salobros, favorecendo a comunidade de bactérias sulfato-redutoras na competição por substrato e, conseqüentemente, a emissão de gases sulfurosos aumenta.

Muitos fatores como competição intra e

interespecíficas, distúrbios naturais ou antrópicos e respostas a estresses ambientais são importantes na abundância, distribuição e produtividade em comunidades biológicas, esperando-se o mesmo das comunidades metanogênicas (Dayton 1971, Connel 1978, Hay 1981, Paine & Levin 1981, Chen *et al.* 2020). Dentre estes fatores, a salinidade ganha destaque principalmente em ambientes lagunares costeiros, onde pode haver maior influência do mar (Xie *et al.* 2014, Zhang *et al.* 2020). O aumento da salinidade dos corpos hídricos, seja de origem antrópica ou natural, tornou-se um problema global e traz a necessidade do desenvolvimento de políticas preventivas para estes ecossistemas (O'connor *et al.* 2020). Neste contexto, esclarecer o efeito do aumento da salinidade na comunidade metanogênica tornou-se importante frente ao seu papel como produtoras de metano nestes corpos hídricos e do possível aumento do nível dos oceanos.

As bactérias sulfato-redutoras constituem um grupo de organismos com grande relevância para o ciclo do enxofre nos ecossistemas aquáticos (Castro *et al.* 2000). Essas bactérias degradam grande parte da matéria orgânica de ambientes ricos em sulfato, reduzindo-o a gás sulfídrico (H_2S) (Castro *et al.* 2000). Devido à maior afinidade por alguns substratos e maiores taxas de crescimento, as bactérias sulfato-redutoras mantêm a concentração de H_2 em níveis menores do que as Archeas metanogênicas necessitam (Lovley *et al.* 1985, Cord-Ruwisch *et al.* 1988). Conseqüentemente, a produção de metano é geralmente inibida quando há adição de sulfato no sedimento de áreas alagadas (Lovley *et al.* 1982, Baldwin & Mitchell, 2012, Fonseca *et al.* 2019). No entanto, havendo substratos suficientes, os dois processos podem ocorrer simultaneamente (Ward

& Winfrey 1985, Baldwin & Mitchell 2012, Fonseca *et al.* 2019).

Em ambientes aquáticos hipersalinos, apesar de possuírem concentrações maiores de sulfato, a competição entre estes dois grupos pode ser reduzida graças à presença de substratos não competitivos (Oren 1994). Estes substratos são oriundos de moléculas orgânicas importantes para a manutenção da osmorregulação produzidas por organismos que vivem nestes ambientes (Keltjens & Vogels 1993, Oren 1994, Munson *et al.* 1997, Thauer 1998).

Considerando-se a importância da salinidade e da disponibilidade de substratos para a metanogênese, o objetivo do presente trabalho foi investigar o efeito do estresse osmótico sobre a comunidade metanogênica e a relação entre a comunidade metanogênica e a sulfato-redutora quanto à competição por substratos em duas lagoas costeiras com diferentes valores de salinidade. Nós também compilamos a distribuição geográfica das publicações e a tendência do número de publicações sobre o tema.

MATERIAL E MÉTODOS

O levantamento bibliométrico foi realizado entre os dias 06 e 07 de fevereiro de 2021, usando o banco de dados *Scopus* (Elsevier), aplicando os seguintes filtros nas palavras-chaves, título ou abstract: “*methanogenesis*” OR “*methane*” AND “*salinity*”.

As duas lagoas, Cabiúnas (22° 17' 59" S; 41° 41' 22" W, *datum* SAD69) e Piripiri (22° 12' 40" S; 41° 29' 10" W, *datum* SAD69) localizam-se no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, Norte do Estado do Rio de Janeiro (Figura 1). Estas lagoas fazem parte do complexo fitogeográfico de Restinga, cujo cordão arenoso foi formado pelo acúmulo de sedimentos provenientes da plataforma continental, por ação das ondas e elevação e retração do nível do oceano (Muehe & Valentini 1998). Devido à diferenciação dinâmica hídrica desses ambientes, seja pela entrada de água doce, taxa de evaporação e contribuição da entrada de água do mar, estes ambientes se diferenciam quanto à concentração de sais, condutividade, valores de pH e coloração da água (Farjalla *et al.* 2001). Petruzzella *et al.* (2013) fizeram uma descrição mais precisa e completa das características limnológicas e da

concentração e produção de metano de diversas lagoas do Norte Fluminense.

A coleta de sedimento das duas lagoas consideradas neste trabalho (Cabiúnas e Piripiri) foi realizada em maio de 2003 com um amostrador de testemunho de sedimento do tipo Kajak (Limnotec®, diâmetro do tubo = 8 cm), conforme descrito por Ambühl & Bühner (1975). Os 10 cm de profundidade iniciais do sedimento foram acondicionados em sacos plásticos com fecho do tipo *zip lock* e conduzidos ao laboratório em caixas térmicas de isopor. No laboratório o sedimento foi homogeneizado e 6 g de sedimento úmido foram colocados em frascos de vidro de 25 mL. Em cada frasco foi adicionado 3 mL de água da respectiva lagoa com as alterações nas concentrações de cloreto de sódio (NaCl), sulfato de sódio (Na₂SO₄) e acetato de sódio (CH₃COONa·3H₂O) (Tabelas 1 e 2), sendo vedados com septo de borracha e lacres de alumínio (N = 15 para cada tratamento, N total = 240). A Figura 2 apresenta um esquema da coleta, preparação das amostras e do número de réplicas. Ressalta-se que este foi o primeiro experimento alterando-se os valores de salinidade, de sulfato e acetato. Com relação à salinidade, buscou-se alterar os valores em intervalos que simulassem alterações significativas tomando a lagoa de água doce, a lagoa Cabiúnas, como referência. Com isso, foram simulados quatro tratamentos, adicionando NaCl à água da lagoa e ao sedimento a ser incubado: Tratamento I, simulando a entrada de água do mar, como já registrado neste ambiente (Setubal *et al.* 2013) adicionando-se 2,93 g L⁻¹ de NaCl (0,05 M); Tratamento II, valores próximos ao da água do mar, simulando uma ressaca severa, adicionando-se 29,25 g L⁻¹ de NaCl (0,5 M); Tratamento III, adicionou-se 58,50 g L⁻¹ (1 M), estabelecendo um ponto intermediário entre os tratamentos II e IV; e, por último, no tratamento IV, adicionou-se 117,00 g L⁻¹ (2 M) fazendo com que os valores de salinidade da lagoa Cabiúnas chegassem aos valores da lagoa Piripiri. As mesmas adições de NaCl foram replicadas na incubação do sedimento da lagoa Piripiri. Cabe ressaltar a falta de outros estudos experimentais com este objetivo, tal como o trabalho de Achtnich *et al.* (1995a), que apresentaram um experimento semelhante e observaram inibição pela adição de sulfato e estímulo pela adição de acetato na metanogênese

no sedimento em uma área alagada. Portanto, decidiu-se utilizar concentrações semelhantes de sulfato e acetato para fins de comparação. Após os intervalos de tempo de 7, 15 e 30 dias, uma alíquota de 0,1 mL da atmosfera interna de cada

frasco foi retirada com auxílio de uma seringa com agulha para a determinação da concentração de metano por cromatografia gasosa (cromatógrafo Varian Star 3400, Varian Co., EUA) com detector FID a uma temperatura de 220°C, injetor a 120°C,

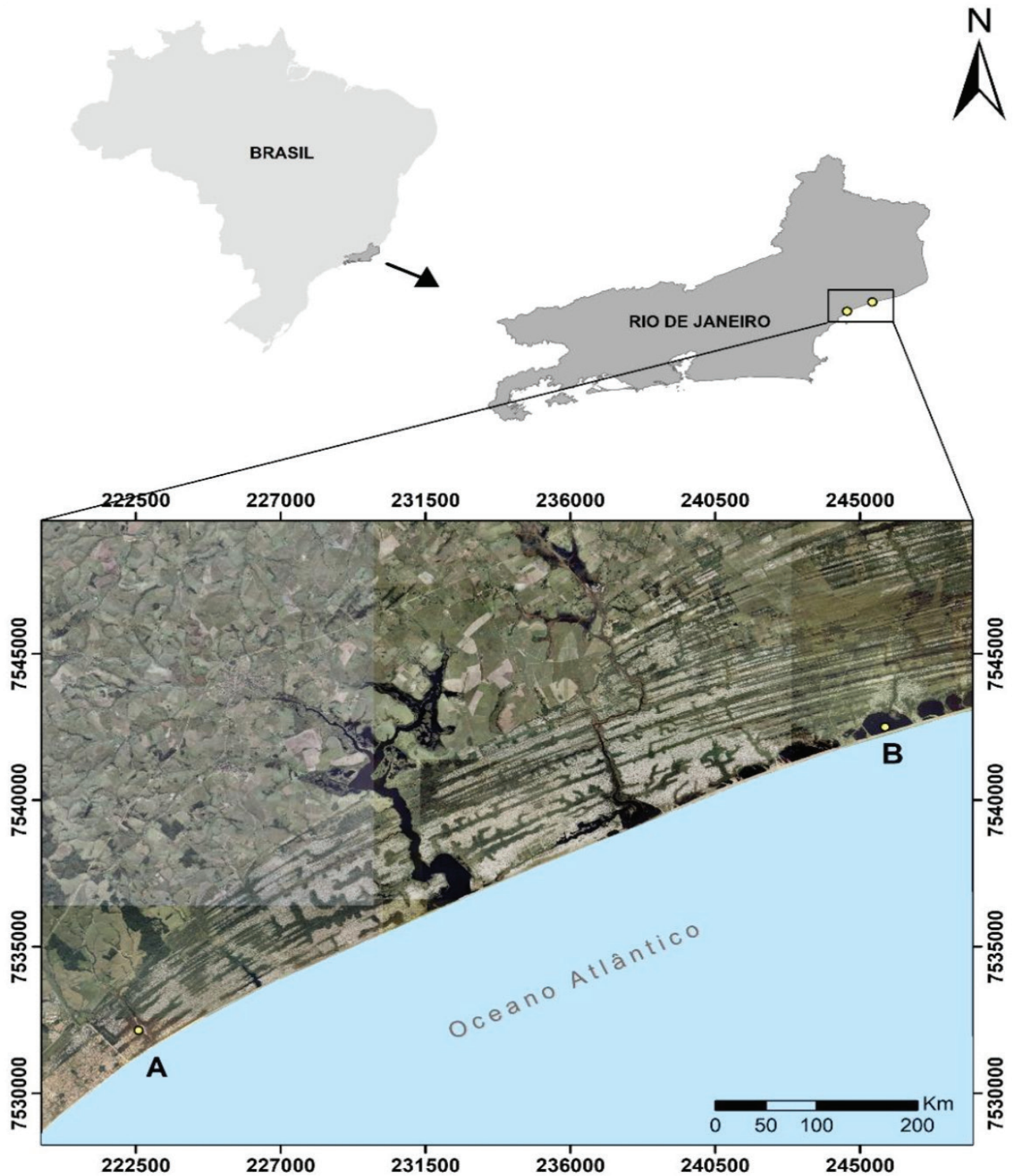


Figura 1. Localização das lagoas costeiras consideradas neste trabalho: A) lagoa Cabiúnas e B) lagoa Piripiri. Fonte: Ortofotos cedidas pelo IBGE na escala de 1/25.000 referentes ao ano de 2008.

Figure 1. Location of the coastal lagoons considered in this work: A) Cabiúnas lagoon and B) Piripiri lagoon. Source: Orthophotos provided by the IBGE on a scale of 1/25,000 referring to the year 2008.



Lagoa Cabiúnas																							
Controle			+NaCl I			+NaCl II			+NaCl III			+NaCl IV			+Sulfato			+Acetato			+Sulfato +Acetato		
7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias
[Grid of 24 columns and 10 rows of bottle icons representing samples]																							
Lagoa Piripiri																							
Controle			+NaCl I			+NaCl II			+NaCl III			+NaCl IV			+Sulfato			+Acetato			+Sulfato +Acetato		
7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias	7 dias	14 dias	30 dias
[Grid of 24 columns and 10 rows of bottle icons representing samples]																							
15 amostras para cada tratamento												120 amostras para cada lagoa, ou seja, 240 amostras ao todo.											

Figura 2. Descrição das etapas de coleta (1), preparo e incubação (2 e 3) e leitura da produção de metano através de cromatografia gasosa (4) obtidos a partir da incubação do sedimento das lagoas Cabiúnas e Piripiri. E tabelas com ao desenho do experimento, mostrando os tratamentos considerados, tempos de retirada de amostras e número de frascos usados.

Figure 2. Description of the stages of collection (1), preparation and incubation (2 and 3) and reading of the methane production through gas chromatography (4) obtained from the incubation of Cabiúnas and Piripiri sediments. And tables with the design of the experiment, showing the treatments considered, sample withdrawal times and number of bottles used.

coluna Poropak-Q de 1 m (malha 60/100) a 85°C e N₂ como gás de arraste.

Cabe destacar que os resultados não atenderam as premissas da distribuição normal mesmo após a transformação dos dados. Devido a isso, utilizou-se o teste não-paramétrico de Mann-Whitney com nível de significância de 95% para a comparação entre os resultados obtidos nos experimentos.

RESULTADOS

No levantamento bibliométrico, foram considerados os artigos publicados na base *Scopus* entre 1989 e fevereiro de 2021. Ao todo, foram encontrados 129 documentos, sendo 120 artigos originais, 1 capítulo de livro, 1 artigo de conferência e 7 artigos de revisão. Pode-se perceber um aumento considerável de artigos publicados sobre o tema nos últimos anos (Figura 3).

Dos dez artigos mais citados apontados pela análise bibliométrica (Figura 4), destacamos sete que mais se alinharam com o experimento proposto neste trabalho.

O experimento sobre a influência da adição de NaCl sobre as taxas de produção de metano indicou que a adição deste sal estimulou a produção de metano nas duas lagoas estudadas. Isso ocorreu apenas no primeiro tratamento com a menor adição de NaCl para cada lagoa, sendo 0,05 M de NaCl para a lagoa Cabiúnas e 0,50 M de NaCl para a lagoa Piripiri. O aumento de salinidade a partir do tratamento II iniciou um efeito negativo para a produção de metano na lagoa Cabiúnas e, nos tratamentos II e IV, ficou mais evidente o

efeito negativo do aumento da concentração de NaCl sobre a produção de metano nesta lagoa. O mesmo não foi encontrado para a lagoa Piripiri, onde não houve qualquer alteração na produção de metano a partir do aumento da concentração de NaCl (Figura 5).

A adição de acetato aumentou significativamente a produção de metano na lagoa Cabiúnas em cerca de 100% ($p < 0,05$), enquanto, na lagoa Piripiri, não produziu alterações ($p > 0,05$). A adição de sulfato inibiu cerca de 95% da produção de metano na lagoa Cabiúnas ($p < 0,05$), enquanto nenhuma alteração na lagoa Piripiri foi detectada ($p > 0,05$). Já o tratamento com a adição de sulfato e acetato inibiu em cerca de 78% a produção de metano na lagoa Cabiúnas ($p < 0,05$), e não alterou a produção de metano na lagoa Piripiri ($p > 0,05$).

DISCUSSÃO

Através da análise bibliométrica observou-se um crescimento no número de publicações sobre o estudo da metanogênese associada à salinidade, indicando uma nova tendência desse campo de pesquisa no cenário científico. Cabe destacar que dos 10 artigos mais citados no levantamento bibliométrico, sete abordaram o efeito da salinidade sobre a mineralização da matéria orgânica e a produção e emissão de metano (Magenheimer *et al.* 1996, Purvaja & Ramesh 2001, Treude *et al.* 2005, Dong *et al.* 2006, Waldron *et al.* 2007, Chambers *et al.* 2011, Weston *et al.* 2011), e, dentre eles não há estudos realizados no Brasil. Isso evidencia que o presente estudo está alinhado com a tendência mundial de estudos

Tabela 1. Concentrações de NaCl (tratamentos I a IV) e de sulfato e acetato utilizados no experimento para mensurar a produção de metano a partir da incubação de sedimento das lagoas Cabiúnas e Piripiri durante 7, 15 e 30 dias.

Table 1. Concentrations of NaCl (treatments I to IV) and sulfate and acetate used in the experiment to measure methane production from the sediment incubation of the Cabiúnas and Piripiri lagoons for 7, 15 and 30 days.

Trat. I	Trat. II	Trat. III	Trat. IV	sulf.	acet.	sulf. + acet
	+NaCl (g L ⁻¹)			+sulfato (mM)	+acetato (mM)	+sulfato; +acetato (mM)
2,93	29,25	58,50	117,00	10,00	1,00	10,00; 1,00

Tabela 2. Valores finais de salinidade nos tratamentos do experimento com a adição de NaCl.

Table 2. Final salinity values in the treatments of the experiment with the addition of NaCl.

Salinidade final	controle	Trat. I	Trat. II	Trat. III	Trat. IV
Lagoa Cabiúnas	0,5	4,00	35,00	65,00	130,00
Lagoa Piripiri	69,10	155,00	185,00	220,00	250,00

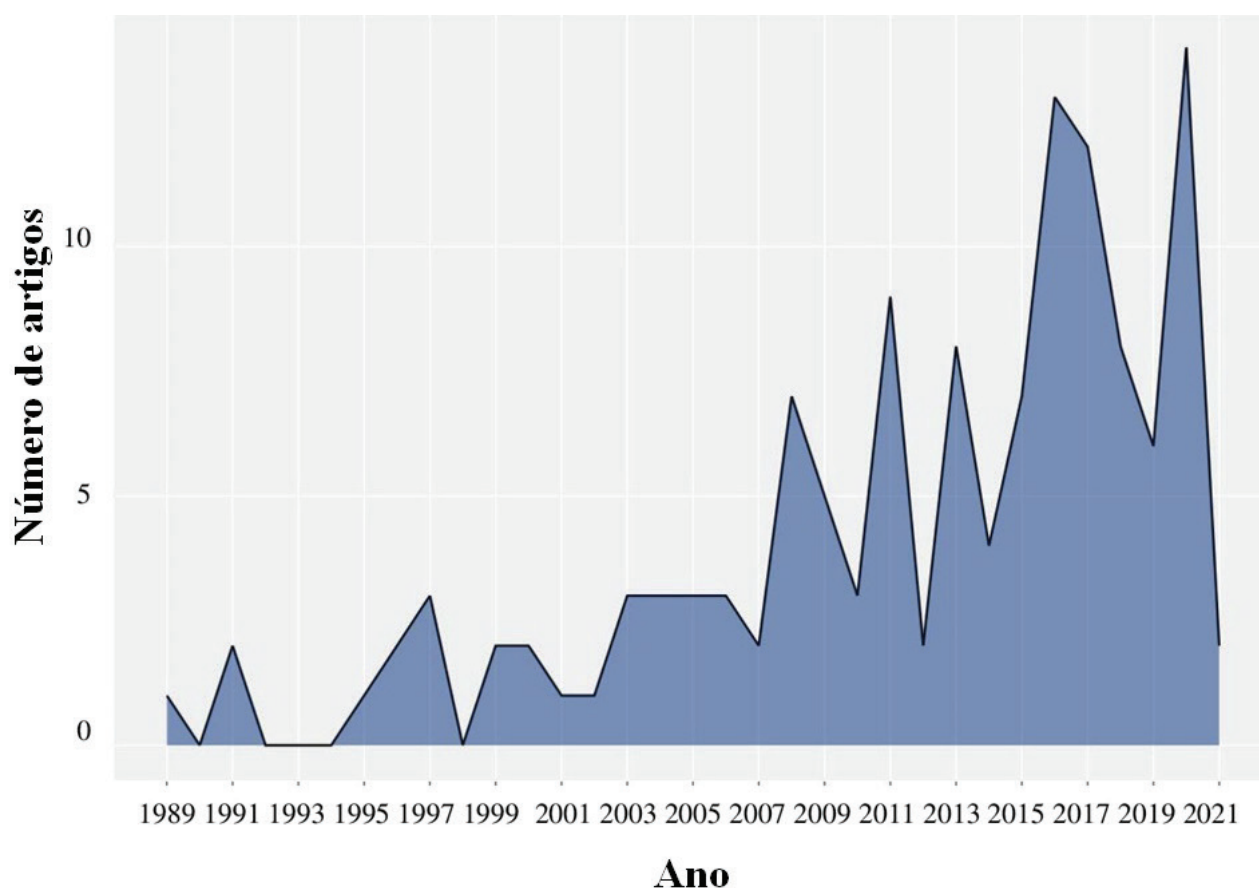


Figura 3. Número de artigos publicados na base Scopus entre 1989 e fevereiro de 2021 utilizando-se “methane”, “methanogenesis” e “salinity” como palavras de busca.

Figure 3. Number of published articles in the Scopus database between 1989 and February 2021 using “methane”, “methanogenesis” and “salinity” as search words.

que relacionam metanogênese e salinidade, e que existe uma lacuna a ser preenchida sobre o tema no Brasil. Cabe destacar dois aspectos que são particularmente importantes em estudos com essa abordagem. Primeiro, é o fato de que as áreas costeiras e os lagos são sentinelas das mudanças climáticas porque respondem rapidamente às alterações e integram informações sobre as transformações na bacia hidrográfica (Christian & Mazzilli 2007, Williamson *et al.* 2009). Segundo, que a entrada da água do mar e o aumento da matéria orgânica são elementos esperados nas mudanças climáticas globais e podem alterar a dinâmica do ciclo do metano nas áreas alagadas costeiras (Vizza *et al.* 2017).

No nosso estudo, o efeito positivo causado pelo acréscimo de NaCl no tratamento I nas duas lagoas evidenciou que o íon sódio pode ser um fator limitante para o crescimento desta comunidade nestes ambientes. Este efeito positivo também foi verificado por Perski *et al.* (1981), que observaram que a produção de metano por *Methanobacterium*

thermoautotrophicum, uma metanogênica termofílica, depende de sódio, indicando uma função específica deste cátion no metabolismo energético deste microrganismo. Smigan *et al.* (1992) também observaram que íons sódio são um pré-requisito para a formação ótima de metano pelas Archaea *Methanohalophilus halophilus*, uma metanogênica halofílica. Weston *et al.* (2011) realizaram um experimento simulando a entrada de água do mar em sedimentos de áreas alagáveis e indicaram um aumento na emissão de metano e gás carbônico. Em outro trabalho semelhante, Li *et al.* (2019) também encontraram o mesmo padrão e acreditam que o aumento da entrada de água do mar nestes ambientes poderia estimular a decomposição microbiana e acelerar a perda de carbono orgânico dos sedimentos de áreas alagáveis para a atmosfera. No entanto, no presente estudo também foi observado o efeito negativo do aumento da salinidade sobre a produção de metano na lagoa Cabiúnas a partir da concentração de 0,50 M de NaCl. Diversos

estudos apontam os efeitos negativos do aumento da salinidade sobre a produção ou emissão do metano. Liu & Boone (1991) observaram efeitos negativos sobre a taxa de crescimento de culturas de populações de Archaea metanogênicas que degradam a lignocelulose com a adição de 0,25 M de NaCl. Magenheimer *et al.* (1996) mensuraram as taxas de emissão de metano em áreas alagadas e encontraram uma correlação negativa entre fluxo de metano e salinidade. Chambers *et al.* (2011) encontraram uma correlação negativa entre a produção de metano e o aumento de salinidade em uma área alagável de água doce na Flórida, EUA. Neste artigo, os autores sugerem que as alterações pontuais de água do mar nos ambientes de água doce podem ser mais relevantes para o ciclo do carbono que um aumento gradativo do oceano. Purvaja & Ramesh (2001), encontraram uma correlação negativa entre a emissão de metano e a salinidade em áreas alagáveis costeiras não poluídas no sul da Índia. Poffenbarger *et al.* (2011) fizeram uma síntese da literatura sobre a relação entre as emissões de metano e salinidade em áreas alagadas e encontraram uma redução na emissão de metano com o aumento da salinidade. Al-haj & Fulweiler (2020) também encontraram correlação negativa entre a concentração de sais e a emissão de metano em ecossistemas costeiros. Entretanto, os autores alertam que a salinidade é um bom indicador da disponibilidade de sulfato, favorecendo a atividade sulfato-redutora em detrimento da metanogênese hidrogenotrófica e acetoclástica. Isso significa que a relação com a salinidade é indireta, pois a diminuição na produção de metano se deve mais à presença do sulfato nos ambientes salinos. Além disso, o poder preditivo entre a salinidade e a emissão de metano é fraco nos ambientes que apresentam comunidades metanogênicas metilotróficas, pois estas utilizam substratos não competitivos como o methyl-OM principalmente em áreas pouco vegetadas, em oposição aos substratos competitivos H₂, CO₂ e acetato (Lyimo *et al.* 2002, Zhuang *et al.* 2016, 2018). Portanto, podemos considerar que a salinidade apresenta dois papéis importantes no funcionamento da comunidade metanogênica. Primeiramente, o íon sódio tem importância no metabolismo das metanogênicas, contribuindo para a produção ótima de metano. Em segundo lugar, a salinidade é um fator preditor

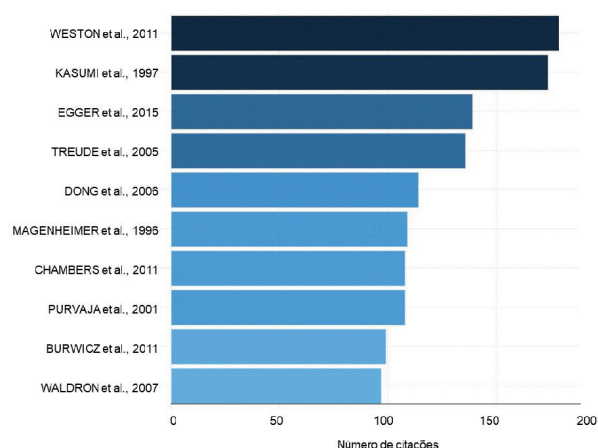


Figura 4. As publicações mais citadas a partir da pesquisa realizada na base Scopus entre 1989 e fevereiro de 2021 utilizando-se “methane”, “methanogenesis” e “salinity” como palavras de busca.

Figure 4. The most cited publications from the research carried out on the Scopus database between 1989 and February 2021 using “methane”, “methanogenesis” and “salinity” as search words.

da metanogênese e da emissão de metano em ambientes com a presença de substratos competitivos e que o mesmo não deve ocorrer em ambientes com a presença de substratos não competitivos.

Deve-se destacar os efeitos da salinidade sobre a oxidação do metano, ou metanotrofia, pois a emissão de metano está associada ao saldo entre os processos de produção e oxidação do gás. Alguns estudos destacam esta influência em mangues e regiões estuarinas (Ho *et al.* 2018, Osudar *et al.* 2017, Shiau *et al.* 2020). Os resultados apontam para diferentes respostas quanto à metanotrofia com relação à concentração de NaCl. Em geral, valores inferiores a 0,3M NaCl podem favorecer a oxidação de metano e, concentrações superiores levam a inibição da atividade metanotrófica. Outro fator relevante é a interdependência da metanotrofia com relação à metanogênese, em função da produção de metano fornecer substrato para metanotrofia (Chen *et al.* 2020).

O experimento com adição de acetato e sulfato evidenciou as diferenças entre as duas lagoas consideradas. Os tratamentos não alteraram a produção de metano na lagoa Piripiri, evidenciando que não há competição por substratos entre as comunidades metanogênica e sulfato-redutora. Nesse caso, a metanogênese pode resultar

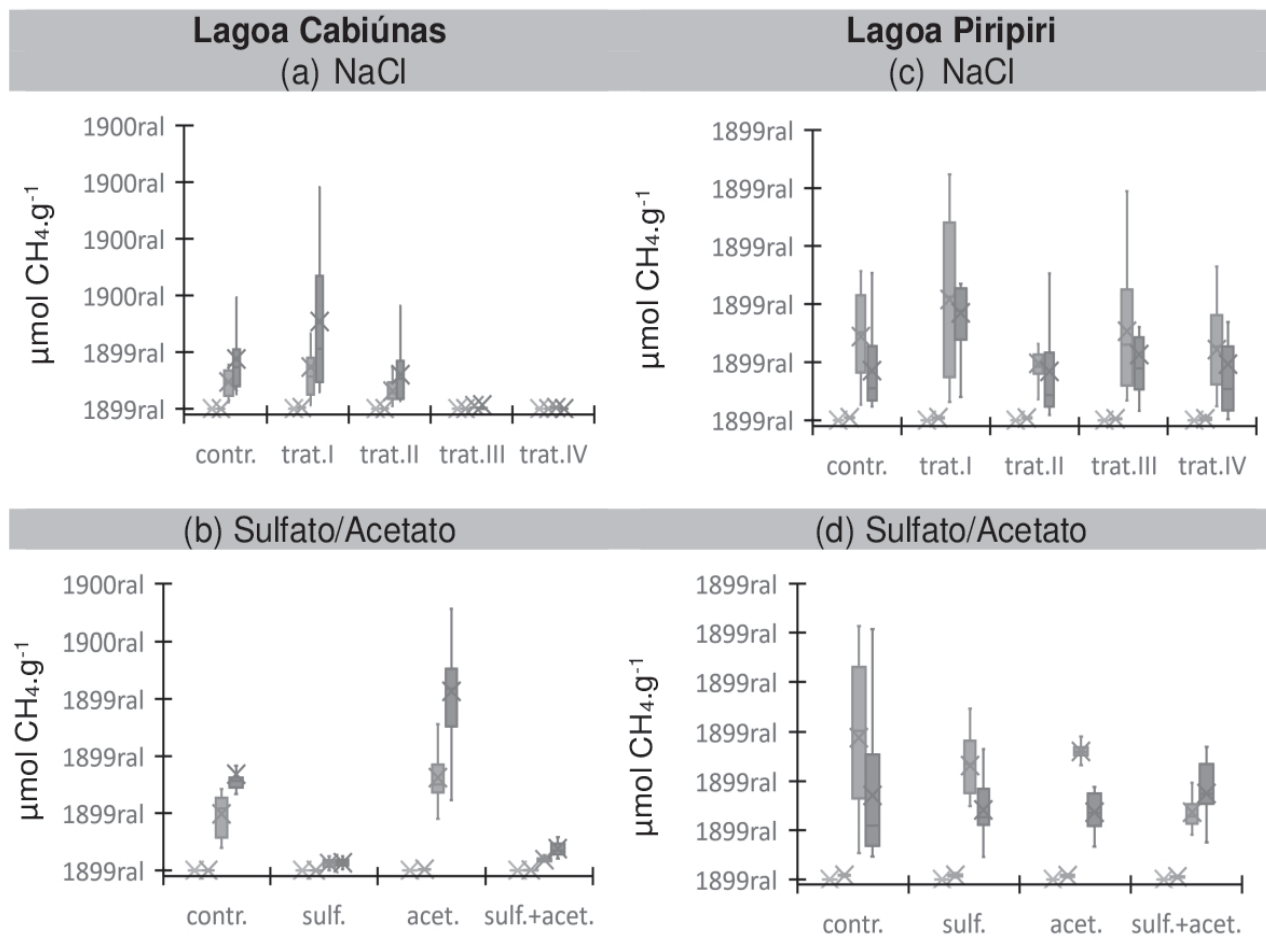


Figura 5. Produção de metano ($\mu\text{mol CH}_4\cdot\text{g}^{-1}$) a partir da incubação de amostras do sedimento das lagoas considerando os tratamentos alterando concentrações de NaCl, acetato e sulfato na seguinte ordem: Lagoa Cabiúnas – NaCl (a); Lagoa Cabiúnas – acetato e sulfato; Lagoa Piripiri – NaCl (c); Lagoa Piripiri – acetato e sulfato (d).

Figure 5. Production of methane ($\mu\text{mol CH}_4\cdot\text{g}^{-1}$) from the sediment incubation of the lagoons considering the treatments changing the concentration of NaCl, acetate and sulfate in the following order: Cabiúnas - NaCl (a); Cabiúnas - acetate and sulfate; Piripiri - NaCl (c); Piripiri - acetate and sulfate (d).

da utilização de substratos não competitivos (substratos que são consumidos apenas pelos metanogênicos), como metanol, metanotiol e metilaminas (Oremland & Polcin 1982, Kiene *et al.* 1986). Na lagoa Cabiúnas, o acetato estimulou e o sulfato inibiu a metanogênese. O estímulo da produção de metano pela adição de acetato também foi observado em estudos anteriores (Yavitt & Lang 1990, Achtnich *et al.* 1995a, Fonseca *et al.* 2019). Neste estudo, foi possível verificar que o incremento na produção de metano com a adição de acetato ocorreu preponderantemente a partir de 15 dias de incubação, apresentando uma fase lag nos primeiros dias do experimento. Uma fase lag é esperada quando outros aceptores de elétrons com um potencial redox maior estão presentes no sedimento (Achtnich *et al.* 1995b). Portanto, esse resultado indica que inicialmente

o acetato adicionado foi utilizado principalmente pelas bactérias sulfato-redutoras e que, após o esgotamento do sulfato, o acetato passou a ser utilizado pelas Arqueas metanogênicas. Esse resultado indica também que a produção de metano é limitada por acetato e que a via acetotrófica é mais importante na lagoa Cabiúnas.

A inibição da metanogênese com a adição de sulfato indica que existe competição por substratos entre metanogênicos e sulfato-redutores e ocorre limitação por sulfato para a comunidade de bactérias sulfato-redutoras na lagoa Cabiúnas. O argumento da competição por substratos foi reforçado pelo resultado de inibição intermediária (cerca de 78%) da metanogênese no tratamento com adição de sulfato e acetato simultaneamente, indicando que pode haver um balanço entre os processos conforme a

disponibilidade de acetato e sulfato varia no ambiente. Achtnich *et al.* (1995b) apontam que a degradação da matéria orgânica é sequencial, conforme os aceptores de elétrons com um potencial redox maior serão reduzidos primeiro, se as concentrações de doadores de elétrons forem limitantes no solo. Essa sequência de redução pode acarretar uma separação espacial dos processos no perfil do sedimento, conforme a separação entre os processos de sulfato-redução e metanogênese observada por Kuivila *et al.* (1989) no sedimento do lago Washington, EUA. Por outro lado, Sela-Adler *et al.* (2017) indicam a coexistência entre os dois processos em sedimentos estuarinos ricos em sulfato em Israel. A coexistência entre os processos também foi observada por Bodegom & Stams (1999) em cultivos de arroz em áreas alagadas na China. Torres-Alvarado *et al.* (2013) observaram que as variações nas taxas de metanogênese e sulfato-redução são cíclicas e controladas por flutuações sazonais do fluxo fluvial e da precipitação em lagoas costeiras no México, porém, ocorre a coexistência dos processos. Dessa forma, podemos indicar que há um balanço entre os processos de sulfato-redução e metanogênese na lagoa Cabiúnas de acordo com a disponibilidade de substratos, mas que os dois processos ocorrem simultaneamente. Fonseca *et al.* (2019) observaram uma variação espacial na disponibilidade de sulfato e carbono orgânico no sedimento na lagoa Cabiúnas, havendo maior disponibilidade de sulfato na região limnética e de carbono orgânico na região litorânea colonizada por macrófitas aquáticas. Felix (2014) observou que o tamanhos das regiões limnética e litorânea pode variar temporalmente na lagoa Cabiúnas, conforme o regime de chuvas, havendo expansão da região limnética e retração da região litorânea no período de maior precipitação e o contrário no período de estiagem. Portanto, pode haver alterações na disponibilidade de sulfato e acetato no sedimento conforme os tamanhos das regiões limnética e litorânea se expandem ou retraem na lagoa Cabiúnas.

Em um contexto de mudanças climáticas, os fatores reguladores da metanogênese seriam alterados nas lagoas costeiras. De acordo com Vizza *et al.* (2017), o aumento do nível dos oceanos decorrente de alterações climáticas pode aumentar a entrada de água do mar em

áreas alagadas costeiras. Essa maior contribuição marinha traz, em muitos casos, uma alteração na salinidade e, portanto, nas condições osmóticas dos organismos que ali vivem, e no aumento da concentração de sulfato. A alteração dos valores de salinidade pode significar grandes mudanças nos ecossistemas de água doce, colonizados por macrófitas. Nestes ambientes, a entrada de água do mar causa a mortandade dessas populações de macrófitas aquáticas que se acumulam no sedimento e podem disponibilizar grandes quantidades de matéria orgânica para a comunidade metanogênica. Por outro lado, a mudança osmótica pode causar uma redução na produção do metano como apontado no experimento. O aumento da concentração de sulfato proporcionado pela entrada de água do mar em lagoas costeiras seria mais um fator a limitar a produção de metano em ambientes dulcícolas, conforme indicam os resultados do experimento. Cabe destacar que os dois ambientes estudados estão localizados em uma mesma área de restinga e que, apesar disso, diferem bastante em suas características e respostas às alterações promovidas nos experimentos. Isso indica que as generalizações sobre os efeitos das mudanças climáticas no ciclo do metano são difíceis de alcançar. De acordo com Adrian *et al.* (2009), é importante compreender os processos internos dos diferentes tipos de lagos para seu uso eficaz como sentinelas das mudanças climáticas e os resultados apresentados neste estudo reforçam essa análise.

AGRADECIMENTOS

Neste volume especial gostaríamos de parabenizar o professor Francisco Esteves pelos seus 70 anos de vida, 50 dos quais dedicados à Limnologia brasileira e agradecer a oportunidade de participação nessa confraternização. Parabéns, Chico! O trabalho do professor Francisco Esteves foi fundamental para o desenvolvimento do NUPEM/UFRJ e para a criação do PARNA Jurubatiba. Em seu trabalho incansável, ofereceu e oferece a oportunidade de formação em Limnologia a inúmeros estudantes, muitos dos quais profissionais espalhados por diversas instituições no Brasil. Não poderíamos deixar de enaltecer a participação dessas mesmas

peças que, ao passarem pelo Laboratório de Limnologia da UFRJ, contribuíram e contribuem para o fortalecimento dos estudos das lagoas costeiras iniciados pelo professor Francisco de Assis Esteves. Gostaríamos de agradecer também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, Financiadora de Estudos e Projetos - Finep, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ e Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS pelo apoio financeiro e a toda a equipe do Laboratório de Limnologia da UFRJ e do NUPEM/UFRJ pelo apoio logístico para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Achtnich, C., Schuhmann, A., Wind, T., & Conrad, R. 1995a. Role of interspecies H_2 transfer to sulfate and ferric iron-reducing bacteria in acetate consumption in anoxic paddy soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 16(1), 61–69. DOI: 10.1016/0168-6496(94)00070-D.
- Achtnich C., Bak F. & Conrad R. 1995b. Competition for electron donors among nitrate reducers, ferric iron reducers, sulfate reducers, and methanogens in anoxic paddy soil. *Biology and fertility of soils*, 19:65–72.
- Al-Haj, A. N., & Fulweiler, R. W. 2020. A synthesis of methane emissions from shallow vegetated coastal ecosystems. *Global Change Biology*, 26(5), 2988–3005. DOI: 10.1111/gcb.15046
- Ambühl, H., & Bühner, H. 1975. Zur Technik der Entnahme ungestörter Grossproben von Seesediment: ein verbessertes Bohrlot. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 37(1), 175-186. DOI: 10.1007/BF02505185
- Baldwin, D. S., & Mitchell, A. 2012. Impact of sulfate pollution on anaerobic biogeochemical cycles in a wetland sediment. *Water Research*, 46, 965-974. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.065
- Bodegom, P. M. Van, & Stams, A. J. M. 1999. Effects of alternative electron acceptors and temperature on methanogenesis in rice paddy soils. *Chemosphere*, 39(2), 167–182. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00101-0
- Burwicz, E. B., Rüpke, L. H., & Wallmann, K. 2011. Estimation of the global amount of submarine gas hydrates formed via microbial methane formation based on numerical reaction-transport modeling and a novel parameterization of Holocene sedimentation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(16), 4562–4576. DOI: 10.1016/j.gca.2011.05.029
- Castro H. F., Williams N. H., & Ogram A. 2000. Phylogeny of sulfate-reducing bacteria. *FEMS Microbiology Ecology*, 31(1), 1–9. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2000.tb00665.x
- Chambers, L. G., Reddy, K. R., & Osborne, T. Z. 2011. Short-Term Response of Carbon Cycling to Salinity Pulses in a Freshwater Wetland. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5), 2000–2007. DOI: 10.2136/sssaj2011.0026
- Chen, S., Wang, P., Liu, H., Xie, W., Wan, X. S., Kao, S. J., Phelps, T. J., & Zhang, C. 2020. Population dynamics of methanogens and methanotrophs along the salinity gradient in Pearl River Estuary: implications for methane metabolism. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(3), 1331–1346. DOI: 10.1007/s00253-019-10221-6
- Christian, R. R., & Mazzilli, S. 2007. Defining the coast and sentinel ecosystems for coastal observations of global change. *Hydrobiologia*, 577(1), 55–70. DOI: 10.1007/s10750-006-0417-4
- Connell, J. H. 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 199(4335), 1302-1310. DOI: 10.1126/science.199.4335.1302
- Cord-Ruwisch, R., Seitz, H. J., & Conrad, R. 1988. The capacity of hydrogenotrophic anaerobic bacteria to compete for traces of hydrogen depends on the redox potential of the terminal electron acceptor. *Archives of Microbiology*, 149(4), 350–357. DOI: 10.1007/BF00411655
- Dayton, P. K. 1971. Competition, Disturbance, and Community Organization: The Provision and Subsequent Utilization of Space in a Rocky Intertidal Community. *Ecological Monographs*, 41(4), 351–389. DOI: 10.2307/1948498
- Dong, H., Zhang, G., Jiang, H., Yu, B., Chapman, L. R., Lucas, C. R., & Fields, M. W. 2006. Microbial diversity in sediments of saline Qinghai Lake, China: Linking geochemical controls to microbial ecology. *Microbial Ecology*, 51(1), 65–82. DOI: 10.1007/s00248-005-0228-6
- Egger, M., Jilbert, T., Behrends, T., Rivard, C., & Slomp, C. P. 2015. Vivianite is a major sink for phosphorus in methanogenic coastal surface sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 169, 217–235. DOI: 10.1016/j.gca.2015.09.012

- Farjalla, V. F., Faria, B. M., Esteves, F. A., & Bozelli, R. L. 2001. Bacterial density and biomass, and relations with abiotic factors, in 14 coastal lagoons of Rio de Janeiro state. *Oecologia Brasiliensis*. DOI: 10.4257/oeco.2001.0901.06
- Felix, R. W. 2014. Fluxos de metano e dióxido de carbono em lagoas costeiras húmicas: uma abordagem espaço-temporal. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2014.
- Fonseca, A. L. dos S., Marinho, C. C., & Esteves, F. A. 2019. Acetate and sulphate as regulators of potential methane production in a tropical coastal lagoon. *Journal of Soils and Sediments*, 19(5), 2604–2612. DOI: 10.1007/s11368-019-02249-y
- Hay, M. 1981. The Functional Morphology of Turf-Forming Seaweeds: Persistence in Stressful Marine Habitats. *America*, 62(3), 739–750.
- Ho, A., Mo, Y., Lee, H. J., Sauheitl, L., Jia, Z., & Horn, M. A. 2018. Effect of salt stress on aerobic methane oxidation and associated methanotrophs: a microcosm study of a natural community from a non-saline environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 125:210-214. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.07.013
- Jeppesen, E., Beklioglu, M., Özkan, K., & Akyürek, Z. 2020. Salinization Increase due to Climate Change Will Have Substantial Negative Effects on Inland Waters: A Call for Multifaceted Research at the Local and Global Scale. *The Innovation*, 1(2), 100030. DOI: 10.1016/j.xinn.2020.100030
- Kazumi, J., Caldwell, M. E., Suflita, J. M., Lovley, D. R., & Young, L. Y. 1997. Anaerobic degradation of benzene in diverse anoxic environments. *Environmental Science and Technology*, 31(3), 813–818. DOI: 10.1021/es960506a
- Kuivila, K. M., Murray, J. W., Devol, A. H., & Novelli, P. C. 1989. Methane production, sulfate reduction and competition for substrates in the sediments of Lake Washington. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2), 409–416. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90392-X
- Liu, Y., & Boone, D. R. 1991. Effects of salinity on methanogenic decomposition. *Bioresource Technology*, 35(3), 271–273. DOI: 10.1016/0960-8524(91)90124-3
- Lovley, D. R. 1985. Minimum threshold for hydrogen metabolism in methanogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 49(6), 1530–1531. DOI: 10.1128/aem.49.6.1530-1531.1985
- Lovley, D. R., Dwyer, D. F., & Klug, M. J. 1982. Kinetic analysis of competition between sulfate reducers and methanogens for hydrogen in sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 43(6), 1373–1379. DOI: 10.1128/aem.43.6.1373-1379.1982
- Lyimo, T. J., Pol, A., & Camp, H. J. M. O. Den. 2002. Methane emission, sulphide concentration and redox potential profiles in Mtoni mangrove sediment, Tanzania. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 1, 71–80.
- Magenheimer, J. F., Moore, T. R., Chmura, G. L., & Daoust, R. J. 1996. Methane and carbon dioxide flux from a macrotidal salt marsh, Bay of Fundy, New Brunswick. *Estuaries*, 19(1), 139–145. DOI: 10.2307/1352658
- Mahmuduzzaman, M., Ahmed, Z. U., Nuruzzaman, A. K. M., & Ahmed, F. R. S. 2014. Causes of Salinity Intrusion in Coastal Belt of Bangladesh. *International Journal of Plant Research*, 4(4A), 8–13. DOI: 10.5923/s.plant.201401.02
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. 2011. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552–560. DOI: 10.1890/110004
- Muehe, D., & Valentini, E. 1998. O Litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental. (Ed.), Rio de Janeiro: FEMAR: p. 123.
- Munson, M. A., Nedwell, D. B., & Embley, T. M. 1997. Phylogenetic diversity of Archaea in sediment samples from a coastal salt marsh. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(12), 4729–4733. DOI: 10.1128/aem.63.12.4729-4733.1997
- O'Connor, J. J., Fest, B. J., Sievers, M., & Swearer, S. E. 2020. Impacts of land management practices on blue carbon stocks and greenhouse gas fluxes in coastal ecosystems—A meta-analysis. *Global Change Biology*, 26(3), 1354–1366. DOI: 10.1111/gcb.14946

- Odum, W. E. 1988. Comparative ecology of tidal freshwater and salt marshes. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 19, 147–176. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.19.1.147
- Oremland, R. S., & Polcin, S. 1982. Methanogenesis and sulfate reduction: competitive and noncompetitive substrates in estuarine sediments. *Applied and Environmental Microbiology* 44, 1270–1276. DOI: 10.1128/aem.44.6.1270-1276.1982
- Oren, A. 1994. The ecology of the extremely halophilic archaea. *FEMS Microbiology Reviews*, 13(4), 415–439. DOI: 10.1016/0168-6445(94)90063-9
- Osudar, R., Klings, K.W., & Bussmann, I. 2017. Effect of salinity on microbial methane oxidation in freshwater and marine environments. *Aquatic Microbial Ecology*, 80(2), 181-192. DOI: 10.3354/ame01845.
- Paine, R. T., & Levin, S. A. 1981. Intertidal landscapes: disturbance and the dynamics of pattern. *Ecological monographs*, 51(2), 145-178. DOI: 10.2307/2937261
- Perski, H. J., Moll, J., & Thauer, R. K. 1981. Sodium dependence of growth and methane formation in *Methanobacterium thermoautotrophicum*. *Archives of Microbiology*, 130(4), 319–321. DOI: 10.1007/BF00425947
- Petruzzella, A., Marinho, C. C., Sanches, L. F., Minello, M., & Esteves, F. de A. 2013. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 25(3), 341–351. DOI: 10.1590/s2179-975x2013000300012
- Poffenbarger, H. J., Needelman, B. A., & Megonigal, J. P. 2011. Salinity influence on methane emissions from tidal marshes. *Wetlands*, 31(5), 831–842. DOI: 10.1007/s13157-011-0197-0
- Purvaja, R., & Ramesh, R. 2001. Natural and anthropogenic methane emission from coastal wetlands of South India. *Environmental Management*, 27(4), 547–557. DOI: 10.1007/s002670010169
- Reed, D. J. 1995. The response of coastal marshes to sea-level rise: Survival or submergence? *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(1), 39–48. DOI: 10.1002/esp.3290200105
- Sela-Adler, M., Ronen, Z., Herut, B., Antler, G., Vigderovich, H., Eckert, W., & Sivan, O. 2017. Co-existence of methanogenesis and sulfate reduction with common substrates in sulfate-rich estuarine sediments. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1–11. DOI: 10.3389/fmicb.2017.00766
- Setubal, R. B., Santangelo, J. M., Rocha, A. D. M., & Bozelli, R. L. 2013. Effects of sandbar openings on the zooplankton community of coastal lagoons with different conservation status. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 25(3), 246-256.
- Shiau, Y. J., Lin, C.W., Cai, Y., Jia, Z., Lin, Y. T. & Chiu, C. Y. 2020. Niche differentiation of active methane-oxidizing bacteria in estuarine mangrove forest soils in Taiwan. *Microorganisms*. 8(8): 1-15. DOI: 10.3390/microorganisms8081248
- Šmigáň, P., Rusňák, P., Greksák, M., Zhilina, T. N., & Zavarzin, G. A. 1992. Mode of sodium ion action on methanogenesis and ATPase of the moderate halophilic methanogenesis bacterium *Methanohalophilus halophilus*. *FEBS Letters*, 300(2), 193–196. DOI: 10.1016/0014-5793(92)80194-L
- Thauer, R. K. 1998. Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson: 1998 Marjory Stephenson prize lecture. *Microbiology*, 144(9), 2377-2406. DOI: 10.1099/00221287-144-9-2377
- Torres-Alvarado, M. D. R., Fernández, F. J., Ramírez Vives, F., & Varona-Cordero, F. 2013. Dynamics of the methanogenic archaea in tropical estuarine sediments. *Archaea*, 2013. DOI: 10.1155/2013/582646
- Treude, T., Krüger, M., Boetius, A., & Jørgensen, B. B. 2005. Environmental control on anaerobic oxidation of methane in the gassy sediments of Eckernförde Bay (German Baltic). *Limnology and Oceanography*, 50(6), 1771–1786. DOI: 10.4319/lo.2005.50.6.1771
- Vizza, C., West, W. E., Jones, S. E., Hart, J. A., & Lamberti, G. A. 2017. Regulators of coastal wetland methane production and responses to simulated global change. *Biogeosciences*, 14(2), 431–446. DOI: 10.5194/bg-14-431-2017
- Waldron, P.J., Petsch, S.T., Martini, A.M., & Nüslein, K. 2007. Salinity constraints on subsurface archaeal diversity and methanogenesis in sedimentary rock rich in organic matter. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(13), 4171–4179. DOI: 10.1128/AEM.02810-06

- Ward, D. M., & Winfrey, M. R. 1985. Interactions between methanogenic and sulfate-reducing bacteria in sediments. *Advances in aquatic microbiology*, 3, 141-179.
- Werner, A. D., & Simmons, C. T. 2009. Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Ground Water*, 47(2), 197–204. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x
- Weston, N. B., Vile, M. A., Neubauer, S. C., & Velinsky, D. J. 2011. Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils. *Biogeochemistry*, 102(1), 135–151. DOI: 10.1007/s10533-010-9427-4
- Williamson, C. E., Saros, J. E., Vincent, W. F., & Smol, J. P. 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54, 2273-2282. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273
- Li, X., Gao, D., & Liu, M. 2019. Composition, diversity and abundance of *Candidatus* M. oxyfera-like bacteria in response to the estuary salinity gradient. *Biogeochemistry*, 143(1), 1–14. DOI: 10.1007/s10533-019-00545-w
- Xie, W., Zhang, C., Zhou, X., & Wang, P. 2014. Salinity-dominated change in community structure and ecological function of Archaea from the lower Pearl River to coastal South China Sea. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(18), 7971–7982. DOI: 10.1007/s00253-014-5838-9
- Zhang, G., Bai, J., Tebbe, C. C., Zhao, Q., Jia, J., Wang, W., Wang, X., & Yu, L. 2020. Salinity controls soil microbial community structure and function in coastal estuarine wetlands. *Environmental Microbiology*, 23(2), 1020–1037. DOI: 10.1111/1462-2920.15281
- Zhuang, G. C., Elling, F. J., Nigro, L. M., Samarkin, V., Joye, S. B., Teske, A., & Hinrichs, K. U. 2016. Multiple evidence for methylotrophic methanogenesis as the dominant methanogenic pathway in hypersaline sediments from the Orca Basin, Gulf of Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 187, 1–20. DOI: 10.1016/j.gca.2016.05.005
- Zhuang, G.C., Heuer, V.B., Lazar, C.S., Goldhammer, T., Wendt, J., Samarkin, V. A., Elvert, M., Teske, A. P., Joye, S. B., & Hinrichs, K. U. 2018. Relative importance of methylotrophic methanogenesis in sediments of the Western Mediterranean Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 224, 171–186. DOI: 10.1016/j.gca.2017.12.024

Submitted: 30 April 2021

Accepted: 24 March 2022

Invited Associate Editors: Rayanne Setubal, Reinaldo Bozelli and Vinícius Farjalla