# LAGOAS COSTEIRAS COMO UM LABORATÓRIO NATURAL PARA O ESTUDO DO METANO: FERRAMENTA PARA O MANEJO ECOSSISTÊMICO DE CORPOS D'ÁGUA

Claudio Cardoso Marinho(UFRJ)

# Introdução

#### Metano e efeito estufa

O metano (CH<sub>4</sub>) é um dos mais importantes dos considerados gases de efeito estufa. Essa importância está associada ao aumento da sua concentração e do seu alto poder de absorção da radiação infravermelha. Resultados recentes apontam para um aumento considerável da concentração de metano na atmosfera (Figura 1)¹. Esses resultados se aproximam do pior cenário (sigla RCP8.5 – Figura 1) de emissões do IPCC (Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas). Apesar da origem dessas emissões ainda não ser totalmente clara, em função das incertezas em relação às estimativas, pode-se apontar que: (1) Um dos principais responsáveis pelo aumento da emissão de metano no mundo seria a agricultura; (2) A agricultura é seguida pelos combustíveis fósseis; (3) Na América do Sul, os corpos d'água, incluindo as áreas alagadas, lideram as emissões de metano.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> SAUNOIS, M. et al. The growing role of methane in anthropogenic climate change. Environmental Researches Letters, v. 11, p. 1-5, 2016.

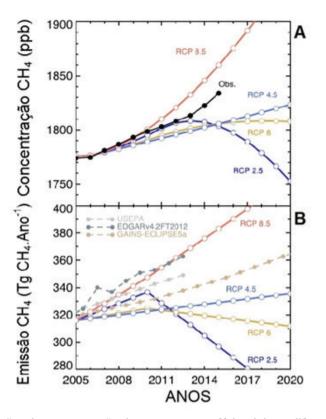


Figura 1 - Projeções da concentração de metano atmosférico (A) em diferentes cenários (RCP) e observados (Obs.). Emissão de metano (B) de origem antropogênica, em quatro cenários (siglas RCP) plotados juntos a partir de três inventários recentes (siglas EDGARv4.2FT2012, USEPA eGAINS-ECLIPSE5a)<sup>2</sup>

# Metano em ecossistemas aquáticos

A produção de metano (metanogênese), realizada por um grupo de microrganismos denominados metanogênicos, é um dos mais importantes processos de degradação da matéria orgânica (MO) em sedimentos aquáticos³. A metanogênese depende fundamentalmente da presença de substrato e de anaerobiose⁴. Nas camadas superficiais do sedimento, cerca de alguns milímetros, ocorrem os processos aeróbicos (Figura 2). Com a extinção do oxigênio, começam a ocorrer os processos anaeróbicos, como a metanogênese. O metano em aerobiose pode ser oxidado a dióxido de carbono (CO₂) por meio da ação de bactérias denominadas metanotróficas. Essas bactérias estão presentes nas camadas superficiais do sedimento ou na coluna d'água, regiões normalmente oxigenadas.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> SCHULZ, S.; CONRAD, R. Effect of algal deposition on acetate and methane concentrations in the profundal sediment of a deep lake (Lake Constance). FEMS Microbiology Ecology, v.16, p. 251-260, 1995.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> ZINDER, S. H.. Physiological ecology of methanogens. In: FERRY, J. G. (ed.). Methanogenesis. New York: London: Chapman & Hal., 1993. p. 253-303.

A emissão do metano para a atmosfera, via coluna d'água, pode ocorrer por duas vias: (1) por difusão em meio aquoso; ou (2) através da formação de bolhas. Esta última é significativamente importante quando o metano é encontrado em altas concentrações no sedimento e em ecossistemas aquáticos rasos, diminuindo a possibilidade de ocorrer oxidação na coluna d'água (Figura 3).

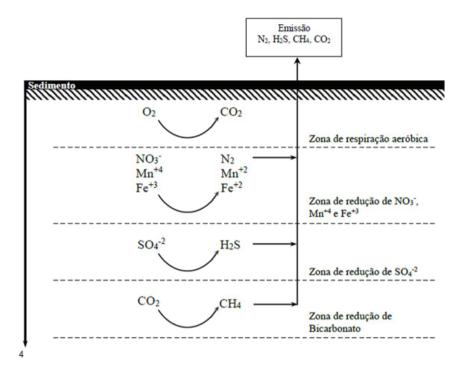


Figura 2 - Estratificação vertical das principais reações realizadas por microrganismos no sedimento de ecossistemas aquáticos<sup>4</sup>

Outro mecanismo de emissão em ambientes aquáticos consiste na liberação do metano para atmosfera via sistema lacunar das macrófitas aquáticas (Figura 3)<sup>5</sup>. A exportação direta do metano via sistema lacunar das macrófitas minimiza o efeito da metanotrofia nas regiões aeróbicas, como as camadas superficiais do sedimento e a coluna d'água. A emissão de metano via macrófitas aquáticas é muito importante, principalmente com relação a macrófitas aquáticas emersas. Essas espécies possibilitam a passagem do metano do sedimento (produção) direto para a atmosfera.

Podemos afirmar que o controle da emissão de metano para atmosfera, nos ecossistemas aquáticos, está associado a fatores como:

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> MARINHO, C. C. et al. Resultados e perspectivas sobre o estudo do metano nas lagoas costeiras da restinga de Jurubatiba e na Lagoa Imboassica na Região Norte do Estado do Rio de Janeiro. In: ROCHA, C. F. D.; ESTEVES, F. A.; SCARANO, F. R. (orgs.). Pesquisas de longa duração na restinga de Jurubatiba: ecologia, história natural e conservação. São Carlos: RiMa, 2004. cap. 16, p. 273-294.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> TYLER, S.C. The global methane budget. *In*: ROGERS, J.E.; WHITMAN (eds.). **Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases**: Methane, Nitrogen Oxides and Halomethanes. Washington, W.B.: American Society for Microbiolog, 1991. p 7-38.

- 1) Produção de metano (metanogênese);
- 2) Consumo de metano (metanotrofia);
- 3) Solubilidade desse gás associada a fatores como a salinidade e temperatura;
- 4) Variação do nível da água (pressão hidrostática);
- 5) Ação do vento;
- 6) Presença de macrófitas aquáticas.

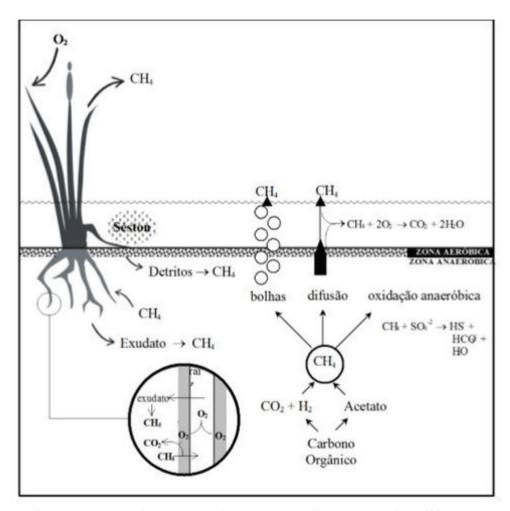


Figura 3 - Esquema dos processos de metano no sedimento e na coluna d'água nos ecossistemas aquáticos continentais. A ilustração em destaque representa os processos ocorrendo na rizosfera e no interior das raízes das macrófitas aquáticas<sup>6</sup>

<sup>6</sup> MARINHO, C. C. et al. Resultados e perspectivas sobre o estudo do metano nas lagoas costeiras da restinga de Jurubatiba e na Lagoa Imboassica na Região Norte do Estado do Rio de Janeiro, op. cit.

# Metodologias utilizadas para o estudo do metano nas lagoas costeiras do litoral norte do Rio de Janeiro

### Concentração de metano na água

Para determinação da concentração de metano na água, são utilizados seringa e frascos de vidro (**exetainers**), lacrados com septo de borracha (Figura 4). Seguem as orientações para coleta do material passo a passo:

- 1) Adicionar previamente uma quantidade equivalente a 20% (p/v) de NaCl nos frascos, fechando com septo ou tampa de plástico com septo de borracha;
- 2) No campo, com auxílio de uma seringa com agulha, retirar previamente ar do **exetainer** para "fazer vácuo";
- 3)Coletar água com seringa. Após coleta, adaptar agulha na seringa, introduzindo a amostra de água no frasco com NaCl, através do septo de borracha;
- 4) Armazenar o frasco de cabeça para baixo, evitando perda de material;
- 5) No laboratório, retirar uma alíquota da atmosfera interna e injetar num cromatógrafo gasoso para determinação da concentração de metano.

# Concentração de metano no sedimento

Coleta-se sedimento, via draga ou coletor tipo Kajak com tubo de acrílico acoplado. No caso desse último equipamento, é possível a obtenção de uma amostra sem misturar as camadas do sedimento. Após a coleta, o material pode ser transportado para o laboratório, ouse pode realizar o devido fracionamento e retirada das alíquotas no campo, de acordo com os seguintes passos (Figura 5):

- 1) Adicionar alíquotas de 5g (ou 5ml) de sedimento úmido em frascos de vidro (tipo penicilina) de 25ml;
- 2) Adicionar 5ml de hidróxido de sódio (NaOH 4%) ou solução saturada de NaCl, para inativação da atividade biológica e expulsão de CH;
- 3) Rapidamente, colocar o septo de borracha e lacre de alumínio;
- 4) Lacrar utilizando alicate apropriado;
- 5) Posteriormente, analisar o material para determinação da concentração de metano por meio de cromatografia gasosa.

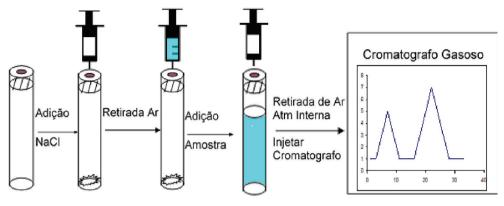


Figura 4 - Esquema representativo das etapas envolvidas na determinação da concentração de metano na água

# Produção Potencial de Metano

Para obtenção da produção potencial de metano, determina-se a concentração desse gás na atmosfera interna dos frascos (*headspace*) onde o sedimento foi incubado. Utilizando-se essa técnica, podem ser determinadas taxas potenciais de metano. Esse procedimento segue os seguintes passos (Figura 6):

- 1) Acondicionar alíquotas de 5g de sedimento úmido e 5mL de água da própria lagoa autoclavadas (ou filtradas em filtro 0,2µm) em frascos de vidro de 25mL;
- 2) Após a colocação de septo de borracha, lacrar os frascos com lacre de alumínio;
- 3) Lacrar utilizando alicate apropriado;
- 4) Realizar fluxo de gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) nos frascos para eliminação de metano residual e obtenção de anaerobiose. Devem ser utilizadas duas agulhas, uma para introdução do gás e outra para saída do excesso, evitando o aumento da pressão interna;
- 5) Manter o material em temperatura controlada (ex.: câmaras de incubação);
- 6) Determinar a concentração de metano na atmosfera interna dos frascos em períodos pré-estabelecidos;
- 7) A determinação da concentração de metano na atmosfera interna dos frascos deve ser realizada, via cromatografia gasosa, até sua estabilização ou tendência a estabilização (Figura 7).

#### Fluxo de metano do sedimento

Esse procedimento é utilizado com o objetivo de avaliar a atividade do sedimento, minimizando os efeitos provocados pela manipulação, tais como:

- 1) Mistura das frações do sedimento;
- 2) Oxigenação das frações que estavam em anaerobiose.

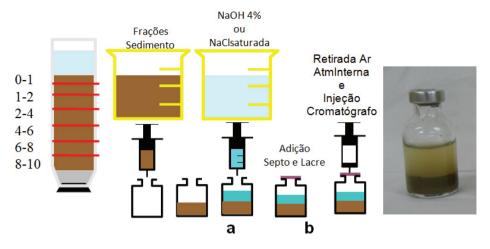


Figura 5 - Esquema representativo das etapas envolvidas na determinação da concentração de metano no sedimento (a) e foto de frasco "tipo penicilina" com amostra (b)

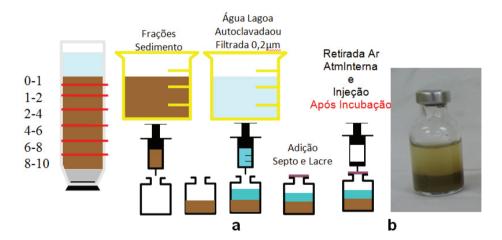


Figura 6 - Esquema representativo das etapas envolvidas na determinação da produção potencial de metano no sedimento (a) e foto de frasco "tipo penicilina" com amostra (b)

Os sedimentos são coletados em tubos de acrílico (testemunhos) de 4cm de diâmetro e 15cm de comprimento e levados para laboratório. Nesses testemunhos (Figura 8), eles são mantidos numa coluna d'água, que pode variar de alguns milímetros ou centímetros (Figura 8a) ou até preencher o restante do tubo (Figura 8b), dependo da abordagem em questão. Em alguns estudos, é necessária uma atmosfera interna; em outros, utiliza-se a água para determinação não apenas da concentração de metano, mas também de outras substâncias, como amônia, nitrato, fosfato, nitrogênio (total e dissolvido), fósforo (total e dissolvido) e carbono (total e dissolvido). Alguns sistemas apresentam mecanismos para homogeneização da água. O procedimento segue as seguintes etapas:

- Os tubos são mantidos vedados com tampa de acrílico, possuindo um septo (ou dois) de borracha, por onde alíquotas de gás são retiradas para determinação da concentração de metano na atmosfera interna;
- 2) No caso dos tubos sem atmosfera interna, ou seja, completamente preenchidos com sedimento e água, após a incubação, o septo é retirado, e, com auxílio de uma seringa com pequeno tubo, retira-se uma alíquota de água para determinação da concentração de metano como descrito anteriormente;
- 3) No caso de experimentos em anaerobiose, deve-se passar um fluxo de N<sub>2</sub> com uso de duas agulhas, uma para introdução do gás e outra para saída do excesso, evitando o aumento da pressão interna;
- 4) O metano produzido, presente na atmosfera interna do tubo, é então determinado por cromatografia gasosa.

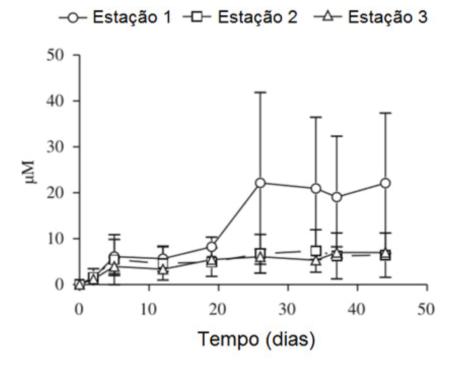


Figura 7 - Variação da concentração de metano na atmosfera interna durante o período de incubação para determinação da produção potencial de metano no sedimento<sup>7</sup>

MARINHO, C.C. et al. Effect of sediment composition on methane concentration and production in the transition zone of a mangrove (Sepetiba Bay, Rio de Janeiro, Brazil). Braz. J. Biol., v. 72, n. 3, p. 429-436, 2012.

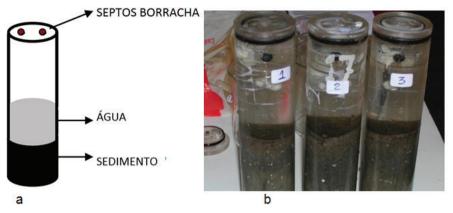


Figura 8 - Esquema (a) e Foto (b) dos tubos de acrílico (testemunhos) usados para determinação dos fluxos de metano na interface sedimento-água

#### Emissão de Metano

#### A) Meio Difusivo:

Para determinação dos fluxos difusivos de gases na interface água-ar atmosférico, são utilizados métodos indiretos e diretos. O método indireto está baseado em medidas que buscam prever as taxas de emissão, pois são utilizadas equações matemáticas que explicam um modelo para difusão dos gases em que se leva em consideração, além da concentração do gás na coluna d'água, uma série de variáveis como temperatura da água e vento. Esse método, conhecido como da camada limite, pode ser descrito por meio de um modelo no qual a transferência do gás ocorre através de um sistema de duas películas, ou seja, filmes, baseado na Lei de Henry<sup>8</sup>. (Figura 9).

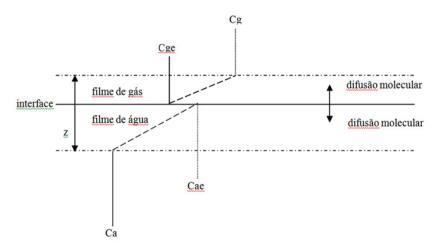


Figura 9 - Esquema modificado do fluxo de gás de acordo com o modelo de duas películas

<sup>8</sup> LISS, P.S.; SLATER, P.G. Flux of gases across the air-ser interface. **Nature**, v. 247, n. 25, 181-184, 1974.

305

Esse modelo estabelece que a interface água-ar atmosférico possui três regiões a considerar: (1) fase atmosférica; (2) fase líquida; e (3) camada limite (filme), que separa as duas camadas anteriores. O fluxo difusivo de gás na interface água-ar atmosférico pode ser dado pela equação de Fick,

$$F = D (\Delta [gás])/z$$
,

onde Dé o coeficiente de difusão na mistura;  $\Delta$  [gás] é o gradiente de concentração de gás; e z é a espessura da camada limite entre as fases. No entanto, a transferência de gases através de uma mistura heterogênea (como a interface água-ar atmosférico) ocorre em uma camada limite laminar em que o transporte é controlado pela difusão molecular. No modelo mais simples, o coeficiente de difusão é assumido ser constante durante toda a espessura da camada limite. A taxa de transferência de um gás depende de dois fatores principais: (1) gradiente de concentração entre a água e o ar; e (2) o coeficiente de troca gasosa para um determinado gás a uma dada temperatura, que é influenciado pela velocidade do vento.

Assim: 
$$F = k ([Ca] - [Ceq])$$

onde F é o fluxo de gás água-ar atmosférico (mol m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); k é coeficiente de troca gasosa (m dia<sup>-1</sup>); [Ca] é a concentração do gás na água (mol m<sup>-3</sup>);e [Ceq] é a concentração do gás na água quando em equilíbrio com a atmosfera sobrejacente (mol m<sup>-3</sup>). O valor de k varia de forma previsível de acordo com velocidade do vento, podendo ser estimado por relações empíricas.

Um dos métodos mais utilizados de medida direta é o da câmara flutuante, em que se determina a variação da concentração do metano dentro de uma câmara (Figura 10) na superfície do corpo d'água levando em consideração a equação descrita pelo acúmulo do gás na câmara em função do tempo, segundo inclinação da reta, ou seja, d  $C_{\text{CH4}}$  / d t. Para determinação das taxas correspondentes ao fluxo de CH4, devem ser corrigidos os valores em função do volume e da área equivalente à seção da câmara pela qual o gás difunde. Esse método permite medir variações espaciais entre diferentes estações num período de tempo relativamente curto, em função da facilidade de transporte das câmaras e da facilidade no uso. Uma das grandes desvantagens é que esse método trabalha num sistema fechado, não levando em consideração a influência da velocidade do vento no fluxo do gás.

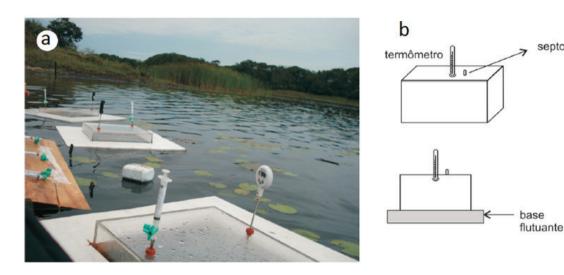


Figura 10 - (a) Foto e (b) esquema de câmaras de difusão de gasesº

#### B) Meio Ebuliente

O gás em altas concentrações no sedimento pode produzir bolhas, que, se desprendendo, podem atingir a superfície do ambiente e alcançara atmosfera. O fluxo por bolhas, ou ebulitivo, é determinado através de funis invertidos e submersos (Figura 11), onde o gás liberado sob a forma de bolhas é capturado em um frasco. Normalmente, os funis são deixados no local de coleta por aproximadamente 24 horas, e, então, os frascos são retirados e fechados hermeticamente.

A formação das bolhas no sedimento e seu desprendimento podem ser expressos pela seguinte equação:

$$p dV = -Vpgdh$$

onde V é o volume da bolha, p é densidade da água, g é aceleração da gravidade e dh é a variação da altura da coluna d'água do ecossistema em estudo¹º. Com a variação da altura da coluna d'água, pode ocorrer o desprendimento de bolhas do sedimento, por isso corpos d'água sujeitos a variações significativas de sua profundidade podem apresentar alterações expressivas dos fluxos de gases para a atmosfera através de processos ebulitivos, ou seja, pela emissão por bolhas.

<sup>9</sup> ESTEVES, F.A.; MARINHO, C.C. Carbono Inorgânico. In: ESTEVES, F.A (ed.). Fundamentos de limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 209-238.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> COELHO-PINHEIRO, M.M. Liquid phase mass transfer coeficients for bublles growing in pressure field a simplified analysis. CommunHear Mass, v. 27, p. 99-108, 2000.

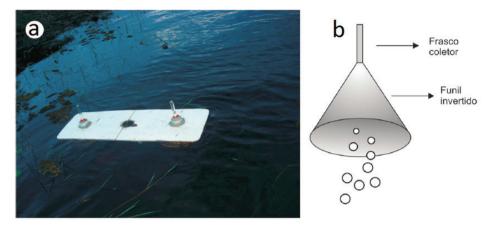


Figura 11 - (a) Foto e (b) esquema de funis invertidos11

#### C) Via macrófitas aquáticas

Para determinação da contribuição da comunidade de macrófitas aquáticas quanto à emissão de metano, utiliza-se o mecanismo via câmaras estáticas flutuantes, por meio de estruturas de acrílico como visto anteriormente (Figura 10), para espécies de menor porte, como as do tipo de folhas flutuantes, submersas enraizadas ou flutuantes (Figura 12). No caso de macrófitas emersas (Figura 12), são utilizadas estruturas de plástico transparente (Vulcan - 0,6 mm) moldadas por hastes de alumínio (Figura 13a). Pode ser utilizado um sistema de circulação de ar para homogeneização dos gases.

No caso das medidas que utilizam apenas o processo da emissão via tecido das macrófitas, são utilizadas câmaras flutuantes de acrílico, com septo de borracha (Figura 13 b e c). Em cada câmara de incubação é inserida aproximadamente a mesma quantidade de rametes de planta, sendo posteriormente determinada a biomassa e/ou a área foliar dos rametes em laboratório.

## Estudo sobre metano nas lagoas costeiras do litoral Norte do Rio de Janeiro

# Estrutura, Funcionamento e Impactos Antrópicos

As lagoas costeiras são ecossistemas que apresentam grande importância para o ser humano em função de uma série de serviços proporcionados, entre os quais: lazer, controle de inundações, recepção de esgoto doméstico e rejeito industrial, beleza cênica e harmonia paisagística, podendo valorizar a região geográfica em que se encontram<sup>12</sup>. Apesar de serem encontradas em toda costa brasileira, sua presença se destaca nos estados do Rio de Janeiro e do Rio Grande do Sul.

<sup>11</sup> ESTEVES; MARINHO, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> ESTEVES, F. A. Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo. In: ESTEVES, F. A. (ed.). Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé, RJ. Rio de Janeiro: NUPEM; UFRJ, 1998. cap. 2, p. 63-87.

Figura 12 - Principais grupos ecológicos de macrófitas aquáticas<sup>13</sup>

septo de borracha
tubo de acrílico
orificio para
passagem dos
rametes

base flutuante

Figura 13 - Foto (a)<sup>14</sup> e esquema (b) de estrutura utilizada para determinação da emissão de metano via tecido de planta

308

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> GRIPP, A.R. Variação Diária da Emissão de Metano por uma Lagoa Costeira Tropical durante o Verão: Avaliação do Potencial de Emissão pelos Fluxos Ebulitivo, Difusivo e via Macrófitas Aquáticas. 2011. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Em função de sua localização geográfica, as lagoas costeiras estão sujeitas a uma série de impactos antrópicos, como¹5:

- 1) Lançamento de esgoto doméstico e/ou industrial;
- 2) Aterro de suas margens;
- 3) Assoreamento da bacia hidrográfica;
- 4) Retirada de areia e depósitos calcários;
- 5) Degradação da vegetação terrestre no entorno da lagoa costeira ou ao longo de seus tributários:
- 6) Introdução de espécies de peixes exóticos;
- 7) Edificação nas suas margens;
- 8) Aberturas artificiais da barra de areia que separa a lagoa do mar.

Além disso, são ecossistemas extremamente importantes quanto à sua diversidade, com características bastante distintas quanto à dimensão, morfologia, salinidade e coloração da água. Um bom exemplo são as lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro, que apresentam uma elevada heterogeneidade espacial e temporal<sup>16,17</sup>.

Dependendo da origem da lagoa e do tamanho da barra de areia que a separa do mar, esses ecossistemas estão sujeitos a diferentes aportes de sais. A variação dos valores de salinidade nas lagoas costeiras depende da pluviosidade local, taxa de evaporação, entrada de água do mar pelas ressacas ou pela percolação pela barra de areia e "spray" marinho. Como exemplo desses eventos, podemos destacar as lagoas Cabiúnas (ou Jurubatiba) e Peri peri. A lagoa Cabiúnas possui um afluente (rio Cabiúnas), enquanto a lagoa Peri peri depende exclusivamente da entrada de água do mar ou entrada de água da chuva (figura 14).

Além disso, outra possibilidade de alteração dos valores de salinidade desses ecossistemas ocorre via abertura da barra de areia, fenômeno que ocorre tanto de forma natural como antrópica. No caso de uma ação antrópica, a abertura da barra de areia ocorre para diminuir o seu nível d'água, em função de eventos de enchente nas residências ou vias públicas localizadas às margens das lagoas, ou ainda para possibilitar a entrada de peixes com maior interesse pesqueiro<sup>18</sup>.

Em geral, as comunidades de macrófitas aquáticas são encontradas nas lagoas costeiras. Essa ocorrência é justificada, pois as lagoas costeiras são ecossistemas rasos e pequenos, possibilitando a formação de extensas regiões litorâneas, que podem ser colonizadas por diferentes comunidades de macrófitas aquáticas (Figura 12). Nesses ecossistemas, essas plantas encontram condições tão favoráveis para seu desenvolvimento que tornam a região litorânea o compartimento mais produtivo do ecossistema, podendo influenciar o ambiente lacustre como um todo, além de alterarem de forma significativa a estrutura do sedimento<sup>19,20,21</sup>. Outro fator importante em relação a essas comunidades

<sup>15</sup> ESTEVES, F. A. Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> ENRICH'PRAST, A.; MEIRELES, F.; ESTEVES, F.A. Lagoas Costeiras da Restinga de Jurubatiba. In: ROCHA, C.F.D.; ESTEVES, F.A.; SCARANO, F.R. (eds.) Pesquisas Ecológicas de Longa Duração na Restinga de Jurubatiba: Ecologia, História Natural e Conservação. São Paulo: RIMA, 2004. p. 245-254.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> CALIMAN, A. et al. Temporal coherence among tropical coastal lagoons: a search for patterns and mechanisms. Braz. J. Biol., v. 70, n. 3 supl., p. 803-814, 2010.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> ESTEVES, F. A. Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo, op. cit.

<sup>19</sup> ESTEVES, F. A. Fundamentos de limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011, op.cit.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> MARINHO, C. C. et al. Aquatic macrophytes drive sediment stoichiometry and the suspended particulate organic carbon composition of a tropical coastal lagoon. Acta Limnologica Brasiliensia, Rio Claro, V. 22, n. 2, p. 208-217, 2010.

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> MARINHO, C.C. et αl. Emergent Macrophytes Alter the Sediment Composition in a Small, Shallow Subtropical Lake: Implications for Methane Emission. American Journal of Plant Sciences, v.6, p. 315-322, 2015.

de plantas é que elas se desenvolvem em uma zona de transição entre o ecossistema terrestre e o aquático, regulando os fluxos de matéria e energia entre esses ambientes<sup>22</sup>. Além disso, a geomorfologia desses ecossistemas potencializa a influência da região litorânea. Valores do índice de desenvolvimento dessas lagoas, ou seja, relação entre sua área e perímetro, apontam para uma elevada importância de sua região litorânea<sup>23</sup>.

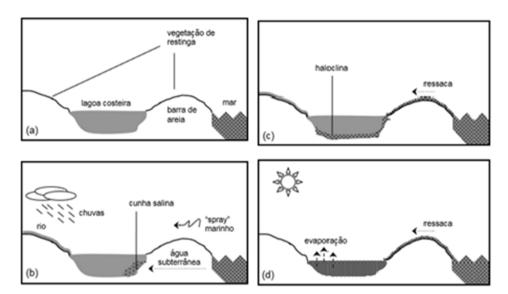


Figura 14 - Esquema representando os principais eventos responsáveis pela alteração nos valores de salinidade nas lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro: (a) estrutura das lagoas costeiras; (b e c) representação de eventos associados a algumas lagoas, geralmente de característica salobra e eventualmente salina (Ex: lagoa Cabiúnas ou Jurubatiba); (d) representação de evento associado a algumas lagoas geralmente de caraterísticas salinas, eventualmente hipersalinas (Ex: lagoa Peri peri)<sup>33</sup>

# Dinâmica do Metano nas Lagoas Costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro

A primeira pesquisa sobre metano nas lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro ocorreu em 1996<sup>24</sup>. Nestes vinte anos de estudos, muitas outras pesquisas foram realizadas, como parte de diversos projetos de pesquisa, teses e dissertações. Essas pesquisas abordaram os processos de produção, oxidação e emissão de metano (Figura15), relacionados a temas como:

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011, *op.cit*.

PANOSSO, R.; ESTEVES, F.A. Morfometria das lagoas Imboassica, Cabiúnas, Comprida e Carapebus: Implicações para seu funcionamento e manejo. In: ESTEVES, F. A. (ed.). Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé, RJ. Rio de Janeiro: NUPEM,UFRJ, 1998. p. 91-108.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> FURTADO, A. L. S.; CASPER, P.; ESTEVES, F. A. Methanogenesis in an impacted and two dystrophic coastal lagoons, Macaé, Brazil. Brazilian Archives of Biology and Technology, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 195-202, 2002.

Eutrofização<sup>25,26</sup>; Macrófitas aquáticas<sup>27,28</sup>; Salinidade<sup>29,30</sup>; Bioturbação<sup>31,32,33</sup>; Competição por substrato<sup>34,35</sup>; Herbivoria<sup>36</sup>;

Heterogeneidade espacial<sup>37</sup>.

As principais lagoas pesquisadas quanto à abordagem do estudo do metano estão apresentadas na tabela 1 e figura 16. Essas lagoas estão localizadas no Parque Nacional (PARNA) da Restinga de Jurubatiba, com exceção da lagoa Imboassica, localizada na região metropolitana de Macaé.

Em um artigo de revisão sobre a eutrofização artificial das lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro e os gases de efeito estufa, foi abordada a questão relacionada ao metano<sup>38</sup>. Este trabalho ressaltou a importância desses estudos, como veremos a seguir. Estudo sobre a metanogênese em dez lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro (Figura 17) observou que as lagoas eutrofizadas apresentaram valores de produção de metano que variaram de intermediários a reduzidos<sup>39</sup>. Tais resultados podem estar refletindo efeitos antagônicos sobre a metanogênese com relação à abertura artificial da barra de areia e à eutrofização<sup>40,41</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> MARINHO, C. C. Metanogênese regulada por macrófitas aquáticas e pela alteração brusca do nível d'água e salinidade em duas lagoas costeiras da Região Norte Fluminense, Macaé/RJ. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> MARINHO, C.C.; FONSECA, A.L.S.; ESTEVES, F.A. Impactos antrópicos nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro: uma revisão sobre a eutrofização artificial e gases de efeito estufa. RBPG, Brasília, v.13, n.32, p. 703 - 728, 2016.

FONSECA, A.L.S.; MARINHO, C.C.; ESTEVES, F.A. Aquatic Macrophytes Detritus Quality and Sulfate Availability Shape the Methane Production Pattern in a Dystrophic Coastal Lagoon. American Journal of Plant Sciences, v. 6, p.1675-1684, 2015.

<sup>28</sup> GRIPP, A. R. Variação Diária da Emissão de Metano por uma Lagoa Costeira Tropical durante o Verão: Avaliação do Potencial de Emissão pelos Fluxos Ebulitivo, Difusivo e via Macrófitas Aquáticas. 2011. Dissertação (Mestrado em Ecología) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> MARINHO, C. C. Metanogênese regulada por macrófitas aquáticas e pela alteração brusca do nível d'água e salinidade em duas lagoas costeiras da Região Norte Fluminense, Macaé, RJ. op. cit.

<sup>3</sup>º PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 25, n. 3, p. 341-351, 2013.

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> FIGUEIREDO-BARROS, M. P. et al. Benthic bioturbator enhances CH4 fluxes among aquatic compartments and atmosphere in experimental microcosms. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Ottawa, v. 66, p. 1649-1657, 2009.

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> CALIMAN, A. et al. Biodiversity effects of benthic ecosystem engineers on the spatial patterns of sediment CH4 concentration in an urban Neotropical coastal lagoon. Acta Limnologica Brasiliensia, Rio Claro, v. 25, n. 3, p. 302-314, 2013.

<sup>33</sup> GONÇALVES, F. A. Efeito do biorrevolvimento por macroinvertebrados bentônicos sobre a concentração de metano (CH4) na interface sedimento água-atmosfera. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

<sup>34</sup> MINELLO, M. **Metanogênese sob a variação de salinidade em lagoas costeiras do Norte Fluminense**: implicações nas condições osmóticas e na competição por substratos. 2004. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FONSECA, A.L.S. MARINHO, C.C.; ESTEVES, F.A. Aquatic Macrophytes Detritus Quality and Sulfate Availability Shape the Methane Production Pattern in a Dystrophic Coastal Lagoon. American Journal of Plant Sciences, v. 6, p.1675-1684, 2015.

<sup>36</sup> PETRUZZELLA, A. et al. Herbivore damage increases methane emission from emergent aquatic macrophytes. Aquatic Botany, v. 127, p. 6-11, 2015.

FELIX, R.W. Fluxos de Metano e Dióxido de Carbono Em Lagoas Costeiras Húmicas: Uma Abordagem Espaço-Temporal. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2014.

<sup>38</sup> MARINHO, C.C.; FONSECA, A.L.S.; ESTEVES, F.A. Impactos antrópicos nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro: uma revisão sobre a eutrofização artificial e gases de efeito estufa. op. cit.

<sup>39</sup> PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments, op. cit.
40 MARINHO, C. C. Metanogênese regulada por macrófitas aquáticas e pela alteração brusca do nível d'água e salinidade em duas lagoas

costeiras da Região Norte Fluminense, Macaé, RJ, op. cit.

41 MARINHO, C. C. **Dinâmica do metano nas lagoas costeiras do litoral Norte do Rio de Janeiro**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências)

- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

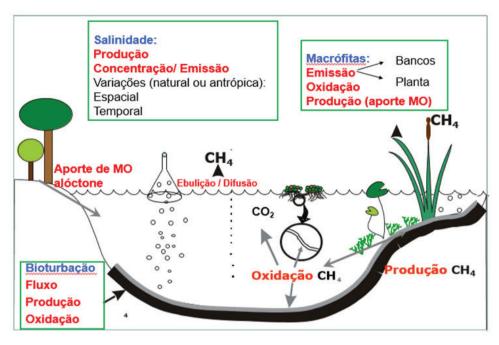


Figura 15 - Esquema apresentando os diversos processos e mecanismos abordados nos estudos sobre o metano nas lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro

Enquanto a eutrofização apresentaria efeito positivo<sup>42,43</sup>, a salinização provocada pelo aporte da água do mar provocaria um efeito negativo sobre a metanogênese<sup>44</sup>. Mas esse efeito estaria restrito às lagoas doces ou salobras, e não ocorreria com as lagoas hipersalinas, adaptadas à elevadas concentrações de sais<sup>45</sup>. Quanto à metanotrofia, foram observados efeitos negativos com relação à abertura da barra de areia, sendo apontados como prováveis fatores responsáveis: (1) diminuição da concentração de metano, substrato para metanotrofia; e (2) o aumento dos valores de salinidade<sup>46</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> CASPER, P. Methane production in lakes of different trophic state. Arch. Hydrobiol. Beth., v.37, p.149-154, 1992.

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> NEVES, J. M. C. O. S.; ARAGON, G. T.; SILVA FILHO, E. V. Effects of eutrophication and Typha domingensis Pers. on methanogenesis in tropical constructed wetland. Acta Limnologica Brasiliensia, Rio Claro, v. 23, n. 2, p. 145-153, 2011.

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> MARINHO, C. C. Metanogênese regulada por macrófitas aquáticas e pela alteração brusca do nível d'água e salinidade em duas lagoas costeiras da Região Norte Fluminense, Macaé, RJ, op. cit.

<sup>45</sup> MINELLO, M. Metanogênese sob a variação de salinidade em lagoas costeiras do Norte Fluminense: implicações nas condições osmóticas e na competição por substratos, op. cit.

<sup>46</sup> Ibid.



Figura 16 - Foto aérea das lagoas costeiras estudadas. Localizada no PARNA da Restinga de Jurubatiba, no Litoral Norte do Rio de Janeiro, com exceção da lagoa Imboassica, localizada na região metropolitana de Macaé: (a) Imboassica, (b) Cabiúnas (Jurubatiba), (c) Comprida, (d) Carapebus, (e) Peri peri e (f) Mapa das Lagoas. Fonte: Laboratório de Limnologia/UFRJ

A proximidade das lagoas costeiras com o mar possibilita não apenas a influência do aporte salino, mas também o aporte de sulfato, encontrado em concentrações elevadas na água do mar. Essa é uma questão relevante nos estudos sobre a metanogênese, em função da competição com a sulfato redução por substrato, o que não depende apenas da disponibilidade de sulfato, mas também da quantidade e da qualidade de matéria orgânica disponível<sup>47</sup>. De acordo com a avaliação de uma série de processos anaeróbicos no sedimento das lagoas Imboassica e Comprida (Figura 18), a metanogênese foi o processo predominante na mineralização do carbono<sup>48</sup>. Em experimento de laboratório, através da incubação de sedimento da região limnética da lagoa Cabiúnas sob adição de sulfato, foi observada a inibição de cerca de 95% na produção de metano<sup>49</sup>. Já com

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> LYIMO, T.J.; POL, A.; DEN-CAMP, H.J.M.O. Sulfate Reduction and Methanogenesis in Sediments of Mtoni Mangrove Forest, Tanzania. **AMBIO**, v.31, p.614-616, 2002.

<sup>48</sup> NIELSEN, L.P.; ENRICH-PRAST, A.; ESTEVES, F.A. Pathways of organic matter mineralization and nitrogen regeneration in the sediment of five tropical lakes. Acta Limnol. Bras., v.16, n.2, p.193-202, 2004.

<sup>49</sup> MINELLO, M. Metanogênese sob a variação de salinidade em lagoas costeiras do Norte Fluminense: implicações nas condições osmóticas e na competição por substratos, op. cit.

relação à adição simultânea de sulfato e acetato, o autor observa uma redução parcial da atividade metanogênica. Em estudo sobre a contribuição do aporte de matéria orgânica via banco de macrófitas, foi observado que: (1) a variação na quantidade e qualidade do carbono orgânico é o principal fator que controla a produção de metano; (2) já a disponibilidade de sulfato apresenta, provavelmente, um papel secundário, sendo importante quando a matéria orgânica não é suficiente para a ocorrência da metanogênese e da redução de sulfato simultaneamente<sup>50</sup>.

Tabela 1 - Características gerais das principais lagoas costeiras envolvidas nos estudos sobre metano

Lagoa	Salinidade	pН	Cor	Observação	
Imboassica	Salobra	Básica	Clara	<ul> <li>influência antrópica</li> <li>aporte de nutrientes</li> <li>abertura artificial da barra de areia</li> </ul>	
Cabiúnas (Jurubatiba)	Doce Salobra	Neutra	Clara escura	bem preservada     densamente colonizada por macrófitas     abertura artificial da barra de areia	
Comprida	Doce	Ácida	Escura	bem preservada     alta concentração de substâncias húmicas	
Carapebus	Salobra	Básica	Clara Escura	<ul> <li>influência antrópica</li> <li>aporte de nutrientes</li> <li>abertura artificial da barra de areia</li> </ul>	
Peri peri	Salina Hipersalina	Básica	Escura Clara	bem preservada     intensa variação de salinidade	

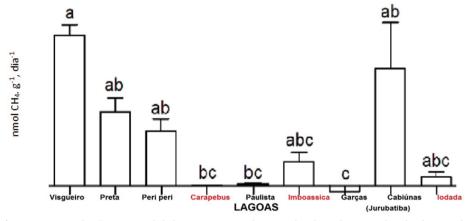


Figura 17 - Produção potencial de metano nas lagoas do Litoral Norte do Rio de Janeiro. Lagoas impactadas via lançamento de esgoto destacadas em vermelho<sup>51</sup>

<sup>5</sup>º FONSECA, A.L.S.; MARINHO, C.C.; ESTEVES, F.A. Aquatic Macrophytes Detritus Quality and Sulfate Availability Shape the Methane Production Pattern in a Dystrophic Coastal Lagoon, op. cit.

<sup>51</sup> PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments, op. cit.

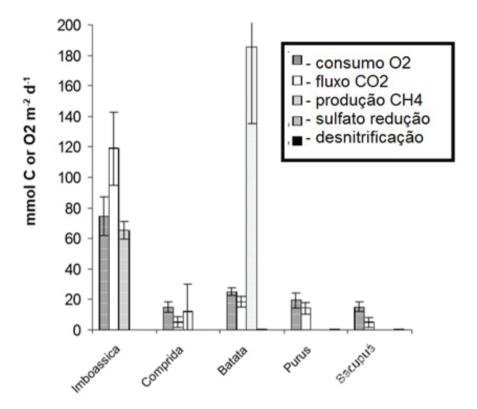


Figura 18 - Taxas de consumo de O2, fluxo de CO2, produção de CH4, sulfato redução e desnitrificação. Todas as taxas de sulfato redução e desnitrificação foram menores do que 1 mmol C m² d¹ (modificado5²)

Também fizeram parte de estudos relacionados à dinâmica do metano nas lagoas costeiras duas questões associadas a organismos não diretamente ligados à metanogênese, ou seja: (1) bioturbação no sedimento provocados por organismos bentônicos; (2) herbivoria de macrófitas aquáticas. Com relação à bioturbação, foi observado efeito positivo com relação à concentração de metano na água e na atmosfera de microcosmos em relação ao tratamento controle, em experimentos realizados com sedimento da lagoa Imboassica<sup>53</sup>. Outro estudo experimental com sedimento da lagoa Imboassica demonstrou a influência da diversidade de organismos bioturbadores bentônicos na concentração de metano no sedimento<sup>54</sup>. Esse estudo demonstrou que a riqueza de espécies dos bioturbadores reduziu de forma significativa a concentração de metano no sedimento.

<sup>§2</sup> NIELSEN, L.P.; ENRICH-PRAST, A.; ESTEVES, F.A. Pathways of organic matter mineralization and nitrogen regeneration in the sediment of five tropical lakes, op. cit.

<sup>53</sup> FIGUEIREDO-BARROS, M. P. et al. Benthic bioturbator enhances CH4 fluxes among aquatic compartments and atmosphere in experimental microcosms, op. cit.

S4 CALIMAN, A. et al. Biodiversity effects of benthic ecosystem engineers on the spatial patterns of sediment CH4 concentration in an urban Neotropical coastal lagoon, op. cit.

Por último, podemos destacar que, em estudo realizado na lagoa Pitanga (próxima à lagoa Cabiúnas), foi observado que, no tratamento com a espécie *Campsurus sp.*, ocorreu a intensificação da concentração de metano na água do mesocosmo, sem acréscimo na atmosfera interna<sup>55</sup>. Já no tratamento com a espécie *Chironomus sp.*, ocorreu redução da concentração de metano no sedimento e acréscimo na atmosfera interna do mesocosmo. Concluiu-se, então, que as espécies de macroinvertebrados bentônicos *Heleobia australis*, *Chironomus sp.*, *Campsurus sp.* e *Laeonereis culveri*, que apresentam diferenciados modos de forrageio do sedimento, alteraram, de maneira diferente, as concentrações de metano na interface sedimento-água-atmosfera.

Em relação ao estudo sobre o efeito de herbivoria na macrófita aquática emersa *Eleocharis equisetoides*, sobre a emissão de metano, realizado em mesocosmos, por meio da simulação de diferentes níveis de dano no culme da macrófita (Figura 19)<sup>56</sup>, foram encontrados resultados que indicaram que o dano físico causado à macrófita afeta o transporte de gás realizado pela planta. Esse efeito promove uma redução na emissão de metano pela planta.

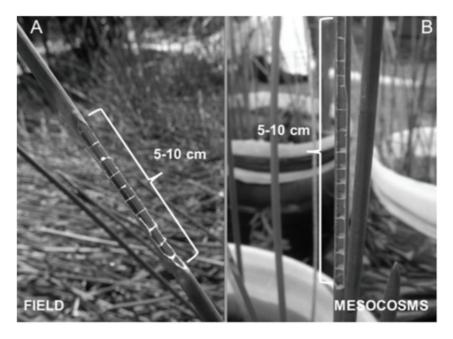


Figura 19 - Fotos do dano provocado por herbivoria (A) e (B) do dano provocado na realização do experimento em mesocosmos<sup>57</sup>

Foto A de Nathan Barros; Foto B da autora.

<sup>55</sup> GONÇALVES, F. A. Efeito do biorrevolvimento por macroinvertebrados bentônicos sobre a concentração de metano (CH4) na interface sedimento-água-atmosfera, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> PETRUZZELLA, A. et al. Herbivore damage increases methane emission from emergent aquatic macrophytes, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> PETRUZZELLA, A. et αl. Herbivore damage increases methane emission from emergent aquatic macrophytes, op. cit.

A comunidade de macrófitas aquáticas desempenha um papel fundamental na dinâmica do metano nas lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro<sup>58,59,60</sup>. Essa comunidade exerce influência direta ou indireta nos processos de produção, oxidação e emissão do metano. Em geral, podemos destacar a modificação da estrutura e composição do sedimento nos bancos colonizados pelas macrófitas emersas. O acúmulo de detritos das plantas no sedimento da região litorânea, em geral, altera sua estequiometria e qualidade para os decompositores, possuindo proporcionalmente mais carbono do que nitrogênio e fósforo se comparado à região limnética<sup>61</sup>. O aporte de matéria orgânica propicia a formação de um sedimento de caráter redutor, ou seja, anaeróbico. Tais condições, além do fornecimento de substratos, como acetato, favorece a produção de metano nessas regiões<sup>62</sup>. A elevada concentração de metano na coluna d'água e, principalmente, no sedimento, além da reduzida profundidade da coluna d'água, favorece a emissão de metano nas regiões colonizadas pelas macrófitas emersas<sup>63</sup>.

Pesquisa realizada no período de dezembro de 2009 a janeiro de 2010 na lagoa Cabiúnas sobre os mecanismos de emissão de metano em área aberta e nos bancos das macrófitas *Eichhornia azurea e Typha domingensis* aponta a seguinte ordem de relevância: (1°) mecanismos de emissão via bolhas; (2°) via macrófitas; (3°) via difusão<sup>64</sup>. O fluxo ebuliente foi responsável pela emissão de mais de 70% de todo o metano que deixou a lagoa, enquanto as macrófitas e a difusão foram responsáveis por menos de 25% e 5% do metano emitido, respectivamente.

Foram realizadas medidas para determinação de emissão de dióxido de carbono e metano via ebuliente, via difusiva e através de macrófitas aquáticas, nas lagoas Comprida e Cabiúnas, no período de 2012 a 2013<sup>65</sup>. Nessa pesquisa, foi observado que as lagoas costeiras agem como fontes de carbono em períodos de ampla senescência desses vegetais. Outra questão relevante levantada pelo autor é que a emissão de carbono nesses ecossistemas é potencializada em evento de chuvas, quando ocorre a elevação abrupta do nível da água no período de verão. Quanto à emissão do metano, foi observada uma elevada variabilidade espacial, com uma contribuição de mais de 90% da região litorânea. No caso da lagoa Comprida, foi observado que a emissão de metano ocorre preferencialmente via macrófitas emersas, enquanto na lagoa Cabiúnas ocorre preferencialmente via processos ebulientes.

<sup>§8</sup> FONSECA, A. L. S. et al. Methane concentration in water column and in pore water of a coastal lagoon (Cabiúnas lagoon, Macaé, RJ, Brazil). Brazilian Archives of Biology and Technology, Curitiba, v. 47, n. 2, p. 301-308, 2004.

PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments, op. cit.
 FONSECA, A.L.S.; MARINHO, C.C.; ESTEVES, F.A. Aquatic Macrophytes Detritus Quality and Sulfate Availability Shape the Methane Production Pattern in a Dystrophic Coastal Lagoon, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup> MARINHO, C. C. et al. Aquatic macrophytes drive sediment stoichiometry and the suspended particulate organic carbon composition of a tropical coastal lagoon, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> FONSECA, A.L.S.; MARINHO, C.C.; ESTEVES, F.A. Aquatic Macrophytes Detritus Quality and Sulfate Availability Shape the Methane Production Pattern in a Dystrophic Coastal Lagoon, op. cit.

<sup>63</sup> MARINHO, C. C. Dinâmica do metano nas lagoas costeiras do litoral Norte do Rio de Janeiro. op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>64</sup> GRIPP, A.R. Variação Diária da Emissão de Metano por uma Lagoa Costeira Tropical durante o Verão: Avaliação do Potencial de Emissão pelos Fluxos Ebulitivo, Difusivo e via Macrófitas Aquáticas, *op. cit.* 

<sup>65</sup> FELIX, R. W. Fluxos de carbono e dióxido de carbono em lagoas costeiras húmicas: uma abordagem espaço-temporal. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2014.

Mas, além do efeito sobre a produção e emissão de metano, as macrófitas realizam um significativo efeito sobre a oxidação desse gás, tanto no sedimento como na coluna d'água. A oxidação do metano, ou metanotrofia, via macrófitas aquáticas, ocorre através da ação de bactérias metanotróficas presentes na rizosfera (Figura 2). Nessa região, o metano é oxidado em função da areação desse microcosmo. A oxidação do metano é um dos principais processos reguladores da emissão desse gás para a atmosfera, pois já foram observados resultados que apontam para um consumo de até 90% do metano produzido no próprio ecossistema<sup>66</sup>.

Em experimento de laboratório utilizando mesocosmos, foi avaliado o efeito da presença da macrófita flutuante Salvinia auriculata Aubl e da macrófita de folhas flutuantes Eichornea azurea (Sw.) Kunth sobre a concentração de metano na água do mesocosmo<sup>67</sup>. Foi observada uma diminuição nas concentrações de metano nos tratamentos com as macrófitas em relação ao controle, indicando relevante papel das macrófitas aquáticas flutuantes na dinâmica do metano na coluna de água. Os autores ainda sugerem uma variação diária nos processos de oxidação (via bactérias aderidas na rizoafera das macrófitas) e emissão (via estrutura lacunar das macrófitas) de metano, em função das idiferenças observadas nos fluxos de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> com relação às condições de luz e escuro.

Duas questões relevantes que devem ser levadas em consideração dizem respeito aos possiveis cenários de mudanças climáticas<sup>68</sup>. Alguns desses cenários apontam para o aumento significativo da temperatura e de alterações no regime pluviométrico. Estudo que possibilitou monitorar mensalmente, durante oito anos, as lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio de Janeiro aponta a temperatura como um dos principais parâmetros reguladores da concentração de metano na coluna d'água, e consequente emissão difusiva desse gás nas lagoas estudadas<sup>69</sup>. Outro estudo, apesar do curto tempo de observação, constatou efeito direto e indireto do regime de precipitação sobre a magnitude dos fluxos de metano nas lagoas Cabiúnas e Comprida<sup>70</sup>.

# Considerações e perspectivas

Com intuito de prever impactos futuros, e propor soluções que resolvam ou mitiguem tais impactos, são necessárias pesquisas que forneçam informações relevantes para o conhecimento do funcionamento dos ecossistemas aquáticos<sup>71</sup>. Para o desenvolvimento desses estudos, deve ocorrer a participação de Instituições de Pesquisa. A participação da comunidade científica qualificada possibilita que os gestores

<sup>&</sup>lt;sup>66</sup> SEGERS, R. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. **Biochemistry**, v. 41, p. 23-51, 1998.

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> FONSECA, A.L.S.; MARINHO, C.C.; ESTEVES; F.A. Floating Aquatic Macrophytes Decrease the Methane Concentration in the Water Column of a Tropical Coastal Lagoon: Implications for Methane Oxidation and Emission. Brazilian Archives of Biology and Technology. No prelo. Disponível em: https://mco4.manuscriptcentral.com/babt-scielo.

<sup>68</sup> Disponível em: http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\_Noticia=3371. Acesso em: 8 abr. 2017.

<sup>69</sup> MARINHO, C. C. Dinâmica do metano nas lagoas costeiras do litoral Norte do Rio de Janeiro, op. cit.

<sup>🤭</sup> FELIX, R. W. Fluxos de carbono e dióxido de carbono em lagoas costeiras húmicas: uma abordagem espaço-temporal, op. cit.

MARINHO, CC. Recursos Hídricos: Gestão e Abastecimento de Água. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2016. p. 83. (Curso Técnico em Meio Ambiente CEFET/RJ, Módulo III).

de recursos hídricos estejam amparados por aspectos não apenas legais, mas também técnicos. Dentro dessa lógica, poderão ser otimizados os recursos para intervenções que levem em consideração a qualidade no uso dos recursos hídricos, atendendo, dessa forma, a questões sociais e ambientais.

No caso de ecossistemas sujeitos a elevadas pressões antrópicas, como as lagoas costeiras, a pesquisa científica torna-se imprescindível para medidas mitigadoras e preventivas. Além disso, os estudos sobre a dinâmica do metano nesses ecossistemas fornecem informações relevantes que podem ser aplicados em outros sistemas. Dentre essas questões, podemos ressaltar como relevantes:

- Estudos que avaliem as alterações quanto à atividade metanogênica e a metanotrofia em função do aumento de temperatura do planeta por conta das alterações climáticas globais;
- 2) Estudos que avaliem os efeitos, sobre a dinâmica do metano, das diferentes previsões sobre os cenários futuros com relação a mudanças climáticas;
- 3) Busca de um modelo que possibilite estimar a emissão de metano nos bancos de macrófitas aquáticas, principalmente da espécie *Typha domingensis*, avaliando parâmetros como biomassa de planta, temperatura da água, composição do sedimento e profundidade da coluna d'água;
- 4) Estudos de geoprocessamento que busquem acompanhar as alterações dos diferentes compartimentos das lagoas costeiras, relacionando com suas contribuições relativas à emissão de metano;
- 5) Estudos que possibilitem projetar o efeito da eutrofização artificial dessas lagoas sobre a metanogênese e consequente emissão de metano para atmosfera, buscando manejo adequado desses ecossistemas;
- 6) Estudos que possibilitem avaliar o efeito do vento sobre a dinâmica do metano nessas lagoas.

A emissão de metano pelas lagoas costeiras observada nessas pesquisas, tanto difusiva quanto ebulitiva, quando comparadas a outros ecossistemas pelo mundo (tabela 2), não aponta esses ecossistemas como grandes emissores de metano para a atmosfera. Mas é importante ressaltar a necessidade do manejo adequado desses ecossistemas, que estão sujeitos a uma série de impactos antrópicos, como a eutrofização artificial. O processo de eutrofização pode aumentar a deposição de matéria orgânica tanto de origem fitoplanctônica como pelos detritos de macrófitas aquáticas, assim como a grande disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, provocando a diminuição da profundidade e expansão do banco de macrófitas, principalmente as emersas como *Typha domingensis*. Esse cenário pode levar à perda de funções ecológicas desses ecossistemas, além de acelerar o processo de seu desaparecimento, com a diminuição de seu espelho d'água e de sua profundidade. Tais condições podem potencializar a emissão de metano para a atmosfera nesses ecossistemas, aumentando sua contribuição com relação a outros ecossistemas.

Tabela 2 - Emissão de metano, difusiva e ebulitiva, pelas lagoas costeiras deste estudo e vários tipos de ecossistemas de diferentes regiões do mundo

Ecossistema	Clima	Difusivo µmol . m-².dia-1	Totais µmol . m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	Ebulitiva µmol . m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>
Reservatório <sup>72</sup>	Temperado	750±438		30.000
Reservatório <sup>73</sup>	Tropical	600±380 -1.470±940		200±680 - 4.060±8.370
Lagoa Costeira (Venbanad) <sup>74</sup>	Tropical		3.810 - 316.000	
Lagoa Costeira (Nakauami) <sup>75</sup>	Temperado		0,63 - 15.300	
Campos de Arroz <sup>76</sup>	Tropical		31 - 38.440	
Pantanal <sup>77</sup>	Tropical			
Estuário <sup>78</sup>	Tropical		1.560±50	
Lagoas Costeiras <sup>79</sup>	Tropical	20 - 2403 (78 - 338)		
Lagoa Cabiúnas <sup>80</sup>	Tropical	-146±300 - 830±706		14.188±10.750- 17.350±21.313
Lagoas Costeiras <sup>81</sup>	Tropical	-196 - 16.275 (108 - 2.095)		0,5 - 1300 (0,48 - 361)

Min - max (médias anuais)

<sup>72</sup> DELSONTRO, T. et al. Extreme Methane Emissions from Swiss Hydropower Reservoir: Contribution from Bubbling Sediments. Environmental Science & Technology, v. 44, p. 2419–2425, 2010.

<sup>&</sup>lt;sup>73</sup> SANTOS, M.A. et al. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, p. 116-129, 2008. <sup>74</sup> VERMA, A.; SUBRAMANIAN, V.; RAMESH, R. Methane emissions from a coastal lagoon: Vembanad Lake, West Coast, India. **Chemosphere**,

v. 47, p. 883-889, 2002.

75 HIROTA, M. et al. Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan. **Chemosphere**, v. 68, p. 597-603, 2007.

<sup>76</sup> PARASHAR, D.C.; MITRA, A.P.; GUPTA, P.K. Methane budget from paddy fields in India. Chemosphere, v. 33, n. 4, p. 737-757, 1993.

<sup>77</sup> BASTVIKEN, D. et al. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: Toward more comprehensive sampling. Enveroment Science, v. 4, p. 5450-5455, 2010.

<sup>78</sup> KRITHIKA, K.; PURVAJA, R.; RAMESH, R. Fluxes of methane and nitrous oxide from an Indian mangrove. Current Science, v. 94, n. 2, p. 218-224, 2008.

<sup>79</sup> KONE, Y.J.M. et al. Seasonal variability of methane in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa). Biogeochemistry, v. 100, p. 21-37, 2010.

<sup>8</sup>º GRIPP, A.R. Variação Diária da Emissão de Metano por uma Lagoa Costeira Tropical durante o Verão: Avaliação do Potencial de Emissão pelos Fluxos Ebulitivo, Difusivo e via Macrófitas Aquáticas, op. cit.

<sup>81</sup> MARINHO, C. C. Dinâmica do metano nas lagoas costeiras do litoral Norte do Rio de Janeiro.

#### 321

# **Agradecimentos**

Agradeço a valiosa colaboração da direção e do corpo técnico do Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Ambiental de Macaé da Universidade Federal do Rio de Janeiro (NUPEM/UFRJ). Aos companheiros João Marcelo (Pescador), Ignez (Vizinha) e Luiza Helena (Lena). Às agências de Fomento, pela financiamento através de recursos e bolsas de pesquisa: CAPES, CNPq, FAPERJ, FINEP. À Petrobras pelo financiamento de projetos de pesquisas, como o ECOLagoas e oProjeto Carbono. Aos companheiros "metanogênicos" da "primeira hora", responsáveis pela consolidação dos estudos sobre metano: André Furtado, André Fonseca e Murilo Minello.