

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA DE AMBIENTES AQUÁTICOS
CONTINENTAIS

**CONCENTRAÇÃO E EMISSÃO DE METANO EM UM LAGO RASO
SUBTROPICAL**

Iara Bueno Giacomini

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biologia de Ambientes Aquáticos Continentais para obtenção do Título de Mestre em Biologia de Ambientes Aquáticos Continentais.

Rio Grande, 19 de Fevereiro de 2008

Dedico esta dissertação aos meus pais,
Que sempre me deram todo o tipo de apoio para a realização dos meus objetivos,
e para a conquista de muitos dos meus sonhos.

Amo vocês!!

SER EU MESMA,
EM UM MUNDO QUE ESTÁ FAZENDO TUDO O QUE PODE,
NOITE E DIA,
PARA EU ME TORNAR OUTRA PESSOA,
SIGNIFICA LUTAR A MAIS ÁRDUAS BATALHAS QUE UM SER HUMANO PODE
TRAVAR,
E NUNCA PARAR DE LUTAR.

E.E. CUMMINGS

Agradecimentos

Nossa, quantas pessoas foram necessárias nesses dois anos pra essa dissertação finalmente ficar pronta...

Primeiramente eu agradeço ao Cleber (Papi!!!) por confiar na minha capacidade científica, por aceitar me orientar, e me dar liberdade para escolher meu projeto. Também, por sempre ultrapassar as funções de orientador, sendo amigo, órgão financiador e doador de caronas. Cleber, MUITO obrigada por tudo isso!

Teria sido muito chato e difícil chegar até aqui, se não fosse pela formação (espontânea) do limnotrio. Léo e Cláudio, essa dissertação é de vocês também. Valeu pelas idéias, sugestões, apoio moral e muscular, pelos muitos cafés, pelas sessões de bobagens, e por sacrificarem alguns finais de semana em nome da causa metanogênica. Mister Macrófita e SedimentoMan, brigaduuuu!!!

Obrigada à parceria da UFRJ, pela estrutura física e pessoal, principalmente Claudio Marinho e Marquinhos Barros por me iniciarem nos rituais metânicos, por analisarem minhas amostras e por estarem sempre a disposição das minhas dúvidas e prazos.

A todos os professores e técnicos do programa, que de forma direta ou indireta contribuíram para esse trabalho. Especialmente Adriana, por sempre me ajudar nas questões burocráticas, Danilo por sempre ter um tempinho de me ajudar em assuntos diversos, Ioni, por me lembrar de validar meus créditos! Kinas, por tirar minhas dúvidas estatísticas ao longo do trabalho, João Paes, por nos emprestar o barco para as coletas, e Kika, por sempre lembrar das saladas nos churrascos. Ao programa da Química Tecnológica Ambiental que além de conhecimento, me proporcionou novos amigos. Ao CNPQ, que financiou o Projeto Metano, e à CAPES, pela minha bolsa.

Mas nem só de ciência vive o homem! Obrigada eterno, do fundo do coração, às parcerias de descontração!! Izabel, Tiago, Jabutti e Camila pelas noites bem vividas e bem bebidas. Carolzinha, por ter ficado em Big River e por estar sempre presente, das coletas às crises existenciais. Caro, pela amizade e pelos almoços de família. Gabi e Fer, companheiras de casa (mesmo vocês não aparecendo muito por lá...), obrigada por dois anos de convivência pacífica e pela manutenção do "Mural do Descarrego", e também por agüentarem, sem reclamar, das jantinhas e festinhas que sempre rolavam por lá. E aos amigos que distantes, porém sempre presentes, que também me ajudaram a chegar até aqui.

Por fim, agradeço à vida, por ter colocado todas essas pessoas maravilhosas e essas oportunidades únicas diante de mim!!

Resumo

O metano (CH_4) na atmosfera absorve radiação infravermelha (IV) e contribui para o aquecimento global. Considerando que este gás absorve 23 vezes mais radiação IV que o CO_2 , e que sua concentração aumentou 151% desde 1750, o CH_4 é considerado atualmente um dos mais importantes gases de efeito estufa. Os ambientes aquáticos continentais são fontes naturais de CH_4 , representando 76% da emissão total global. Visto que a planície costeira do RS apresenta uma vasta extensão de ambientes lacustres, naturais e artificiais, e que impactos antropogênicos podem alterar a metanogênese e o ciclo do carbono, o estudo dos padrões de produção de CH_4 nesses ambientes é importante para se estimar a produção regional total, e compreender os principais fatores relacionados com o aumento da emissão. Desta forma, é objetivo deste trabalho estimar e comparar a concentração e a emissão de metano de um lago raso oligotrófico entre 3 áreas: litorânea, limnética rasa e limnética em diferentes estações do ano. Para isto, foram observadas as concentrações de CH_4 no sedimento, na coluna d'água, e nas bolhas que se desprendem do sedimento. Perfis de 10 cm de sedimento foram coletados em campo utilizando perfilador, estes perfis foram divididos em seis frações, e a concentração de CH_4 foi determinada para cada uma delas. O CH_4 presente na coluna de água foi determinado a partir de amostras sub superficiais de 10ml de água, utilizando seringas e conservando em frascos com pressão negativa e NaCl. A captura das bolhas foi feita a partir de um sistema de funis invertidos, com área conhecida, acoplados a tubos coletores durante 24 horas em cada região, permitindo a estimativa da produção de CH_4 /hora/área. As análises referentes à concentração de CH_4 foram feitas em cromatógrafo gasoso com detector FID. As variáveis abióticas determinadas em cada coleta foram: pH, condutividade, O_2 dissolvido, temperatura para a coluna d'água, vento e temperatura atmosférica. Os resultados indicam que a variação espaço-temporal de emissão e concentração de CH_4 é grande. No sedimento as concentrações de metano variaram de 0 a 6273,9 $\mu\text{mol/g}$. Na coluna d'água as concentrações variaram de 0,11 a 13,33 $\mu\text{mol/L}$. E a variação de emissão foi entre 0 e 298,58 $\mu\text{mol/m}^2/\text{h}$. Existe uma tendência de maiores concentrações e emissões na região litorânea vegetada, no verão, enquanto que no inverno os valores são menores e apresentam menor amplitude. Esse padrão é provavelmente explicado pela maior quantidade de matéria orgânica presente no estande de macrófitas, criando as condições necessárias para que ocorra a metanogênese.

Abstract

Contraction and methane emission from a subtropical shallow lake

Methane (CH₄) in the atmosphere absorbs infrared radiation (IR) and contributes to global warming. Considering that it absorbs 23 times more IR radiation than CO₂, and that its concentration increased 151% since 1750, CH₄ is currently considered one of the most important greenhouse gas. The continental aquatic environments are natural sources of CH₄, representing 76% of total CH₄ global emissions. Whereas the coastal plain of the RS presents a large extension of natural e artificial lake environments, and that anthropogenic impacts can change the methanogenesis and the carbon cycle, studies of CH₄ production patterns in these environments are important to estimate the regional production and to understand the key factors related to the emissions increase. So, the objectives of this work are: estimate and compare the methane emission and methane concentration in a oligotrophic shallow lake, between 3 regions: littoral, shallows limnetic and limnetic; For this, the concentration of CH₄ were determined in the sediment in the water column, and in the the bubbles that flow from sediment. 10 cm of sediment was collected in the field, with a corer, and divided into six fractions. The concentration of CH₄ was determined in each one. The CH₄ present in the water column was determined from samples of water from the lake. The CH₄ bubbles were captured by made from a system of inverted funnels, with a known area, engaged to tube collectors. The system remained for 24 hours in each region, allowing the estimation of the CH₄/hour/area production. The analysis of CH₄ were obtained in gas chromatography with FID (Flame Ionic Detector). The abiotic variables determined were: pH, conductivity, dissolved O₂ and temperature inside water column, and wind and air temperature. The results indicate that the time-space variation of emission and concentration of CH₄ is big. In sediment concentrations of methane varied from 0 to 6273,9 μmol/g. In water column concentrations varied from 0.11 to 13.33 μmol/L, and the emission variation was ranged between 0 and 298,58 μmol/m²/h. There is a trend of the largest concentrations and emissions in the region of macrophytes in the summer, while in the winter the numbers are smaller and with small amplitude. This pattern is probably due to the fact the stand of macrophytes provide a greater amount of organic matter, as well as to filter the aloctone material that arrives in the lake, creating the necessary conditions for methanogenesis.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - O metano como gás estufa.....	10
1.2 - Fontes de metano para a atmosfera.....	13
1.3 - Objetivos.....	17

Capítulo 2 - Material e Métodos

2.1 – Área de estudo.....	19
2.2 – Coleta de dados.....	21
2.2.1 - Caracterização limnológica.....	21
2.2.2 - Concentração de metano na coluna d'água.....	21
2.2.3 - Emissão de metano por bolha.....	22
2.2.4 - Coleta de sedimento.....	23
2.2.5 - Metano no sedimento.....	23
2.2.6 - Determinação de metano.....	24
2.2.7 - Análise de Dados.....	24

Capítulo 3 - Resultados

3.1 - Variáveis abióticas.....	27
3.2 – Concentração de Metano no Sedimento.....	27
3.2.1 - Variação temporal da [CH ₄].....	27
3.2.2 - Variação espacial da [CH ₄].....	27
3.3 - Concentração de Metano Coluna d'água.....	29
3.3.1 - Variação temporal da [CH ₄].....	29
3.3.2 - Variação espacial da [CH ₄].....	29
3.3.3 – Variáveis ambientais e [CH ₄].....	29
3.4 – Emissão de Metano por Bolhas.....	30
3.4.1 - Variação temporal da [CH ₄].....	31
3.4.2 - Variação espacial da [CH ₄].....	31

Capítulo 4 - Discussão

4.1 - Concentração de Metano no Sedimento.....	34
4.2 - Concentração de Metano Coluna d'água.....	35
4.3 - – Emissão de Metano por Bolhas.....	37

Capítulo 5 – Considerações Finais e Perspectivas Futuras.....39

Capítulo 6 - Referências Bibliográficas.....42

Capítulo 1

Introdução

1.1 – O metano como gás estufa

A incidência da radiação solar sobre a superfície da terra produz radiação infravermelha (IV) com comprimentos de onda entre 4 e 50 μm , também chamada de radiação termal. Essa radiação pode ser absorvida na troposfera por uma série de gases que fazem parte de sua composição, como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), vapor d'água (H_2O), óxido nitroso (N_2O) e os clorofluorcarbonos (CFC's), os quais são denominados gases estufa por provocarem o aquecimento da superfície do planeta e do ar (INPE/CPTEC, 2007). Quanto maior for a concentração desses gases, maior a absorção de calor, e o aprisionamento deste calor é denominado efeito estufa (Baird, 1998) (Fig. 1).

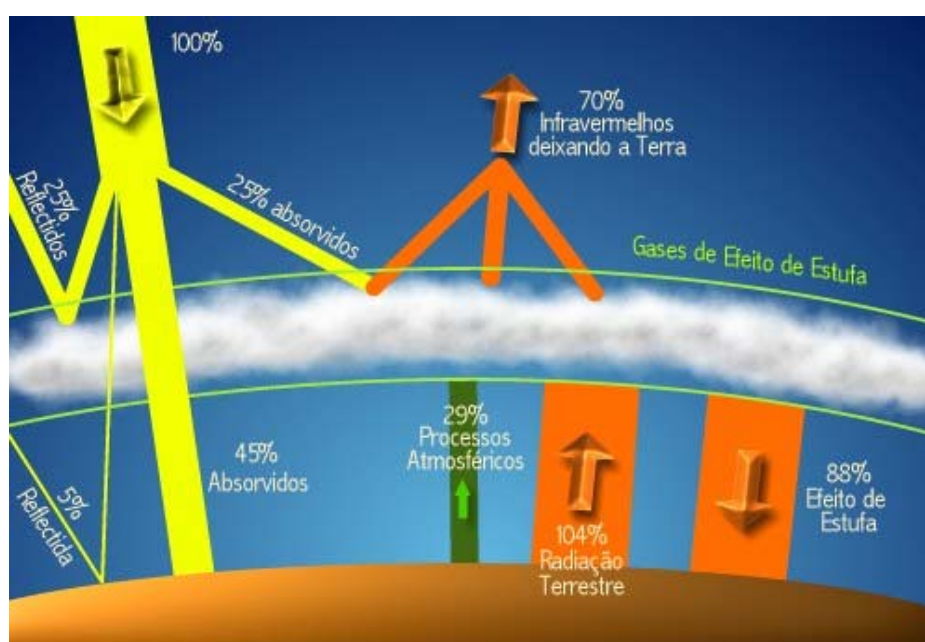


Fig. 1 – Ilustração do efeito estufa
Fonte: INPE/CPTEC, 2007

O efeito estufa é um fenômeno natural e necessário à manutenção da vida, sem ele a Terra teria temperaturas médias abaixo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (INPE/CPTEC, 2007). Atualmente existe um aumento do efeito estufa, causado pelo aumento da emissão de gases estufa decorrente de atividades humanas. O efeito conjunto de gases estufa pode vir a causar um aumento da temperatura global estimado entre $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos próximos 100 anos. Um aquecimento desta ordem de grandeza alterará o clima mundial e também aumentará o nível médio das águas do mar em pelo menos 30 cm, interferindo na vida de milhões de pessoas habitantes das áreas costeiras mais baixas (INPE/CPTEC, 2007).

Uma das maneiras para se estimar de forma relativa, o potencial de futuros impactos causados pela emissão de diferentes gases sobre o sistema climático é a utilização do Potencial de Aquecimento Global (PAG) dos gases de efeito estufa, que é um índice

determinado pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) de 1994, que compara a contribuição relativa do aquecimento global de 1kg de determinado gás estufa com a contribuição relativa de aquecimento global de 1Kg de CO₂ (Houghton, *et al.* 2001). As propriedades radioativas do gás controlam a absorção da radiação por kilo de gás presente num determinado instante, mas o tempo de vida determina por quanto tempo esse kilo de gás permanece na atmosfera e portanto, por quanto tempo esse gás é capaz de influenciar o orçamento termal (Ramaswamy *et al.* 2001).

O PAG é utilizado por diversos autores para efeitos de comparação de diferentes gases estufa, e é baseado em dois fatores:

- 1) Balanço Radioativo, que é o efeito radioativo de uma substância, ou seja, quanto de radiação IV essa substância é capaz de absorver.
- 2) Forçante Radioativa dos gases em um determinado período de tempo, que é a perturbação externa imposta à energia radioativa do sistema climático da terra.

O PAG é definido como “O efeito radioativo do pulso de uma substância para a atmosfera, num determinado período de tempo, em relação ao CO₂” de forma que:

$$\text{PAG}(x) = \frac{\int_0^{\text{TH}} a_x * [x(t)] dt}{\int_0^{\text{TH}} a_r * [r(t)] dt}$$

Onde:

TH = horizonte de tempo considerado

a(x) = eficiência radioativa de x (Wm⁻²Kg⁻¹)

a(r) = eficiência radioativa de CO₂ (Wm⁻²Kg⁻¹)

[x(t)] = tempo de decaimento (em abundância) de x

[r(t)] = tempo de decaimento (em abundância) de r

De modo que o PAG do metano para um horizonte de tempo de 100 anos é de 23 (Tab. 1).

Gás	Eficiência Radioativa (Wm-2ppb-1)	Tempo de Vida (Anos)	Potencial Aquecimento Global		
			Horizonte de Tempo		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono (CO ₂)	*	*	1	1	1
Metano (CH₄)	3.7 10-4	12	62	23	7
Óxido Nitroso (N ₂ O)	3.1 10-3	114	275	296	156

Tab. 1 – Potencial de Aquecimento Global (PAG), para alguns gases com o tempo de vida adequadamente caracterizado. Adaptada de Houghton, *et al.* 2001

* Os valores de CO₂ considerados para o PAG são baseados no modelo de Bern, que considera uma proporção de metano constante na atmosfera por 500 anos. A eficiência radioativa do CO₂ é de 0.01548 Wm⁻² ppmv, considerando que a concentração do CO₂ é de 364 ppmv. Estes valores devem ser usados apenas para cálculos de PAG.

A descrição detalhada sobre a formulação do PAG pode ser encontrada no relatório do IPCC de 1994 (Ramaswamy *et al.* 2001).

Dentre os gases estufa, o metano é atualmente o de maior relevância, em virtude do aumento de sua concentração e do seu alto poder de absorção da radiação infravermelha (IV) (Casper *et al.* 2000), haja vista que comparado ao dióxido de carbono, sua capacidade de absorção da radiação IV é de aproximadamente 23 vezes superior (El-Fadel e Massoud 2001).

A partir da Revolução Industrial a concentração atmosférica do metano aumentou mais de 150% (Fig. 2a). A concentração atual de metano é a mais alta dos últimos 420.000 anos (Houghton, *et al.* 2001). Mas apesar da concentração de metano continuar crescendo, a taxa deste crescimento diminuiu, e a concentração manteve-se em torno de 1751 ppbv entre 1999 e 2002 (Dlugokencky *et al.* 2003) (Fig. 2b e c).

Esse aumento na concentração de metano pode ser atribuído ao uso de combustíveis fósseis, ao aumento de áreas cultivadas, além da intensificação da pecuária (Marinho *et al.* 2004). Essas recentes pressões antropogênicas alteram a produção de metano e conseqüentemente, o ciclo do carbono (Verville *et al.* 1998), podendo influenciar significativamente o desenvolvimento da mudança climática global (Saarnio *et al.* 2000). Desta forma, o controle da emissão de metano representa a principal alternativa para o controle do aquecimento global em curto prazo (Ramanujan, 2005).

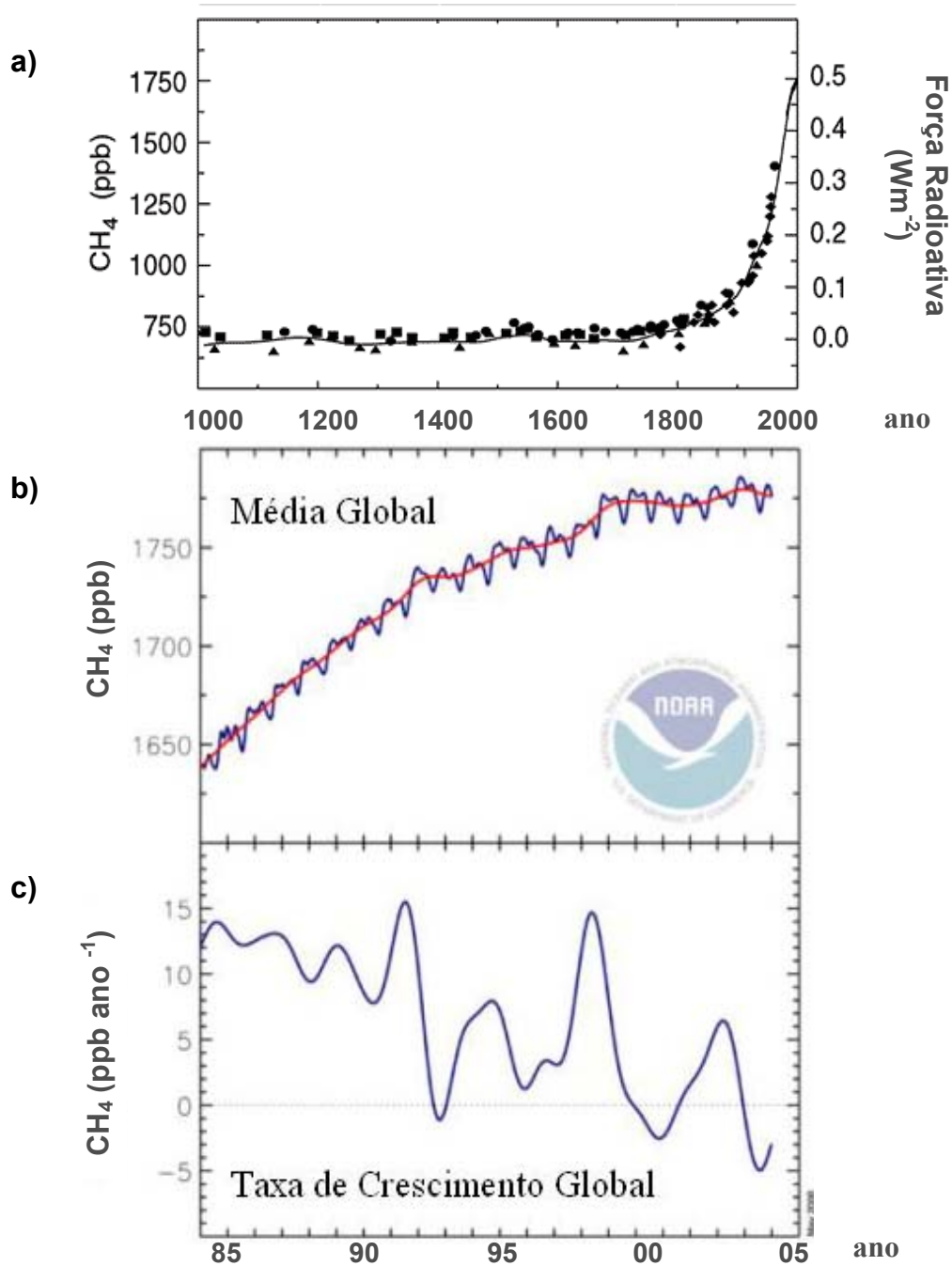


Fig. 2 – a) Mudança na concentração de metano determinado a partir de testemunhos de gelo.
 b) Média global da concentração de metano: Azul - variação mensal; Vermelho - média.
 c) Taxa instantânea do crescimento anual na abundância global do CH₄ atmosférico.

Fonte: Modificado de Houghton *et al.* 2001

1.2 - Fontes de Metano para a atmosfera

O metano é emitido para a atmosfera a partir de diversas fontes naturais e antrópicas (Tab. 2). Estima-se que 60% da emissão global total de metano esteja relacionada com atividades antropogênicas (Houghton *et al.* 2001). A contribuição de metano a partir de fontes naturais está estimada em um total de 190 Tg por ano, o que corresponde a 26% do total de metano terrestre (550 Tg) (Houghton, 1996). Dentre as fontes naturais, os wetlands são responsáveis por 76% (145 Tg ano⁻¹) da emissão global de metano (EPA, 2007), e contribui cerca de 15% para o efeito estufa (Rodhe 1990).

Referências	<i>Fung et al.</i> (1991)	<i>Hein et al.</i> (1997)	<i>Lelieveld et al.</i> (1998)	<i>Houweling et al.</i> (1999)	<i>Mosier et al.</i> (1998a)	<i>Olivier et al.</i> (1999)	<i>Cao et al.</i> (1998)	IPCC (2001)
FONTES NATURAIS								
Áreas alagadas	115	237	225	145			92	
Cupinzeiros	20		20	20				
Oceanos	10		15	15				
Hidratos	5		10					
FONTES ANTRÓPICAS								
Energias	75	97	110	89		109		
Lixões	40	35	40	73		36		
Ruminantes	80	90	115	93	80	93		
Tratamento de Lixo		*	25		14	*		
Rizicultura	100	88	**		25-54	60	53	
Queimadas	55	40	40	40	34	23		
Outros				20	15			
Total	500	587	600					598

Tab. 2 – Fontes de metano (TgCH₄/ano). Modificado de Houghton, *et al.* 2001.

* Tratamento de lixo incluído em ruminantes

** Rizicultura incluída em áreas alagadas

O metano é o principal componente do gás natural e representa o gás traço mais abundante da atmosfera. É um alcano simples, inodoro, de forma molecular CH₄, sendo formado e liberado para atmosfera através de processos biológicos que ocorrem em ambientes anaeróbicos (EPA, 2007).

A produção de metano, denominada metanogênese, é o processo final do fluxo do carbono em diversos habitats anaeróbicos incluindo sedimentos marinhos, dulcícolas, de marismas, pântanos, solos alagados, banhados, brejos, termas, e ainda sistemas gastro-

intestinais de animais, e desempenha papel fundamental no ciclo do carbono terrestre (Zinder 1993).

O metano pode ser formado a partir de diversas reações em sedimentos de ambientes aquáticos anóxicos através dos organismos metanogênicos, que utilizam matéria orgânica previamente metabolizada (substratos) e liberam metano como produto final (Capone e Kiene 1988).

Estes organismos metanogênicos pertencem ao domínio *Archea*. O termo domínio foi estabelecido pela análise comparativa do sequenciamento da unidade 16S do DNA ribossomal, em que os seres vivos foram divididos filogeneticamente em três domínios: *Eubactéria*, *Archea* e *Eucariontes* (Woese 1987).

Os metanogênicos podem utilizar um restrito grupo de substratos de pequena cadeia carbônica (acetato, por exemplo), sendo que a maioria utiliza freqüentemente um ou dois substratos, uma das exceções é o gênero *Methanosarcina*, que pode usar até sete substratos (Tab. 3) (Marinho *et al.* 2004). Como consequência dessa especialização, em muitos ambientes anaeróbicos os metanogênicos são dependentes de outros organismos para obter seu substrato (Zinder, 1993).

No sedimento, a partir de alguns milímetros de profundidade, o oxigênio se extingue e começam ocorrer os processos anaeróbicos, conforme a seguinte ordem a partir da fração superficial: desnitrificação, redução de metais, sulfato redução e metanogênese (Fig. 3), (Marinho *et al.* 2004).

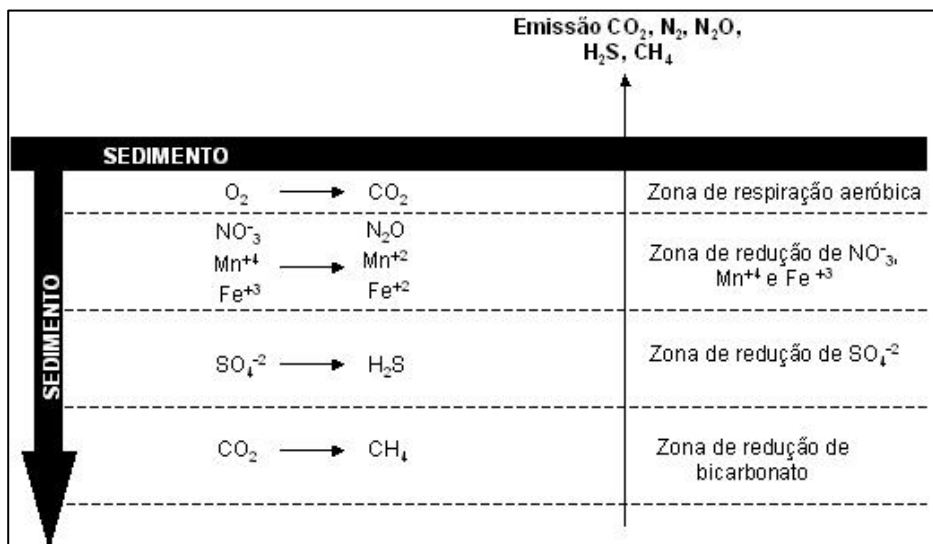


Fig. 3 – Estratificação vertical das principais reações utilizadas por microorganismos no sedimento de ecossistemas aquáticos. (Marinho *et al.*, 2004).

O metano formado pode ser utilizado como carbono e fonte de energia por bactérias metanotróficas aeróbicas, ou pode escapar para a atmosfera, onde atua como grande

participante das reações químicas da atmosfera, agindo como importante gás estufa (Zinder, 1993).

A emissão do metano para a atmosfera pode ocorrer por difusão em meio aquoso, através do sistema convectivo de macrófitas ou por formação de bolhas, sendo que esta última é significativamente importante quando o metano encontra-se em altas concentrações no sedimento, diminuindo a possibilidade de ocorrer oxidação na coluna de água (Marinho *et al.* 2004). Uma vez emitido, o metano é removido da atmosfera por uma variedade de processos denominados sumidouros, ou “sinks”. O balanço entre os processos de emissão e remoção determina as concentrações de metano na atmosfera e o seu tempo de residência. O sumidouro dominante é a oxidação por reação química com o radical hidroxila (OH). O metano reage com o OH para produzir etano e água na troposfera. A oxidação também ocorre na estratosfera, mas em menor intensidade. Essas duas reações entre metano e hidroxila são responsáveis por 90 % da remoção do metano (EPA, 2007, Houghton, *et al.* 2001).

O OH é o oxidante primário para a maioria dos poluentes troposféricos, dentre eles o metano. Desta forma, a retirada do metano da atmosfera depende dos níveis de OH na atmosfera (Houghton *et al.* 2001).

Existem ainda outros dois sumidouros conhecidos, um conhecido como “uptake” microbiano nos solos, responsável por 7% da remoção de metano (EPA, 2007), no qual o metano produzido pode ser oxidado a gás carbônico pela ação de bactérias denominadas metanotróficas em condições de aerobiose. Essas bactérias estão presentes nas camadas superficiais do sedimento e na coluna d’água, regiões geralmente oxigenadas (Marinho *et al.*, 2004). E a reação do metano com átomos de cloro na interface sedimento-água dos oceanos, que corresponde a menos de 2% da remoção (EPA, 2007).

As macrófitas aquáticas emergentes podem atenuar ou intensificar a emissão de metano (Schutz, *et al.* 1990). Os processos de intensificação da emissão ocorrem através da produção e retenção de matéria orgânica para ser decomposta, favorecendo a emissão por difusão molecular na água ou pelo fluxo convectivo da planta (Shannon *et al.* 1996). E os processos atenuantes da emissão de metano fornecem oxigênio às bactérias metanotróficas associada à rizosfera das plantas, oxidando o metano a CO₂ (Grunfeld e Brix 1999). Áreas vegetadas apresentaram valores de emissão de metano até 127% maior que áreas não vegetadas, variando de acordo com a espécie (Cronin, *et al.* 2006).

Atualmente estima-se que cerca de 40% da emissão global de metano para a atmosfera sejam originadas a partir de áreas alagadas naturais e artificiais (Lelieveld *et al.* 1998), e que lagos são responsáveis por 16% (8 – 48 Tg ano⁻¹) da emissão global de metano (Bastviken *et al.* 2004), assim o estudo dos padrões de produção de metano nesses ambientes é de grande importância para se estimar a produção regional total, e para compreender os principais fatores relacionados com o aumento da sua produção.

As áreas litorâneas de lagos, especialmente quando consideradas como ecótonos entre os ecossistemas aquáticos e terrestres, atuam como pontos quentes, que liberam grandes

quantidades de metano para a atmosfera por unidade de área, quando comparado com áreas pelágicas, e este fato não pode ser negligenciado no sistema lacustre e nem nas estimativas regionais de produção de metano. As condições nas áreas litorâneas vegetadas são favoráveis para a emissão de metano, pois produz grandes quantidades de matéria orgânica, que em decomposição causam condições de anoxia no sedimento, que na ausência de elétrons aceptores alternativos (NO_3^- , MnO_2 , $\text{FeO}(\text{OH})$, SO_4^{2-}) resulta em alta produção de metano (Capone e Kiene 1988). Assim sendo, a oxidação do metano em corpos hídricos continentais atua como um importante processo para a mitigação das emissões totais de metano (Segers 1998).

Regiões de planícies costeiras comportam grande quantidade de corpos hídricos, principalmente lagoas e banhados. Esses tipos de sistemas representam importantes objetos de estudos, devido a forte influência antrópica a que estão submetidas em virtude de sua localização geográfica, sendo ambientes de baixa profundidade e que ocupam extensas áreas litorâneas (Marinho *et al.* 2004) e também porque podem ser considerados importantes laboratórios naturais (Esteves, 1998).

A planície costeira do Rio Grande do Sul apresenta vastas áreas de ambientes lacustres e terras úmidas, favoráveis à produção e emissão de metano. Neste contexto, o presente trabalho procura obter informações básicas deste processo em um ambiente raso oligotrófico. Tais informações são necessárias para iniciar os estudos de comparação entre diferentes locais e o papel das atividades humanas no aumento das emissões. Somente assim será possível estudar e propor estratégias mitigatórias para contribuir com a desaceleração do processo de efeito estufa.

Desta forma as hipóteses de trabalhos foram:

- A concentração e emissão de metano diferem entre diferentes zonas do mesmo lago.
- A condição de sazonalidade subtropical, principalmente pela variação da temperatura, é um importante fator influenciador na produção e emissão de metano.
- Os valores de produção e emissão encontrados deverão ser menores que os valores citados para ambientes eutróficos.

1.3 - Objetivos

- 1) Estimar e comparar a concentração e emissão de metano em um lago raso oligotrófico entre 3 áreas, litorânea não vegetada, litorânea vegetada, e limnética;
- 2) Relacionar os valores encontrados com as variáveis abióticas;
- 3) Comparar as concentrações de CH_4 encontradas com valores citados para outras condições.

Capítulo 2

Materiais e Métodos

2.1 - Área de Estudo

O estudo foi realizado no município de Rio Grande (Fig. 4) no Lago Polegar (Fig. 5), localizado ao lado do Laboratório de Limnologia, no Campus Carreiros da Fundação Universidade de Rio Grande.

O município do Rio Grande está situado na unidade mórfica da restinga do Rio Grande, ou barreira sul ($32^{\circ}01'40''$ S e $52^{\circ}05'40''$ W) (Vieira e Rangel, 1988). O clima da região é subtropical marítimo, com temperatura mínima de 2°C e média normal de inverno de $13,4^{\circ}\text{C}$. No verão a temperatura mínima é de 18°C e a média normal é de $22,6^{\circ}\text{C}$. Toda a região está próxima da convergência subtropical e sob a influência estabilizadora do extenso sistema lagunar Patos-Mirim, que imprime uma característica temperada quente à região costeira e marinha (Semenov e Berman, 1977), com dominância do vento NE ao longo do ano, com velocidade média de 5m/s (Stech e Lorenzetti, 1992).

O Lago Polegar foi construído há cerca de nove anos, a partir de escavações para aterramento para construção de prédios do *campus*, e apresenta uma área superficial de aproximadamente $1,0\text{ ha}$. e profundidade máxima de $1,5\text{ m}$. As características limnológicas classificam este lago como oligo-mesotrófico, com baixas concentrações de nutrientes, clorofila-*a* e alta transparência (Furlanetto, 2006).



Fig. 4 - Localização do município de Rio Grande

2.2 - Coletas de dados

As coletas foram realizadas no lago Polegar em três regiões (Fig. 5a, b e c):

- Região litorânea, colonizada por *Schoenoplectus californicus* (VEG)
- Região limnética rasa (LIT)
- Região limnética (LIM)

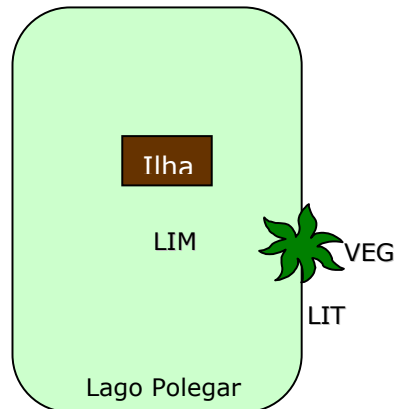


Fig. 05a – Ilustração do Lago Polegar e das três regiões de coleta.



Fig. 5b e 5c - Fotos do Lago Polegar. Em destaque as regiões de coleta.

Foram realizadas quatro saídas de campo no ano de 2007:

VERÃO	15 a 16/02/2007 e 26 a 27/03/2007
OUTONO	22 a 24/05/2007
INVERNO	18 a 20/07/2007
PRIMAVERA	25 a 27/09/2007

Tab. 03 – Datas da realização das coletas

2.2.1 - Caracterização Limnológica

Em cada saída de campo foram feitas a caracterização limnológica das regiões e as coletas de gases:

- Variáveis ambientais – vento e radiação solar (Estação Meteorológica de Rio Grande - Banco Meteorológico DGEO-FURG) e temperatura do ar;
- Variáveis limnológicas da coluna d'água - temperatura e oxigênio dissolvido em superfície e fundo (Oxímetro Oakton DO 300 series), condutividade (Conduvímetero Hanna HI 8733), pH (pHmetro Hanna HI 8314), profundidade (régua).

2.2.2 - Concentração de metano na coluna d'água (n=5)

Para a determinação da concentração de metano na coluna d'água foi adaptada a metodologia de Casper (1992) (Fig. 6):

- Utilizaram-se frascos de vidro vedados, de 12 ml, com pressão negativa (criada com o auxílio de uma seringa) em seu interior e contendo 1,6 g de NaCl. O NaCl expulsa o metano dissolvido na água para o espaço aéreo do frasco e impede sua oxidação.
- 8 ml de água foram coletados *in situ*, com auxílio de uma seringa, e adicionados nos frascos.

Os frascos são agitados e mantidos de cabeça para baixo, em refrigeração até o momento das análises.

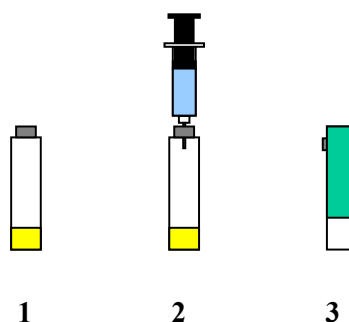


Fig. 6 – Ilustração relativa à coleta de metano na coluna d'água

2.2.3 - Emissão de metano por bolha (n= 5 a 7)

Para a captura das bolhas que se desprendem do sedimento foi utilizado um sistema composto de um funil invertido (24 cm de diâmetro de abertura), com um frasco de vidro acoplado na parte posterior à abertura (Fig. 7). O funil permanece encaixado numa base flutuante, mantendo a abertura do funil imersa. O sistema fica preso a uma poita para que não derive.

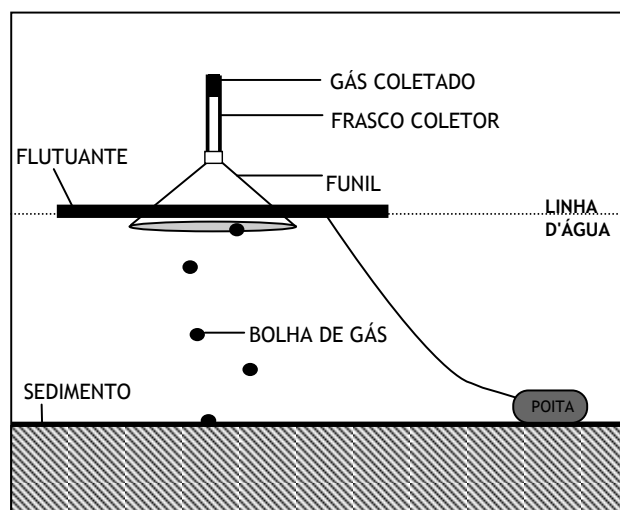


Fig. 7 - Esquema do funil coletor de bolhas

Etapas do procedimento:

- Preenchimento do frasco coletor com água do próprio lago
- Imersão de todo o sistema e do frasco coletor contendo água
- Acoplamento do frasco no funil

Desta forma, as bolhas que se desprendem do sedimento logo abaixo da área dos funis, entram no frasco coletor devido à diferença de densidade. O sistema permanece no lago por aproximadamente 24 horas, depois deste período os frascos coletores são substituídos.

Desacoplamento do frasco do funil:

- Imersão de todo o sistema
- Desacoplamento do frasco do funil (frasco sempre na vertical, de cabeça para baixo)
- Fechamento do frasco com septo de borracha
- Frascos mantidos de cabeça para baixo e em refrigeração até o momento das análises

Este procedimento foi realizado durante dois/três dias consecutivos em cada ponto e período de coleta (primavera, verão, outono e inverno), sendo que para determinação da emissão de metano em cada período, foram utilizados os valores médios em relação aos dias de coleta, fornecendo assim uma taxa da quantidade de metano emitido por tempo por área.

2.2.4 - Coleta de Sedimento

O sedimento foi coletado com o auxílio de um tubo de acrílico (amostrador tipo “core”), de 8 cm de diâmetro interno e 50 cm de comprimento (Fig. 8a e b), acoplado em um coletor do tipo Kajak. Foram coletados cinco testemunhos de cada região (n=5), somente os 10 cm superficiais foram considerados, sendo fracionados em seis sub-frações (0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8 e 8-10 cm), totalizando 60 sub-frações. Para cada sub-fração foram determinadas as concentrações de metano.



Fig. 8a e b – a) Foto do coletor tipo Kajak e do amostrador (“core”); b) Detalhe do core

2.2.5 - Metano no sedimento (n=5)

Para a determinação da concentração de metano no sedimento foi utilizada a metodologia proposta por Casper (1992) (Fig. 9):

- Colocaram-se 5 g de cada sub-fração em frascos de vidro de 24 ml.
- Adicionaram-se 5 ml de solução de NaOH 4%. A solução de NaOH expulsa o metano presente na água intersticial do sedimento para o espaço aéreo do frasco e impede a sua oxidação.
- Os frascos são fechados com septo de borracha e vedados com lacres de alumínio.
- Os frascos são mantidos de cabeça para baixo e armazenados em geladeira até o momento da análise.



Fig. 9 – Ilustração relativa à coleta de metano no sedimento

2.2.6 - Determinação de metano

As análises de metano foram feitas com cromatografia gasosa em um cromatógrafo VARIAN Star 3400, Varian Co, E.U.A., equipado com uma coluna Poropak-Q (60/100 mesh), detector FID a 200 °C, injetor a 120 °C e coluna a 85 °C, tendo nitrogênio (N₂) como gás de arraste.

2.2.7 – Análise de Dados

As análises estatísticas foram feitas com o pacote BioEstat 4.0 (Ayres *et al.*, 2005). Para as comparações entre os diferentes pontos de coleta em uma mesma data amostral (variação espacial), e entre os períodos do ano em um mesmo ponto (variação temporal) e entre frações do sedimento foi utilizada a análise não paramétrica (Teste de Kruskal Wallis) com $p < 0,05$ e o método posterior de Dunn. Para verificar a influência dos fatores abióticos na concentração e na emissão de metano, foi utilizado um teste não paramétrico de correlação (Correlação de Sperman).

Foram analisadas as variações espaciais e temporais da concentração de metano entre as frações (0-1 cm x 0-1 cm x 0-1 cm, 1-2 cm x 1-2 cm x 1-2 cm, e assim sucessivamente) equivalentes dos testemunhos de sedimento, entre as amostras da coluna d'água e entre as amostras de bolhas coletadas, considerando as áreas (litorânea, limnética rasa, e limnética) e as estações de coleta (verão, inverno e primavera), com o intuito de obter-se:

Variação Temporal:

- a variação da concentração de metano na área limnética entre verão, outono e primavera.
- a variação da concentração de metano na área limnética rasa entre verão, outono e primavera.
- a variação da concentração de metano na área litorânea entre verão, outono e primavera.

Variação Espacial

- a variação da concentração de metano no verão, entre as áreas litorânea, limnética rasa, e limnética.
- a variação da concentração de metano no outono, entre as áreas litorânea, limnética rasa, e limnética.

- a variação da concentração de metano no inverno, entre as áreas litorânea, limnética rasa, e limnética.

Capítulo 3

Resultados

3.1 - Variáveis abióticas

As variáveis abióticas são apresentadas na tabela abaixo (Tab. 4), e correspondem às médias do período de coleta, com exceção da variável vento, que é a média mensal. Na coleta do verão foi feita apenas uma medida de temperatura e oxigênio da água devido à diminuição da profundidade do lago, que com um máximo de 30,5 cm na área limnética, apresentou a coluna d'água demasiada homogênea, não possibilitando a realização de medidas de superfície e fundo.

		VERÃO			OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA		
		LIM	LIT	VEG	LIM	LIT	VEG	LIM	LIT	VEG	LIM	LIT	VEG
Temperatura Ar		27.6	27	26.6	13	14.3	14.3	27.0	26.6	13.0	14.7	14.7	13.8
Temperatura Água (°C)	sup	27.1	27.6	27.4	15.1	14.7	14.7	13.8	13.1	13.4	14.8	14.8	13.4
	fun				15	14.8	14.8	13.4	12.8	13.3	8.2	8.2	9.1
Oxigênio (mg/L)	sup	7.9	7.3	7.8	8.1	8.2	8.2	9.1	9.4	9.3	8.2	8.2	9.3
	fun				8.3	8.2	8.2	9.3	9.3	9.1	6.6	6.6	6.9
pH		7.6	7	7.3	6.7	6.6	6.6	6.9	6.3	6.8	6.8	6.9	6.8
Condutividade (µS/cm)		171	158	151	101	101	101	69.6	71.2	68.4	85.0	85.0	135.0
Secchi (cm)		30.5	21.6	15.3	88.3	85	85	135	133	119	133	117	103
Profundidade (cm)		30.5	21.6	15.3	88.3	85	85	135	133	119	133	117	103
Vento (m/s)		5,45	5,45	5,45	4,62	4,62	4,62	3,71	3,71	3,71			

Tab. 4 – Valores das variáveis abióticas (LIM= Limética; LIT= Limnética rasa; VEG= Litoral)

3.2 – Concentração de Metano no Sedimento

A variação espaço-temporal de concentração do metano encontrada no sedimento do Lago Pologar (Tab. 5) foi bastante grande, variando desde valores não detectáveis (inverno nas três áreas, diversas frações), até 6273,9 µmol/g de sedimento (verão, área limnética, fração de 4-6 cm). Entretanto, não houve diferenças estatísticas significativas na concentração de metano ao longo do perfil de sedimento.

3.2.1 - Variação Temporal da [CH₄]

A área limnética apresentou maiores valores de concentração de metano no sedimento durante o verão, nas frações 0-1, e 4-6 cm. Nas demais frações as diferenças não foram significativas.

A área limnética rasa apresentou maior concentração de metano durante o verão, na fração 0-1 cm. Nas demais frações as diferenças não foram significativas.

Na área de macrófitas verificou-se maior concentração de metano no verão, nas frações 0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8 cm. Apenas a fração 8-10 cm não apresentou diferenças significativas.

3.2.2 - Variação Espacial da [CH₄]

No verão, a área de macrófitas apresentou maior concentração de metano em relação à área litorânea em todas as frações. E a área limnética apresentou maior concentração de metano que a área limnética rasa nas frações 4-6, e 8-10 cm.

No outono nenhuma diferença significativa foi observada entre as áreas.

No inverno, a área de macrófitas apresentou maior concentração de metano em relação à área limnética na fração 6-8 cm.

COLETA	VER	OUT	INV	VER	OUT	INV	VER	OUT	INV
Area	LIM	LIM	LIM	LIT	LIT	LIT	VEG	VEG	VEG
Fração									
0-1	6.76	819.49	1.72	8.83	0	2.68	20.57	89.01	2.35
	3.33	0.75	2.75	3.02	0.92	2.27	810.84	133.90	1.91
	311.01	262.04	1.67	4.27		1.68	630.22	206.58	199.11
	22.42	60.22	1.95	9.24	2.65	6.89	421.12		27.37
	279.10	1.19	2.48	4.69	0.92	2.75	351.29	3.26	72.88
1-2	11.64	718.42	5.81	9.40	5.81	8.66	179.85	0	5.05
	4.97	0.61	1.98	3.73	10.01	5.39	1078.54	206.73	1.46
	2480.14	1078.09	10.93	12.63		6.90	1363.08	102.65	65.14
	14.26	43.96	16.05	5.79	13.57	128.11	1138.28	48.29	19.83
	669.82	1.45	30.10	13.72	1.54	37.54	1295.19	126.14	205.48
2-4	12.93	268.80	5.71	8.37		10.59	141.57	113.03	4.40
	7.12	0	10.31	8.56	7.30	0	1586.67	92.92	3.49
	5269.21	1237.66	12.70	17.41		19.74	2111.76	50.95	23.05
	18.13	55.62	15.97	29.57	13.75	445.41	1175.00	11.89	228.63
	1080.40	10.19	24.56	25.44	21.41	0.00	1634.37	39.49	155.22
4-6	45.15	127.16	5.35	6.06	2.34	9.90	26.89	57.99	5.88
	6273.92	3.72	7.70	4.98	12.98	15.16	798.86	256.07	10.71
	48.26	1046.83		7.00	1.31	38.26	434.54	47.53	52.20
	855.72	70.79	9.80	16.19	6.07	241.18	443.91	6.26	206.65
	362.01	3.58		7.21	5.09	4.72	844.38	49.44	134.20
6-8	18.02	147.46	11.49	7.50	4.30	9.63	126.07	125.23	15.65
	4.35	3.58	4.73	3.61	12.88	33.09	265.33	260.21	30.26
	4151.80	245.95	18.46	7.94	1.51	18.56	264.64	140.87	134.42
	31.90	21.16	6.79	4.86	4.84	112.08	213.76	56.59	140.01
	1994.24	2.85	14.36	12.15	12.39	2.73	326.38	138.13	191.51
8-10	33.11	119.04	37.20	6.34	15.61	10.93	88.63		13.68
	53.77	4.74	12.47	3.61	16.78	25.72	184.30	132.38	66.65
	5687.34	233.67	36.15	5.53	0	25.98	194.14	94.46	135.45
	29.24	35.73	26.19	18.30	9.86	11.53	137.69	35.65	307.32
	1366.23	2.78	9.55	11.75	7.62	31.16	227.83	98.69	366.17

Tab. 5 – Variação da concentração de metano ($\mu\text{mol/g}$) no sedimento do lago Polegar (Campus Carreiros – FURG) (LIM= Limética; LIT= Limnética rasa; VEG= Litorânea).

3.3 – Concentração de Metano na Coluna d'Água

Os valores de concentração de metano na coluna d'água variaram de 0,11 $\mu\text{mol/L}$ no inverno a 13,33 $\mu\text{mol/L}$ no verão, ambos valores ocorreram na área de macrófitas (Tab. 07).

3.3.1 - Variação Temporal da $[\text{CH}_4]$

As áreas limnética e limnética rasa apresentaram o mesmo padrão, com concentração de metano significativamente maior no verão e na primavera, em relação ao outono e inverno.

Na área de macrófitas a concentração de metano foi significativamente maior no verão em relação ao outono e inverno. Os valores da primavera foram significativamente maiores apenas em relação ao inverno.

3.3.2 - Variação Espacial da $[\text{CH}_4]$

No verão a área Litoral apresentou concentração de metano significativamente maior que as áreas limnética e limnética rasa.

No outono a área Litoral apresentou concentração de metano significativamente maior que a limnética.

No inverno, o padrão foi semelhante ao do outono, com a área Litoral apresentando concentração de metano significativamente maior que a limnética.

Na primavera a área Litoral apresentou concentração de metano significativamente maior que a limnética rasa.

3.3.3 - Variáveis Ambientais e $[\text{CH}_4]$

Os resultados das correlações de Spearman (r_s) demonstram que a concentração de metano na coluna d'água apresenta forte correlação positiva com a temperatura do ar e da água, correlação negativa a profundidade, e correlação positiva com o vento. Condutividade, oxigênio e pH não apresentaram correlação significativa.

Os valores obtidos de r_s e p podem ser observados na tabela abaixo (Tab. 6).

VARIÁVEL	p	r_s
Temperatura água	< 0,0001	0,81
Temperatura ar	<0,0001	0,77
O ₂	0,057	-0,33
Profundidade	0,01	-0,43
Vento	0,03	0,43
pH	0,74	-0,05
Condutividade	0,71	-0,06

Tab. 6 – Valores de p e de r_s obtidos nas análises de Correlação de Spearman

VERÃO			OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA		
LIM			LIM			LIM			LIM		
Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
2.02	2.98		0.92	0.57	0.37	0.18	0.56	0.56	2.13	1.64	1.58
3.82	4.34		0.35	0.53	0.23	0.19	0.25	0.25	1.59	0.75	1.97
1.43	4.42		0.54	0.54	0.33	0.25	0.25	0.25	2.27	0.62	1.54
3.97	3.75		0.69	0.45	0.20	0.25	0.23	0.23	2.49	2.23	1.79
4.47	4.64		0.87	0.51	0.37	0.40	0.19	0.19	2.18	1.28	1.74
LIT			LIT			LIT			LIT		
Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
1.47	1.37		0.79	0.38	0.48	0.46	0.29	0.25	2.61	1.68	1.04
1.52	1.57		0.61	0.77	0.39	0.26	0.41	0.32	1.63	1.47	1.26
1.31	1.86		0.92	0.86	0.37	0.23	0.32	0.29	1.27	1.30	1.01
1.29	1.15		0.81	0.72	0.26	0.29	0.27	0.27	1.83	1.65	0.91
1.24	1.23		0.71	1.03	0.38	0.23	0.31	0.30	1.87	0.79	0.99
VEG			VEG			VEG			VEG		
Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
9.12	9.23		0.79	1.43	0.42	0.36	0.30	0.19	2.90	2.05	3.15
7.15	7.66		1.90	1.12	0.44	0.37	0.45	0.38	1.97	2.31	2.40
8.85	12.57		1.40	0.73	0.45	0.11	0.37	0.28	1.74	1.48	0.13
10.89	6.01		1.16	1.25	0.47	0.29	0.37	0.55	1.75	1.45	1.60
6.39	13.33		1.58	0.81	0.53	0.35	0.29	0.63	1.56	1.78	2.57

Tabela 7 – Variação da concentração de metano ($\mu\text{mol/L}$) na coluna d'água do lago Polegar (Campus Carreiros – FURG) (LIM= Limnética; LIT= Limnética rasa; VEG= Litoral)

3.4 – Emissão de Metano por Bolhas

A emissão de metano através do desprendimento de bolhas no Lago Polegar variou de 0 a $298,58 \mu\text{mol/m}^2/\text{h}$, sendo que o maior valor foi encontrado na região litoral na primavera. O Lago Polegar tem área de aproximadamente 1ha, portanto estima-se que ele seja responsável pela emissão de até $47,77 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ de CH_4 . Considerando que a planície costeira do RS possui área de $6457,59 \text{ Km}^2$, estima-se que a emissão de CH_4 esteja próxima a $30,84 \text{ ton}\cdot\text{h}^{-1}$. Este valor é uma subestimativa da emissão pois sendo este ambiente oligo-mesotrófico deve emitir menos quando comparado aos mais eutróficos.

3.4.1 - Emissão Temporal de Metano

A região limnética apresentou a maior emissão na primavera em relação ao inverno e ao outono. Não houve diferenças significativas envolvendo os dados de verão. Os valores variaram entre 0 e 13,53 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$, sendo que a maior emissão ocorreu na primavera.

A região limnética rasa apresentou emissão de verão e de primavera maiores que de outono e inverno. Com valores variando entre 0 e 43,06 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$, sendo que a maior emissão ocorreu no verão.

A região de macrófitas não foi amostrada no verão, devido a baixa profundidade da coluna d'água, que permaneceu abaixo de 9 cm e não permitiu a imersão do sistema de funis. Entre outono, inverno e primavera a emissão variou de 0 a 295,58 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$, sendo que a maior emissão ocorreu na primavera, que apresentou valores maiores que o inverno e outono.

3.4.2 - Emissão Espacial de Metano

No verão, as emissões de metano variaram de 0 a 43,06 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$, sendo que a maior emissão ocorreu na região limnética rasa. Sendo que a região litorânea não foi amostrada nessa coleta (Tab. 8).

No outono, a região litorânea apresentou taxa de emissão maior que as regiões limnéticas e limnética rasa, com valores variando de 0 a 26,00 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$.

O inverno apresentou o mesmo padrão do outono, com a região litorânea apresentando emissões superiores às das regiões limnéticas e limnética rasa. Os valores variaram de 0 a 83,03 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$ sendo que a maior emissão ocorreu na região litorânea.

Na primavera se repete o padrão do outono e do inverno, no qual a região litorânea apresentou maior emissão que as regiões limnéticas e limnética rasa, com valores variando de 0 a 295,58 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$, sendo que a maior emissão ocorreu novamente na região litorânea.

VERÃO			OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA		
LIM			LIM			LIM			LIM		
Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
0,02	0,00		0,00	0,14	0,00	0,02	0,01	0,22	0,00	0,03	0,06
0,01	0,78		0,00	0,00	0,00	0,01	0,56	0,00	0,63	0,31	0,02
0,01	0,02		0,00	0,96	0,10	0,02	0,01	0,00	2,85	0,04	0,04
0,01	0,36		0,00	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	1,05	0,01	0,07
0,02			0,00	0,00	0,50	2,33	0,00	0,00	0,69	0,02	0,02
			0,00	0,00	0,14		0,00	0,00	13,53	0,04	0,02
			0,00	0,10	0,22				5,99	0,09	0,03
LIT			LIT			LIT			LIT		
Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
0,50	0,01		0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,39	0,07	0,10
8,32	0,39		0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,12	0,01	0,10
0,97	0,38		0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01	0,03	0,04	0,05
1,43	0,06		0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,05
1,67	1,16		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	1,08	
0,53	40,66		0,01	0,00	0,02	0,01			0,04	0,09	
1,83	8,53			0,03	0,01				0,07	0,06	
4,05	17,59										
43,06	2,85										
1,94	0,09										
VEG			VEG			VEG			VEG		
Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
			1,99	17,25	4,12	0,00	12,53	0,01	100,42	9,64	2,24
			26,00	9,46	0,26	14,36	0,02	1,94	12,91	271,88	295,58
			2,61	8,21	0,46	0,10	83,03	10,18	140,07	132,89	110,17
			14,12	0,41	0,66	6,00	1,41	0,07	1,66	57,29	170,46
			18,50	2,30	0,00	0,02	0,13	0,50	0,06	50,10	120,85
			6,00	2,45	0,00	0,00	0,02	0,01	0,05	0,96	72,73
			20,38	3,25	0,58	0,00	1,84	0,01	5,56	0,33	109,93
				0,03							
				0,01							

Tab. 8 – Variação da emissão de metano por bolhas ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$) do Lago Polegar (Campus Carreiros – FURG). (LIM= Limnética; LIT= Limnética rasa; VEG= Litoral)

Capítulo 4

Discussão

4.1 – Concentração de Metano no Sedimento

A produção de metano em sedimentos ocorre quando a matéria orgânica é degradada anaerobicamente. A etapa final desse processo é denominada metanogênese, ou seja, produção de metano (Conrad, 1989).

As variações temporais e espaciais da concentração e emissão de metano em ambientes aquáticos refletem a dependência dos processos associados à dinâmica do metano às alterações climáticas (Bange *et al.*, 1998; Heyer e Berger, 2000). Essas alterações podem estar relacionadas às variações na temperatura, na quantidade e na qualidade da matéria orgânica disponível, à presença de agregados microbianos e à concentração de oxigênio dissolvido (Marinho *et al.*, 2004). Áreas alagadas localizados em região temperadas e subtropicais, sofrem mudanças sazonais, tanto na temperatura como no grau de alagamento (Bartlet e Harriss, 1993). Variações sazonais também foram observadas para o Lago Polegar por Furlanetto (2006), e durante a realização deste trabalho, já que o mesmo se localiza na latitude 33 °S.

A variação na concentração de metano no sedimento do Lago Polegar apresentou maiores valores na área litorânea no período de verão, e menores valores na área limnética rasa no período de inverno. Essas diferenças provavelmente refletem a quantidade de matéria orgânica presente sobre o sedimento, uma vez que as macrófitas atuam como fornecedoras de matéria orgânica para os metanogênicos. Essa matéria orgânica é proveniente dos detritos das macrófitas e dos exudatos da raiz, o que estimula a produção do metano (Conrad *et al.*, 1989). Além disso, a decomposição desta matéria orgânica consome oxigênio, produzindo o ambiente favorável à metanogênese (Crill *et al.* 1991). O banco de macrófitas, na região litorânea, também funciona como um filtro, devido seu sistema de raízes e caules, permitindo um acúmulo da matéria orgânica autóctone e alóctone nessa região, o que explica as diferenças de concentrações de metano ocorrerem até a fração de 6-8 cm, o que não acontece nas regiões limnética e limnética rasa, que se limitam à camada superficial. As altas temperaturas do verão devem ser consideradas, haja visto que um aumento na temperatura aumenta o índice de redução de elétrons aceptores e, com menores concentrações de elétrons aceptores ocorre um efeito adicional positivo na produção do metano (Segers, 1998).

Fonseca *et al.* (2004) também encontraram maior concentração de metano na região litorânea quando comparada à área limnética na Lagoas Cabiúnas, Macaé-RJ, e sugere que isso ocorre pelo fato da matéria orgânica proveniente dos detritos das macrófitas, bem como da região do entorno da lagoa promoverem mudanças no sedimento na área das macrófitas, facilitando a metanogênese.

No Lago Polegar, a maior concentração de metano na área limnética em relação à limnética rasa pode ser explicada pela maior possibilidade de ocorrer anoxia em sedimento mais profundo devido o acúmulo de matéria de origem alóctone que pode facilmente chegar à área limnética.

Outro fator que deve ser considerado atuando sobre o padrão de metanogênese do Lago Polegar é o vento, que promove uma constante circulação da água. Em estudos de Produção Potencial de Metano (PPM) Segers (1998) afirma que a aeração *in situ* afeta significativamente o potencial de produção de metano, provavelmente devido às altas concentrações de elétrons aceptores. Entretanto a homogeneidade das variáveis encontradas no lago Polegar não permite sugerir qual o fator determinante das diferenças encontradas.

4.2 - Concentração de Metano na Coluna D'Água

A concentração de metano na coluna d'água refletiu o padrão encontrado no sedimento, apresentando valores significativamente maiores no verão, na região litorânea, e menores valores no inverno das áreas limnética e limnética rasa. Isso evidencia que a difusão em meio aquoso do sedimento para a coluna d'água é mais intensa nas áreas e nas épocas do ano onde a concentração de metano no sedimento é maior.

Assim como outros processos biológicos, a metanogênese também é influenciada pela temperatura, e pode refletir tanto na produção como na emissão de metano em ambientes aquáticos (Singh *et al.* 2000), o que pode explicar a forte correlação positiva entre a temperatura do ar e da água com a concentração de metano na coluna d'água. Uma possível relação entre temperatura e produção de metano considera que um aumento na temperatura aumenta a taxa de redução dos aceptores alternativos de elétrons (das reações que ocorrem anterior à metanogênese), que resulta em menores concentrações desses elétrons, e significa um efeito positivo adicional na produção de metano (Segers 1998).

Marinho *et al.* (2004) também encontraram grande variação temporal na concentração de metano na coluna d'água da Lagoa Jurubatiba-RJ, sendo que os maiores valores foram encontrados na região litorânea. A influência da temperatura sobre a concentração de metano na coluna d'água também foi observada para a Lagoa da Jurubatiba, que apresentou valores de metano significativamente superiores no verão. Assim como na Lagoa Jurubatiba, as concentrações de oxigênio dissolvido do Lago Polegar demonstraram que a coluna d'água manteve-se permanentemente oxigenada, apresentando concentrações mínimas de 7mg/L, que segundo Marinho, favorece a metanotrofia.

Palma-Silva *et al.* (2007) e Marinho *et al.* (Prelo) encontraram maiores valores de concentração de metano (até 389,32 $\mu\text{mol/l}$) no Lago dos Biguás, em Rio Grande, RS, ambiente naturalmente eutrofizado pela grande quantidade de guano de aves que recebe. Segundo Marinho *et al.* (2004), a metanogênese provavelmente seja influenciada pelo aporte de nutrientes, e o conseqüente aumento da concentração de metano na coluna d'água em função do processo de eutrofização pode acarretar o aumento da emissão de metano para a atmosfera.

Num estudo na planície de inundação do Rio Mogi Guaçu em São Paulo, Ballester e Santos (2001) mediram a concentração de metano no canal principal do rio, e em duas lagoas de ferradura, a Lagoa Diogo mantém conexão permanente com o rio, e a Lagoa do Infernã,

tem conexão com o rio apenas no período de cheia, através da planície de inundação. Nas lagoas, amostras de água da superfície e fundo (0,5 m) foram coletados em duas regiões, limnética e banco de macrófitas. O banco de macrófitas era composto por *Eichhornia azurea*, *Panicum pernambucense* e *Scirpus cubensis*. A concentração de metano foi constante ao longo do ano em ambas regiões amostradas, entretanto Ballester encontrou concentrações de metano até 100 vezes maiores no hipolímnio anóxico da Lagoa Infernã que no hipolímnio da Lagoa Diogo e no canal principal, com maiores valores ocorrendo no período de cheia e de altas temperaturas. O autor sugere que a condição de anoxia do hipolímnio e a estratificação térmica da Lagoa do Infernã possam ser os responsáveis pelo acúmulo de metano nessa região.

A concentração de metano do Lago Polegar, assim como descrito por Fonseca *et al.* (2004) para a Lagoa Cabiúnas, é pelo menos quatro vezes mais alta que a do Lago Diogo – SP e aproximadamente 9000 vezes maior que águas oceânicas superficiais (Tab. 9).

Ambientes costeiros, como o lago Polegar, são fortemente submetidos à ação do vento, e desta forma, as correlações encontradas entre [CH₄] x vento e profundidade devem ser tratadas de maneira conjunta, haja visto que o vento atuando sobre corpos de baixa profundidade pode promover a ressuspensão do sedimento por fricção, o que libera matéria orgânica para a coluna d'água e intensifica os processos decompositores, que por sua vez consomem o oxigênio disponível na coluna d'água, favorecendo a metanogênese. Além disso, essa perturbação imposta ao sedimento facilita que o metano produzido seja liberado para a coluna d'água, seja através de bolha ou difusão molecular.

LOCAL	[CH ₄] na Água (µmol/L)	Referência
Oceano Aberto (Águas superficiais)	0,0018 a 0,0031	Heyer, 1990
Lagoa Diogo (SP) Região Limnética	0,73 a 1,35	Ballester, 2001
Lagoa Diogo (SP) Banco de Macrófitas	0,84 a 2,60	Ballester, 2001
Lagoa Infernã (SP) Região Limnética	7,40 a 166,45	Ballester, 2001
Lagoa Infernã (SP) Banco de Macrófitas	4,7 a 148,86	Ballester, 2001
Lagoa Cabiúnas (RJ) Região Limnética	11,46 a 12,32	Fonseca, 2004
Lagoa Cabiúnas (RJ) Banco de Macrófitas	11,43 a 16,70	Fonseca, 2004
Lago Polegar (RS) Região Limnética	0,18 - 4,64	Presente trabalho
Lago Polegar (RS)	0,23 a 2,61	Presente trabalho

<i>Região Limnética rasa</i>		
Lago Polegar (RS)	0,11 a 13,33	Presente trabalho
<i>Região Litorânea</i>		
Lago dos Biguás (RS)	85,82 a 152,91	Dados não publicados
<i>Região Litorânea</i>		
Lago dos Biguás (RS)	291,95 a 389,32	Dados não publicados
<i>Região Limnética</i>		

Tab. 9 – Comparação de valores de [CH₄] em diferentes corpos hídricos

4.3 – Emissão de Metano por bolhas

Os resultados de emissão de metano por bolhas que se desprendem do sedimento do Lago Polegar mostraram que existe uma tendência das emissões serem maiores no período da primavera, na região de macrófitas. Dados de Bartlet e Harriss (1993), Updegraff *et al.* (2001) e modelos de Zhuang (2004) afirmam fortemente que a profundidade e a temperatura são os controles ambientais primários sobre a emissão de metano a partir de áreas alagadas. Oquist e Svensson, (2002) afirmam haver relação entre emissão de CH₄ e biomassa de macrófitas em áreas alagadas, e que essa relação reflete no suprimento de substratos adequados a metanogênese partir de produtores primários.

A variável vento atua relacionada à variável profundidade, haja visto que em ambientes rasos, os ventos promovem uma intensa circulação da coluna d'água, freqüentemente causando perturbações na superfície desse sedimento, e pode favorecer a liberação das bolhas contidas o sedimento.

No estudo de um lago raso hiper eutrófico subtropical da China, Xing *et al.* (2005) observaram grande variação sazonal na emissão de metano, com baixas emissões durante outono, inverno e primavera e altas emissões durante o verão. Os autores relatam a dependência entre a emissão de metano e o limiar de 25 °C na superfície do sedimento, sendo que as emissões eram bem maiores quando a temperatura da superfície do sedimento ultrapassava os 25 °C. Esse padrão, de maiores emissões no verão, difere do padrão dos lagos nórdicos, que apresentam picos de emissão durante primavera e outono (Cole e Caraco 1998).

Xing *et al.* (op. cit) também observaram relações positivas entre emissão e a concentração de Clorofila-*a*, e supõe que a alta produção de microalgas no verão contribua com as altas emissões de metano nesse período, haja vista que atuam como material orgânico autóctone, fornecendo substrato para os metanogênicos. A produção primária é um importante fator influenciador de emissão de metano em lagos subtropicais (Xing *et al.*, op. cit), entretanto, em lagos oligotróficos, que apresentam total transparência durante o ano todo como o Lago Polegar, este é um fator de menor importância, pois a concentração de clorofila-*a* é constantemente baixa.

Um estudo recente de Ding *et al.* (2005) indicaram que Carbono Orgânico Dissolvido (COD) não é um bom indicador de produção de metano, uma vez que contém ácidos fúlvicos, e

inibe a metanogênese, pois atua como um aceptor alternativo de elétrons. O mesmo foi observado por Xing *et al.* (2005).

Bridgham *et al.* (2006) afirmam que o efeito da variação da profundidade é de certa forma mais significativa em áreas alagadas que em turfeiras, devido ao menor potencial de oxidação dos solos orgânicos de áreas alagadas.

Capítulo 6

Considerações Finais

e

Perspectivas Futuras

Os resultados obtidos corroboram as hipóteses testadas:

1) A produção e emissão de metano diferem entre diferentes locais do mesmo lago.

A região litorânea apresentou maior concentração e emissão de metano que as demais regiões.

2) A condição de sazonalidade subtropical, principalmente pela variação da temperatura, é um importante fator influenciador na produção e emissão de metano.

A concentração e emissão do metano se intensifica com o aumento da temperatura.

3) Os valores de produção e emissão encontrados deverão ser menores que os valores citados para ambientes eutróficos.

Os valores encontrados para o Lago Polegar foram inferiores aos demais lagos citados.

Como existe o processo natural de eutrofização a tendência é que os ambientes se tornem progressivamente cada vez maiores produtores, e emitam maior quantidade de metano para a atmosfera. Desta forma salienta-se a importância da recuperação de corpos hídricos impactados, que estejam em processo de eutrofização artificial, bem como a manutenção daqueles que se encontram saudáveis, com o intuito de minimizar a metanogênese e conseqüentemente a emissão de metano para a atmosfera.

Outro fato observado é que a coluna d'água reflete o padrão de concentração do metano no sedimento, de maneira que os valores da concentração de metano na água são maiores quando os valores da concentração do metano no sedimento também são maiores.

Apesar da grande quantidade de ambientes aquáticos existentes no Brasil, é dada pouca importância a questão da metanogênese. Enquanto existem estimativas da emissão de metano a partir de áreas alagadas em toda América do Norte (Bridgham *et al.* 2006), no Brasil esses dados são escassos, sendo que no estado do Rio Grande do Sul são ausentes para ambientes naturais. Assim sendo, estudos sobre a metanogênese nesses ambientes tornam-se necessários para que a dinâmica do metano seja melhor entendida, e medidas de gestão e recuperação possam ser aplicadas. Soma-se ainda o fato da necessidade de dados de regiões subtropicais para utilização nos modelos globais de potencial de efeito estufa.

Huttunen *et al.* (2003) por exemplo, afirmam que para um maior entendimento do ciclo do carbono em lagos, são necessários além de mais dados, a integração de dados de lagos situados em diferentes regiões geográficas. Segundo Fletcher *et al.* (2004), o aquecimento global observado desde os anos 90, deve resultar no aumento da emissão de metano a partir de áreas alagadas, e um dos maiores consensos entre os pesquisadores é a questão de como as mudanças climáticas irão afetar essas emissões (Ehnhalt *et al.* 2001). Bridgham *et al.* (2006) também chamam a atenção para a necessidade de um maior entendimento para a questão dos impactos das mudanças climáticas em áreas alagadas, devido à grande emissão de metano a partir desses ambientes.

A partir deste cenário, estudos sobre a dinâmica do metano apresentam-se como promissora área de pesquisa, pois entende-se que o tema, de interesse regional e global, ainda não foi compreendido de maneira satisfatória.

Complementação do trabalho:

1) Análises de nutrientes e matéria orgânica no sedimento nos mesmos locais de amostragem do presente trabalho, com o intuito de correlacionar os resultados com a concentração e emissão de metano.

2) Correlacionar concentração e emissão de metano com a pista de vento.

3) Aplicação da mesma metodologia em diferentes lagos do Campus carreiros ou da região, verificando a influência de diferentes tipos de macrófitas, bem como da tipologia trófica na produção e emissão de metano para fins comparativos.

Pesquisa semelhante também poderia ser desenvolvida na Lagoa dos Patos, verificando assim a relação da salinidade com a metanogênese.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

1. Ayres,M., Ayres,M.J., Ayres,D.L., Santos,A.S., 2005. BioEstat - Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas.
2. Baird,C., 1998. Environmental Chemistry. 2. ed. W. H. Freeman and Company.
3. Ballester,M.V.R., dos Santos,J.E., 2001. Biogenic gases in tropical floodplain river, *Brazilian Archives of Biology and Technology* 44, pp. 141-147.
4. Bange,H.W., Dahlke,S., Ramesh,R., Meyer-Reil,L.A., Rapsomanikis,S., Andreae,M.O., 1998. Seasonal study of methane and nitrous oxide in the coastal waters of the southern Baltic Sea, *Estuarine Coastal and Shelf Science* 47, pp. 807-817.
5. Bartlett,K.B., Harriss,R.C., 1993. Review and Assessment of Methane Emissions from Wetlands 1, *Chemosphere* 26, pp. 261-320.
6. Bastviken,D., Cole,J., Pace,M., Tranvik,L., 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, *Global Biogeochemical Cycles* 18.
7. Bridgham,S.D., Megonigal,J.P., Keller,J.K., Bliss,N.B., Trettin,C., 2006. The carbon balance of North American wetlands, *Wetlands* 26, pp. 889-916.
8. Bubier,J.L., Moore,T.R., 1994. An Ecological Perspective on Methane Emissions from Northern Wetlands, *Trends in Ecology & Evolution* 9, pp. 460-464.
9. Cao,M.K., Gregson,K., Marshall,S., 1998. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change, *Atmospheric Environment* 32, pp. 3293-3299.
10. Capone,D.G., Kiene,R.P., 1988. Comparison of Microbial Dynamics in Marine and Fresh-Water Sediments - Contrasts in Anaerobic Carbon Catabolism, *Limnology and Oceanography* 33, pp. 725-749.
11. Carmouze,J., 1994. O Metabolismo dos Ecossistemas Aquáticos: Fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas. Edgard Blucher/FAPESP, São Paulo, São Paulo.
12. Casper,P., Methane production in lakes of different trophic state, 1992. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, 37, pp. 149-154. *Apud* in Fonseca, 2004 Fonseca,A.L.D., Minello,M., Marinho,C.C., Esteves,F.D., 2004. Methane concentration in water column and in pore water of a coastal lagoon (Cabiunas Lagoon, Macae, RJ, Brazil), *Brazilian Archives of Biology and Technology* 47, pp. 301-308.
13. Casper,P., Maberly,S.C., Hall,G.H., Finlay,B.J., 2000. Fluxes of methane and carbon dioxide from a small productive lake to the atmosphere, *Biogeochemistry* 49, pp. 1-19.
14. Cole,J.J., Caraco,N.F., 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆, *Limnology and Oceanography* 43, pp. 647-656.
15. Conrad,R., 1989. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Wiley, New York.

16. Crill, P.M., Harriss, R.C., Bartlett, K.B., 1991. Methane fluxes from terrestrial wetland environments. In: J. E. Rogers and W. B. Whitman (Eds.). *Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides and halomethanes*. Washington, DC, pp. 91-109.
17. Cronin, G., Lewis, W.M., Schiehsler, M.A., 2006. Influence of freshwater macrophytes on the littoral ecosystem structure and function of a young Colorado reservoir, *Aquatic Botany* 85, pp. 37-43.
18. Ding, W.X., Cai, Z.C., Tsuruta, H., 2005. Factors affecting seasonal variation of methane concentration in water in a freshwater marsh vegetated with *Carex lasiocarpa*, *Biology and Fertility of Soils* 41, pp. 1-8.
19. Dlugokencky, E.J., Steele, L.P., Lang, P.M., Masarie, K.A., 1994. The Growth-Rate and Distribution of Atmospheric Methane, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 99, pp. 17021-17043.
20. Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Bruhwiler, L., Masarie, K.A., Lang, P.M., Miller, J.B., Tans, P.P., 2003. Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state?, *Geophysical Research Letters* 30.
21. Ehhalt, D., Prather, M., Dentener, F., Dlugokencky, E.J., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., Kirchhoff, V., Matson, P., Midgley, P., Wang, M. Atmospheric chemistry and greenhouse gases. 239-287. 2001. Cambridge University Press. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change*.
22. El-Fadel, M., Massoud, M., 2001. Methane emissions from wastewater management, *Environmental Pollution* 114, pp. 177-185.
23. EPA. Methane. U.S. Environmental Protection Agency . 27-4-2007. <http://www.epa.gov/methane/>
24. Esteves, F.A., 2008. Lagoas Costeiras: origem, funcionamento e possibilidade de manejo. *Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba do Município de Macaé (RJ)*. NUPEN-UFRJ. pp. 63-90.
25. Fletcher, S.E.M., Tans, P.P., Bruhwiler, L.M., Miller, J.B., Heimann, M., 2004. CH₄ sources estimated from atmospheric observations of CH₄ and its ¹³C/¹²C isotopic ratios: 1. Inverse modeling of source process, *Global Biogeochemical Cycles*, 18.
26. Fonseca, A.L.D., Minello, M., Marinho, C.C., Esteves, F.D., 2004. Methane concentration in water column and in pore water of a coastal lagoon (Cabiunas Lagoon, Macaé, RJ, Brazil), *Brazilian Archives of Biology and Technology* 47, pp. 301-308.
27. Furlanetto, L., 2006. Variações nictimerais e sazonais das principais variáveis limnológicas de um pequeno lago raso do extremo sul do Brasil. Trabalho de conclusão do curso de biologia da FURG-RS.
28. Golterman, H.L., Clymo, R.S., 1978. *Methods of Physical and Chemical Analysis of Freshwaters*. Oxford.

29. Grunfeld, S., Brix, H., 1999. Methanogenesis and methane emissions: effects of water table, substrate type and presence of *Phragmites australis*, *Aquatic Botany* 64, pp. 63-75.
30. Hein, R., Crutzen, P.J., Heimann, M., 1997. An inverse modeling approach to investigate the global atmospheric methane cycle, *Global Biogeochemical Cycles* 11, pp. 43-76.
31. Heyer, J., Berger, U., 2000. Methane emission from the coastal area in the southern Baltic Sea, *Estuarine Coastal and Shelf Science* 51, pp. 13-30.
32. Holzapfelschorn, A., Conrad, R., Seiler, W., 1986. Effects of Vegetation on the Emission of Methane from Submerged Paddy Soil, *Plant and Soil* 92, pp. 223-233.
33. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Lee, H., Callander, B.A., Haites, E.F., Harris, N., Maskell, K. Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. 1994. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
34. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. IPCC - Climate Change 2001: The Scientific Basis - Summary for Policymakers. 2001. Cambridge University Press.
35. Houghton, J.T., Meiro Filho, L.G., Callaner, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. & M.K. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. - The Science of the Climate Change. 584. 1996. Cambridge University Press.
36. Huttunen, J.T., Alm, J., Liikanen, A., Juutinen, S., Larmola, T., Hammar, T., Silvola, J., Martikainen, P.J., 2003. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions, *Chemosphere* 52, pp. 609-621.
37. INPE – CPTEC, 2007. Princípios de Meteorologia e Meio Ambiente. <http://www.cptec.inpe.br>
38. Juutinen, S., Alm, J., Larmola, T., Huttunen, J.T., Morero, M., Martikainen, P.J., Silvola, J., 2003. Major implication of the littoral zone for methane release from boreal lakes, *Global Biogeochemical Cycles* 17.
39. Kankaala, P., Bergstrom, I., 2004. Emission and oxidation of methane in *Equisetum fluviatile* stands growing on organic sediment and sand bottoms, *Biogeochemistry* 67, pp. 21-37.
40. Kankaala, P., Kaki, T., Makela, S., Ojala, A., Pajunen, H., Arvola, L., 2005. Methane efflux in relation to plant biomass and sediment characteristics in stands of three common emergent macrophytes in boreal mesoeutrophic lakes, *Global Change Biology* 11, pp. 145-153.
41. Lelieveld, J., Crutzen, P.J., Dentener, F.J., 1998. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane, *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 50, pp. 128-150.

42. Marinho, C., Fonseca A.L.S., Minello, M., Esteves, F.A., 2004. 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: Rima (Eds.). Pesquisas de longa duração na restinga de Jurubatiba - Ecologia, história natural e conservação. pp. 273-294.
43. Marinho, C.C., Palma Silva, C., Albertoni, E.F., Trindade, C.R. and Esteves, F.A. Seasonal dynamics of methane in the water column of two subtropical lakes differing in trophic status. *Brazilian Journal of Biology* (Prelo).
44. Oquist, M.G., Svensson, B.H., 2002. Vascular plants as regulators of methane emissions from a subarctic mire ecosystem, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 107.
45. Palma-Silva, C., Marinho, C.C., Barros, M.P.F., Esteves, F.A., Albertoni, E.F., Giacomini, I.B., Furlanetto, L.M., 2007. Metanogênese em dois lagos rasos subtropicais com diferentes tipologias tróficas (Rio Grande-RS), *XIX Semana Nacional de Oceanografia - 14 a 19 de outubro de 2007 - Fundação Universidade Federal do Rio Grande - Rio Grande, RS*.
46. Ramanujan, K. Methane's Impacts on Climate Change May Be Twice Previous Estimates. Goddard Space Flight Center - NASA . 18-7-2005.
<http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/methane.html>
47. Ramaswamy, V., Boucher, O., Haigh, J., Hauglustaine, D., Haywood, J., Myhre, G., Nakajima, T., Shi, G.Y., Solomon, S. IPCC - Climate Change 2001: The Scientific Basis - Radioactive forcing of climate change. 349-416. 2001.
Climate Change 2001: The Scientific Bases.
48. Rodhe, H., 1990. A Comparison of the Contribution of Various Gases to the Greenhouse-Effect, *Science* 248, pp. 1217-1219.
49. Saarnio, S., Saarinen, T., Vasander, H., Silvola, J., 2000. A moderate increase in the annual CH₄ efflux by raised CO₂ or NH₄NO₃ supply in a boreal oligotrophic mire, *Global Change Biology* 6, pp. 137-144.
50. Schutz, H., Seiler, W., Conrad, R., 1990. Influence of Soil-Temperature on Methane Emission from Rice Paddy Fields, *Biogeochemistry* 11, pp. 77-95.
51. Segers, R., 1998. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes, *Biogeochemistry* 41, pp. 23-51.
52. Semenov, V.N., Berman, I.S. Biogeographic aspects of the distribution and dynamics of water masses of the South American coast. *Oceanology* 17[6], 710-718. 1977.
53. Shannon, R.D., White, J.R., Lawson, J.E., Gilmour, B.S., 1996. Methane efflux from emergent vegetation in peatlands, *Journal of Ecology* 84, pp. 239-246.
54. Shindell, D.T., Faluvegi, G., Bell, N., Schmidt, G.A., 2005. An emissions-based view of climate forcing by methane and tropospheric ozone, *Geophysical Research Letters* 32.

55. Singh, S.P., Kulshreshtha, K., Agnihotri, S., 2000. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands. *Chemosphere - Global Change Science* 2, 39-46.
56. Stech, J.L., Lorenzetti, J.A., 1992. The response of South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research* 97(C6), pp. 9507-9520
57. Tokida, T., Miyazaki, T., Mizoguchi, M., Seki, K., 2005. In situ accumulation of methane bubbles in a natural wetland soil, *European Journal of Soil Science* 56, pp. 389-395.
58. Updegraff, K., Bridgham, S.D., Pastor, J., Weishampel, P., Harth, C., 2001. Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water table manipulation, *Ecological Applications* 11, pp. 311-326.
59. Verville, J.H., Hobbie, S.E., Chapin, F.S., Hooper, D.U., 1998. Response of tundra CH₄ and CO₂ flux to manipulation of temperature and vegetation, *Biogeochemistry* 41, pp. 215-235.
60. Vieira E.F, Rangel, S.R.S. 1988. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sócio demográfica. Ed. Sagra, Porto Alegre.
61. Woese, C.R., 1987. Bacterial Evolution, *Microbiological Reviews* 51, pp. 221-271.
62. Xing, Y.P., Xie, P., Yang, H., Ni, L.Y., Wang, Y.S., Rong, K.W., 2005. Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China, *Atmospheric Environment* 39, pp. 5532-5540.
63. Zhuang, Q., Melillo, J.M., Kicklighter, D.W., Prinn, R.G., McGuire, A.D., Steudler, P.A., Felzer, B.S., Hu, S., 2004. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model, *Global Biogeochemical Cycles* 18.
64. Zinder, S., 1993. Physiological Ecology of Methanogens. In: James G. Ferry (Eds.). *Methanogenesis Ecology, Physiology, Biochemistry & Genetics*. Chapman & Hall, New York - London, pp. 12