

Universidade Federal do Rio de Janeiro

FLUXOS DE METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM LAGOAS COSTEIRAS HÚMICAS: UMA
ABORDAGEM ESPAÇO-TEMPORAL

Rodrigo Weber Felix

Macaé

2014



FLUXOS DE METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM LAGOAS COSTEIRAS HÚMICAS: UMA
ABORDAGEM ESPAÇO-TEMPORAL

Rodrigo Weber Felix

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Prof. Dr. Vinicius Fortes Farjalla

Macaé

Novembro de 2014

FLUXOS DE METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM LAGOAS COSTEIRAS HÚMICAS: UMA
ABORDAGEM ESPAÇO-TEMPORAL

Rodrigo Weber Felix

Orientador: Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Vinicius Fortes Farjalla

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Aprovada por:

Presidente, Prof. Doutor Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Prof. Doutor Mauricio Mussi Molisani

Prof. Doutor Nathan Oliveira Barros

Macaé

Novembro de 2014

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador Prof. Marcos Paulo Barros pela confiança no trabalho, por toda cobrança e incentivo, sem colher de chá em muitos momentos e com colher de chá em poucos, no entanto, em momentos que eu mais precisei. Obrigado pelas excelentes aulas de ecologia e limnologia em cada conversa, seja no laboratório, no escritório e na ótima disciplina sobre restauração de ambientes aquáticos. Obrigado por ser o grande ícone e compartilhar um pouco da sua experiência na minha formação profissional desde o final da graduação e ao longo de todo o mestrado. Obrigado por permitir que eu coordenasse uma pequena parte deste grande projeto PELD ao seu lado, onde em muitos momentos de tensão achei que estava sozinho, mas você sempre esteve orquestrando tudo nos bastidores e permitindo que eu aprendesse com meus erros. Acima de tudo obrigado pelas oportunidades para adquirir conhecimento e experiência ao seu lado e de outros excelentes pesquisadores no PELD, no monitoramento das lagoas do PARNA Jurubatiba e da lagoa Imboassica, na participação de projetos de pesquisadores visitantes e por ter me encaminhado para grandes projetos na Amazônia, entre eles o PRONEX, o monitoramento limnológico do lago Batata e dos Igarapés na reserva de Saracá-Taquera, onde me foi permitido conhecer outros profissionais, outra forma de pensar, outras linhas de pesquisa e entender um pouco do complexo mundo de águas de três cores distintas no norte do nosso país, ainda um tanto quanto desconhecido da maioria dos brasileiros.

Agradeço também ao meu co-orientador Prof. Vinicius Farjalla pelo papel fundamental no escopo de um grande trabalho de ciclagem de carbono, onde pude participar, dar uma pequena contribuição e gerar os dados da minha dissertação. Obrigado pelas sugestões na análise de dados, pelas conversas sobre delineamento amostral e pela excelente disciplina ministrada junto com a Prof^a. Ana Petry. MUITÍSSIMO obrigado por conceder a bolsa de mestrado, fundamental para ajudar e incentivar um aluno de pós graduação em sua pesquisa acadêmica.

Obrigado Prof. Francisco Esteves pelo acolhimento, pelo encaminhamento ao Prof. Marcos Paulo, pelo apoio e oportunidades através da participação nos projetos de pesquisa junto à outros grandes profissionais limnólogos, ictiólogos e ecólogos. Obrigado pelas belíssimas reflexões sobre ciência e “o que é ser um cientista”, nos corredores do laboratório e da Universidade, através das histórias da mariposa, do casulo, da rã, entre outras.

Obrigado Prof. Reinaldo Bozelli pela oportunidade na participação de outros projetos e pela belíssima aula de ecologia e restauração de ecossistemas durante uma das campanhas amazônicas na área de plantio do Iago Batata.

Obrigado Prof. João Leal por toda orientação nos processos ecossistêmicos e nos organismos que regem parte da complexa dinâmica dos igarapés amazônicos, muito obrigado também por todo aprendizado em campo, laboratório e por orientações em como agir na selvagem Amazônia.

Agradeço também aos técnicos e alunos do Laboratório de Limnologia da UFRJ em Macaé e no Rio de Janeiro, onde passei os últimos anos vivendo um grande aprendizado, principalmente aos queridos Fabricio, Silvina, Danieli, Maycon, Rafaela, Izabela, Alana, Thiago Benevides, Thiago Martins, Mariana, Leonardo, Bruno Forte, Bruno Soares, Bruno Cortat, João Marcelo, Cristian, Virginia, Paula, Camila, Cleide, João Mário, Guilherme, Helder, Jersica, Luan, Nathalia, Orlando, Pedro Barbosa, Nicholas, Vinicius Scofield e Joseph pelas excelentes discussões científicas, pela exaustiva ajuda no campo, pela ajuda nas diversas análises em laboratório após o campo e obrigado por permitirem que eu adquirisse um pouquinho da experiência de cada um na diversidade de estudos dentro do campo da limnologia.

Dentre estes um agradecimento ainda mais especial ao Pedro Barbosa e Nicholas pela excelente contribuição no texto da dissertação e na análise de dados. Obrigado Fabricio e João Marcelo pelo grande aprendizado das técnicas de campo. Obrigado Bruno Forte, Rafaela, Izabela, Cristian, Bruno Soares, Maycon, Virginia e Mariana pela atenção e ajuda fundamental nas análises laboratoriais de CH₄, CO₂, P, N, COD, água intersticial, COT, comprimento e peso seco das macrófitas aquáticas e clorofila-*a*. Obrigado Silvina, Danieli, Fabricio, Bruno Soares e João Marcelo pelo empenho na trabalhosa confecção de material para o campo.

Obrigado Prof. Maurício Mussi e Prof. José Nepomuceno pelas ótimas sugestões na qualificação de mestrado.

Obrigado Prof. Nathan Barros e Vinicius Scofield pelo auxílio em muitas dúvidas nos enormes e-mails, atenciosamente respondidos, e pelas ótimas sugestões quanto a bibliografia para estudo.

Obrigado Prof. André Furtado e toda a equipe pela atenção e ótimo trabalho na classificação das imagens de satélite, fundamentais para meu trabalho.

Agradeço a todos os professores membros da banca examinadora titular e suplente Dr. Nathan Barros, Dr. Maurício Mussi, Dr. Albert Suhett e Dr. Francisco Esteves pela aceitação do convite e pela análise do documento.

Muito obrigado aos professores do PPGCiAC e professores visitantes pelas excelentes disciplinas ministradas na formação dos alunos de pós-graduação deste programa.

Obrigado NUPEM-UFRJ pela formação acadêmica de excelência.

Obrigado aos órgãos e instituições NUPEM-UFRJ, PPGCiAC, CENPES-PETROBRAS, ICMBio e CNPq-PELD por todo o financiamento e apoio neste trabalho realizado no belíssimo e curiosíssimo PARNA da Restinga de Jurubatiba.

À Família e amigos um agradecimento mais que merecido por todo o carinho dedicado, mesmo durante os poucos momentos que estive próximo durante os últimos dois anos e meio dedicados a pós-graduação. Obrigado pai, mãe, Tamara, André, João, Cristiane, Erika, avó Gláucia, Daniel, Pablo, Pedro e Raphael por todo o apoio.

No entanto, gostaria de fazer agradecimentos especiais ao meu pai (Luíz) pela educação e incentivo (por sinal o maior incentivador do meu estudo em toda minha vida). Obrigado pela “bolsa pai” pois sem ela a vida seria muito mais difícil. Obrigado pelas oportunidades que você sempre procura me oferecer na vida, dentre elas, ter me apresentado ao Prof. Francisco e ao laboratório de limnologia.

Obrigado mãe (Cristina) pela educação, pela paciência, muita paciência, principalmente na última fase de escrita da dissertação e após o acidente. Obrigado pela “bolsa mãe” com direito a todo o conforto que tenho em casa e por lavar as benditas camisas que voltavam completamente amareladas após o contato com as águas ricas em compostos húmicos da lagoa Comprida. Além disso, obrigado por ter sido integrante direta da equipe de limnologia me ajudando a preparar a alimentação para sustentar a energia e a consciência dos destemidos pesquisadores no campo.

Obrigado Tamara, por todo o companheirismo, carinho e suporte emocional que facilitaram bastante na difícil travessia deste mestrado. Obrigado também por ser integrante direta do laboratório de limnologia nos ajudando a preparar material para a coleta, no trabalho de campo e pela ótima companhia nos finais de semana de muito trabalho frente ao cromatógrafo gasoso.

Por último, não menos importante, obrigado Deus, por ter uma ótima vida, com direito a trabalho, educação, saúde, conforto e repleta de pessoas maravilhosas.

Ficha Catalográfica

Felix, Rodrigo Weber

Fluxos de Metano e Dióxido de Carbono Em Lagoas Costeiras Húmicas: Uma Abordagem Espaço-Temporal. [Macaé] 2014.

xv, 96p. 29,7cm

Orientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Prof. Dr. Vinicius Fortes Farjalla

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Sócio-Ambiental de Macaé (NUPEM), Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação (PPGCiAC), 2014

Referências Bibliográficas: p. 97-107.

1. Emissão de metano. 2. Emissão de dióxido de carbono. 3. Balanço de carbono. 4. Região litorânea. 5. Macrófitas aquáticas emersas. 6. Fluxo ebulitivo. 7. Fluxo difusivo. 8. Lagoas costeiras. I. Figueiredo-Barros, Marcos Paulo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Sócio-Ambiental de Macaé, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação. III. Título

Resumo

Fluxos De Metano E Dióxido De Carbono Em Lagoas Costeiras Húmicas: Uma Abordagem Espaço-Temporal

Rodrigo Weber Felix

Orientador: Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Vinicius Fortes Farjalla

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

O objetivo deste trabalho foi estimar as entradas e saídas de carbono e determinar quais fatores regularam estes fluxos, considerando as diferentes características entre regiões abertas (limnéticas) e regiões amplamente colonizadas por macrófitas aquáticas emersas (litorâneas) nas lagoas costeiras Comprida e Jurubatiba, sistemas aquáticos rasos e húmicos localizados no norte do Estado do Rio de Janeiro. Neste sentido foi testada a hipótese que afirma que ecossistemas aquáticos com estas características não são fontes de carbono para a atmosfera, ao contrário do recomendado pela literatura atual, ao considerar o importante papel sequestrador das regiões litorâneas para o balanço de carbono. Para atingir o objetivo foram estimados os fluxos de CH_4 e CO_2 na coluna d'água (difusivos) e via macrófitas aquáticas através da utilização de câmaras estáticas flutuantes, e fluxos por bolhas desprendidas do sedimento (ebulitivo) através da utilização de funis invertidos. Em conjunto, foram realizadas estimativas das áreas classificadas como regiões limnéticas e litorâneas em períodos sazonais distintos através de sensoriamento remoto e foi realizado o monitoramento de variáveis limnológicas e meteorológicas ao longo de cinco campanhas no período de junho de 2012 à agosto de 2013. Para verificar a ocorrência de variabilidade espacial nos fluxos de CH_4 e CO_2 , assim como possíveis diferenças significativas entre regiões e ecossistemas, foram realizadas análises de variância paramétrica (ANOVA) e não paramétrica (Kruskal-Wallis), dependendo

dos pressupostos alcançados, seguidas de pós-teste de Tukey e Dunn, respectivamente. Com o objetivo de diminuir a dimensionalidade dos dados e selecionar as variáveis abióticas e meteorológicas que apresentaram maior variabilidade entre as estações de coleta e entre campanhas foram empregadas análises de componentes principais (PCA). Por fim, as relações entre os fluxos totais de CH₄ e CO₂ com as variáveis abióticas de maior variabilidade entre estações de coleta foram testadas utilizando-se o critério de seleção de Akaike. Foi observado que os fluxos ebulitivos e via macrófitas aquáticas emersas foram aqueles que mais contribuíram com as emissões de CH₄ (mais de 90% do total emitido) e os fluxos difusivos foram responsáveis por cerca de 99% das emissões totais de CO₂. Ao contrário do esperado, os resultados obtidos dos fluxos de CO₂ via macrófitas, apesar de terem contribuído com a fixação de CO₂, impulsionaram significativamente a emissão deste gás para a atmosfera. Também foi observado que a regulação dos fluxos de carbono esteve majoritariamente ligada aos aportes de carbono alóctone (originado da restinga) e principalmente autóctone (originado da excreção e morte das macrófitas aquáticas emersas). Além disso, apesar do curto período de amostragem, foi observado efeito direto e indireto do regime de precipitação e da pressão atmosférica sobre a magnitude dos fluxos de ambos os gases estudados. A hipótese inicial foi rejeitada. Apesar das macrófitas aquáticas emersas terem apresentado elevados níveis de sequestro de carbono em porções do sistema que apresentaram menor senescência destes vegetais, estas porções não cobriram as elevadas taxas de respiração e decomposição de vegetais em processo de senescência e as emissões de CH₄ no âmbito do balanço de carbono, e menos ainda em potencial de aquecimento global. Sendo assim, mesmo lagoas costeiras rasas com ampla colonização de macrófitas aquáticas emersas agem como fontes de carbono em períodos de ampla senescência destes vegetais, principalmente diante das modificações ecossistêmicas geradas pelo extremo evento de chuvas e a elevação abrupta do nível da água no verão anterior ao período de amostragem.

Palavras-chave: Emissão de metano, emissão de dióxido de carbono, balanço de carbono, região litorânea, macrófitas aquáticas emersas, fluxo ebulitivo, fluxo difusivo, lagoas costeiras húmicas.

Abstract

Methane And Carbon Dioxide Fluxes In Humic Coastal Lagoons: A Spatio-Temporal Approach

Rodrigo Weber Felix

Orientador: Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Vinicius Fortes Farjalla

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

The aim of this study was to estimate the inputs and outputs of carbon and determine which factors regulated these fluxes, considering the different characteristics between open regions (limnetic) and regions largely colonized by emergent aquatic macrophytes (littoral) in Comprida and Jurubatiba coastal lagoons, shallow and humic aquatic systems located in northern State of Rio de Janeiro. In this context we tested the hypothesis that states that aquatic ecosystems with these characteristics are not carbon sources to the atmosphere, contrary as recommended by current literary model, considering the important carbon influx role of these littoral regions to the carbon balance. To achieve this objective methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) fluxes were estimate in the water column (diffusive flux) and via macrophytes using floating static chambers and from detached bubbles in the sediment (ebulitive flux) by using inverted funnels. Together, lagoons areas classified as limnetic and littoral regions in different seasonal periods were estimate through remote sensing and limnological and meteorological variables were also monitored over five campaigns conducted from June 2012 to August 2013. To check the occurrence of spatial variability between CH₄ and CO₂ fluxes, as well as possible differences between regions and ecosystems, parametric analysis of variance (ANOVA) and nonparametric (Kruskal-Wallis) were attained depending on the reached assumptions. To reduce the dimensionality of the data and select the abiotic and meteorological variables that have greater variability between sampling

stations and between campaigns principal component analysis (PCA) were achieved. Finally, the relationship between CH₄ and CO₂ total fluxes with the abiotic variables of greater variability between sampling stations were tested using the selection criteria of Akaike. It was observed that ebullitive and emergent macrophytes fluxes were the main output that contributed to CH₄ emissions (more than 90% of the total emissions) and diffusive fluxes were responsible for about 99% of total CO₂ emissions. Contrary to predictions, the results of the CO₂ fluxes via macrophytes, despite having contributed to the CO₂ fixation, significantly boosted the emission of this gas into the atmosphere. It was also observed that the regulation of carbon fluxes was mainly linked to the input of allochthonous carbon (originated from the restinga) and especially autochthonous carbon (originated from excretion and death of emergent aquatic macrophytes). Furthermore, despite the short sample period, it was observed direct and indirect effects of precipitation regime and atmospheric pressure on the magnitude of both studied gases fluxes. The initial hypothesis was rejected, despite emergent aquatic macrophytes have shown high levels of carbon sequestration in portions of the system that showed less senescence of these vegetation, these portions did not covered the high rates of respiration and macrophytes decomposition of another areas and CH₄ emissions under the final carbon balance and even less under global warming potential. Thus, even shallow coastal lagoons with widespread emergent aquatic macrophytes colonization, act as carbon sources during periods of extensive senescence of these vegetation, which have been highlighted on the ecosystems changes generated by extreme rainfall event and the abrupt rise in water level during the previous sampling period to summer.

Key-words: methane emissions, carbon dioxide emissions, carbon balance, littoral regions, emergent aquatic macrophytes, ebullitive flux, diffusive flux, coastal lagoons.

Índice de Ilustrações

Figura 1. Figura esquemática do perfil vertical de profundidade do sedimento, coluna d'água e atmosfera mostrando os processos de fixação de CO ₂ e emissão de CH ₄ e CO ₂ em ambientes aquáticos continentais rasos. Referências: (Cole et al., 2000; Esteves, 2011; Figueiredo-Barros, 2008; Libes, 2011; Minello, 2004; Murase et al., 2005; Roland et al., 2005; Van Der Nat & Middelburg, 1998).....	3
Figura 2. Esquema sobre as entradas e saídas de carbono em lagos sob condições aeróbicas. As setas em linhas cheias indicam fluxo de carbono entre organismos e compartimentos, as setas tracejadas indicam o fluxo de carbono em relações tróficas e processos de degradação do COD. Retirado de (Esteves, 2011).	5
Figura 3. Figura ilustrando a lagoa Imboassica e 17 lagoas costeiras localizadas no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, RJ (Adaptado de Caliman et al., 2010); 2. Lagoa Jurubatiba (Fotografia: Rômulo Campos); 3. Lagoa Comprida (Fotografia: Rômulo Campos).	11
Figura 4. Esquema ilustrando a localização das estações de amostragem nas lagoas Comprida e Jurubatiba. As estações identificadas na cor azul correspondem às estações limnéticas e as estações identificadas pela cor verde correspondem às estações litorâneas.	15
Figura 5. Metodologia de captação de CH ₄ e CO ₂ proveniente do desprendimento de bolhas do sedimento. A. Esquema retirado de Figueiredo-Barros, 2008 demonstrando o funcionamento da captação por funis invertidos; B e C. Fotos de arquivo pessoal obtida em junho de 2012 demonstrando a instalação e o posicionamento dos funis em regiões limnéticas na lagoa Comprida.	17
Figura 6. Metodologia de captação de CH ₄ e CO ₂ via transporte por macrófitas aquáticas emersas. A. Esquema adaptado de Livingston & Hutchinson, 1995 demonstrando a vista do interior da câmara flutuante; B e C. Fotos de arquivo pessoal obtidas em junho de 2012 demonstrando a aliquotagem de gases em indivíduos do gênero <i>Typha</i> sp. na lagoa Jurubatiba.	18
Figura 7. Metodologia de captação de CH ₄ e CO ₂ por transporte difusivo na coluna d'água. A. Esquema retirado de Gripp, 2011 demonstrando a localização do septo e o mecanismo de fluatibilidade da câmara estática; B. Foto de arquivo pessoal obtida em novembro de 2012 demonstrando o posicionamento da câmara em uma região limnética na lagoa Jurubatiba.	19
Figura 8. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitiva, macrófita e difusiva) para a emissão total de CH ₄ na lagoa Comprida considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada.	28
Figura 9. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitiva, macrófita e difusiva) para a emissão total de CH ₄ na lagoa Jurubatiba considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada.	28
Figura 10. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitiva e difusiva) para a emissão total de CO ₂ na lagoa Comprida considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada. Os dados referentes ao fluxo via macrófitas não foram inseridos neste gráfico, pois estes apresentaram balanço final negativo (sequestro).	29
Figura 11. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitiva e difusiva) para a emissão total de CO ₂ na lagoa Jurubatiba considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada. Os dados referentes ao fluxo via macrófitas não foram inseridos neste gráfico, pois estes apresentaram balanço final negativo (sequestro).	29
Figura 12. Fluxos ebulitivos de CH ₄ e CO ₂ (mg m ⁻² d ⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando as	

- abordagens regionais (limnética-Lim e litorânea-Lit) e continentais (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). Abordagem regional dos gases CH₄ e CO₂ (**A** e **B**, respectivamente) e abordagem continental dos gases CH₄ e CO₂ (**C** e **D**, respectivamente). A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 1). 32
- Figura 13. Fluxos de CH₄ (**A**) e CO₂ (**B**) (mg m⁻² d⁻¹) via macrófitas amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando somente a abordagem continental (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 2). 34
- Figura 14. Fluxos difusivos de CH₄ e CO₂ (mg m⁻² d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando as abordagens regionais (limnética-Lim e litorânea-Lit) e continentais (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). Abordagem regional dos gases CH₄ e CO₂ (**A** e **B**, respectivamente) e abordagem continental dos gases CH₄ e CO₂ (**C** e **D**, respectivamente). A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 3). 36
- Figura 15. Fluxos de CH₄ e CO₂ (mg m⁻² d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas (somente ebulitivo) e cinco campanhas (via macrófitas e difusivo) realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os gráficos **A** e **B** correspondem à via ebulitiva dos gases CH₄ e CO₂, respectivamente; os gráficos **C** e **D** correspondem ao transporte via macrófitas dos gases CH₄ e CO₂, respectivamente; e os gráficos **E** e **F** correspondem à via difusiva dos gases CH₄ e CO₂, respectivamente. A barra horizontal corresponde à *mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à *média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através do teste U de soma de duas amostras de Wilcoxon-Mann-Whitney (Mais detalhes no quadro 4). 38
- Figura 16. Classificações de áreas ocupadas somente por água (limnética) e áreas ocupadas por macrófitas (litorânea) referentes à uma imagem de satélite obtida de uma cobertura realizada em setembro de 2012 abrangendo as lagoas Comprida (à esquerda) e Jurubatiba (à direita). 41
- Figura 17. Fluxos totais de CH₄ (**A**) e CO₂ (**B**) (kg d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os valores foram extrapolados pelas áreas totais ocupadas por região limnética (Lim) e litorânea (Lit) obtidas por classificação de imagem de satélite de uma cobertura realizada em setembro de 2012. A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As

- presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 6)..... 42
- Figura 18. Fluxos totais de CH₄ (A) e CO₂ (B) (kg d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os valores foram extrapolados pelas áreas totais dos sistemas obtidas por classificação de imagem de satélite de uma cobertura realizada em setembro de 2012. A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média e as barras de erros correspondem ao valor mínimo e máximo. Nestes gráficos não foram apresentadas letras para diferenças significativas pois a mediana, média e quartis foram calculados à partir de médias aritméticas ponderadas do fluxo total considerando o percentual de contribuição das regiões limnéticas e litorâneas na área total das lagoas estudadas, portanto, não foram obtidas réplicas para análises estatísticas. 43
- Figura 19. Diagrama da PCA-1 referente às variáveis abióticas — temperatura do ar, velocidade máxima do vento, profundidade do disco de Secchi, profundidade, condutividade elétrica da água superficial, OD da água superficial, OD da água no fundo, temperatura da água superficial, COD, COT-SED, N total, P total e Clo-a — medidas em todas as estações de amostragem da lagoa Comprida e Jurubatiba ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. 51
- Figura 20. Diagrama da PCA-2 referentes às variáveis meteorológicas — Precipitação, velocidade média do vento, direção do vento, pressão média da atmosfera, temperatura média do ar, umidade relativa e radiação — obtidas da estação meteorológica automática A620-INMET nos dias de amostragem de fluxo de gases ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. C1, C2, C3, C4 e C5 representam, respectivamente, às cinco campanhas realizadas nos meses de junho/12, agosto/12, novembro/12, abril/13 e agosto/13. 55
- Figura 21. Variabilidade temporal das variáveis meteorológicas selecionadas pela PCA-2 (pressão atmosférica, precipitação, velocidade média do vento e direção do vento) e dos fluxos totais de CH₄ e CO₂ (mg m⁻² d⁻¹) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 nas lagoas costeira Comprida e Jurubatiba. Os gráficos A e B correspondem às médias de pressão atmosférica e de fluxos totais de CH₄ e as médias de pressão atmosférica e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente; os gráficos C e D correspondem às médias de precipitação e de fluxos totais de CH₄ e as médias de precipitação e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente; os gráficos E e F correspondem às médias de velocidade do vento e de fluxos totais de CH₄ e as médias de velocidade do vento e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente; os gráficos G e H correspondem às médias de direção do vento e de fluxos totais de CH₄ e as médias de direção do vento e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente. As barras horizontais coloridas e centralizadas correspondem às médias dos fluxos de gases da lagoa Comprida (vermelho) e Jurubatiba (verde) e as barras de erros coloridas correspondem aos desvios-padrão dos mesmos. Os quadrados pretos correspondem às médias das variáveis meteorológicas. C1, C2, C3, C4 e C5 representam, respectivamente, às cinco campanhas realizadas nos meses de jun/12, ago/12, nov/12, abr/13 e ago/13. 57
- Figura 22. Variabilidade temporal e classificações de áreas ocupadas somente por água (regiões limnéticas) e áreas ocupadas por macrófitas (regiões litorâneas) na lagoa Comprida referentes às coberturas realizadas em abril de 2008 (à esquerda) e setembro de 2012 (à direita)..... 60
- Figura 23. Variabilidade temporal e classificações de áreas ocupadas somente por água (regiões limnéticas) e áreas ocupadas por macrófitas (regiões litorâneas) na lagoa Jurubatiba referentes às coberturas realizadas em abril de 2008 (imagem à esquerda), mosaico de dezembro de 2011 à fevereiro de 2012 (imagem central) e cobertura de setembro de 2012 (à direita). 61
- Figura 24. Sequência da análise de imagem de satélite para se obter a classificação de áreas ocupadas somente por água e áreas ocupadas por macrófitas para a realização das estimativas de emissões

baseadas em regiões e áreas totais das lagoas. Imagem adquirida (à esquerda) da lagoa costeira Comprida referente à cobertura realizada em setembro de 2012 pelo satélite GeoEye-1, aplicação do indicador gráfico NDVI (imagem central) e geração da classificação (produto final-imagem à direita).

..... 106

Figura 25. Sequência da análise de imagem de satélite para se obter a classificação de áreas ocupadas somente por água e áreas ocupadas por macrófitas para a realização das estimativas de emissões baseadas em regiões e áreas totais das lagoas. Imagem adquirida (à esquerda) da lagoa costeira Jurubatiba referente à cobertura realizada em setembro de 2012 pelo satélite GeoEye-1, aplicação do indicador gráfico NDVI (imagem central) e geração da classificação (produto final-imagem à direita).

..... 107

Figura 26. Modelo Scree Plot (à esquerda) para avaliação e interpretação dos componentes principais gerados na aplicação da PCA-1 para variáveis abióticas e modelo Scree Plot (à direita) para avaliação e interpretação dos componentes principais gerados na aplicação da PCA-2 para variáveis meteorológicas..... 109

Figura 27. Coloração da água na Lagoa Jurubatiba nas campanhas realizadas em junho de 2012 (A e B) e em abril de 2013 (C e D). Fotos: Arquivo pessoal. 110

Figura 28. Coloração da água na Lagoa Comprida nas campanhas realizadas em junho de 2012 (A) e em abril de 2013 (B). Fotos: Arquivo pessoal. 110

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	1
1.1.1.	O GÁS CH ₄	2
1.1.2.	O GÁS CO ₂	4
1.1.3.	PRESENÇA DE PLANTAS AQUÁTICAS NA DINÂMICA DOS FLUXOS DE CH ₄ E CO ₂	6
1.1.4.	ESTUDOS À RESPEITO DOS FLUXOS DE GASES PARA À ATMOSFERA NAS LAGOAS COSTEIRAS TROPICAIS E INSERÇÃO DA PROPOSTA DE TRABALHO	9
1.2.	HIPÓTESE	10
1.3.	OBJETIVOS	10
2.	ÁREA DE ESTUDO	11
2.1.	LAGOA COMPRIDA	12
2.2.	LAGOA JURUBATIBA	13
2.3.	CLIMA DA REGIÃO	13
3.	MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1.	AMOSTRAGEM: DESENHO EXPERIMENTAL	14
3.2.	AMOSTRAGEM: FLUXOS DE GASES	16
3.3.	AMOSTRAGEM: ABIÓTICOS DA COLUNA D'ÁGUA, ATMOSFERA E SEDIMENTO	18
3.4.	ANÁLISE DE DADOS: DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CH ₄ E CO ₂	19
3.5.	ANÁLISE DE DADOS: ABIÓTICOS DA COLUNA D'ÁGUA E SEDIMENTO	22
3.6.	ANÁLISE DE DADOS: VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS	23
3.7.	ANÁLISE DE DADOS: ESTIMATIVAS DE ÁREAS OCUPADAS POR REGIÕES LIMNÉTICAS E LITORÂNEAS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO.	23
3.8.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	24
4.	RESULTADOS	27
4.1.	CONTRIBUIÇÕES DE REGIÕES E VIAS DE TRANSPORTE PARA AS EMISSÕES DE CH ₄ E CO ₂	27
4.2.	VARIABILIDADE ESPACIAL (REGIONAL E CONTINENTAL) DOS FLUXOS EBULITIVOS DE CH ₄ E CO ₂ : UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR	30
4.3.	VARIABILIDADE ESPACIAL (CONTINENTAL) DOS FLUXOS DE CH ₄ E CO ₂ VIA MACRÓFITAS EMERSAS: UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR	32
4.4.	VARIABILIDADE ESPACIAL (REGIONAL E CONTINENTAL) DOS FLUXOS DIFUSIVOS DE CH ₄ E CO ₂ : UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR	34
4.5.	VARIABILIDADE ESPACIAL INTERLAGUNAR DOS FLUXOS DE CH ₄ E CO ₂ VIA EBULIÇÃO, MACRÓFITAS E DIFUSÃO	37
4.6.	VARIABILIDADE ESPACIAL DOS FLUXOS TOTAIS EXTRAPOLADOS PELAS ÁREAS OBTIDAS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE IMAGEM DE SATÉLITE	39
4.7.	AMPLITUDE DAS VARIÁVEIS ABIÓTICAS E CLOROFILA A	44
4.8.	ANÁLISE DE ORDENAÇÃO DAS VARIÁVEIS ABIÓTICAS E CLOROFILA A	49
4.9.	INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS ABIÓTICAS NA MAGNITUDE DOS FLUXOS TOTAIS DE CH ₄ E CO ₂	51
4.10.	ANÁLISE DE ORDENAÇÃO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS	53
4.11.	VARIABILIDADE TEMPORAL DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E FLUXOS TOTAIS DE CH ₄ E CO ₂	55
4.12.	VARIABILIDADE TEMPORAL DOS FLUXOS TOTAIS DE CH ₄ E CO ₂ CONSIDERANDO AS ÁREAS DAS LAGOAS COMPRIDA E JURUBATIBA REFERENTES ÀS CLASSIFICAÇÕES OBTIDAS DAS IMAGENS DE 2008 E 2011	58
5.	DISCUSSÃO	62
5.1.	CONTRIBUIÇÃO DE REGIÕES E VIAS DE TRANSPORTE PARA AS EMISSÕES DE CH ₄ E CO ₂	62

5.2. VARIABILIDADE ESPAÇO-REGIONAL E CONTINENTAL DOS FLUXOS EBULITIVOS DE CH ₄ E CO ₂ : UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR.....	68
5.3. VARIABILIDADE ESPAÇO-REGIONAL E CONTINENTAL DOS FLUXOS DE CH ₄ E CO ₂ VIA MACRÓFITAS: UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR	73
5.4. VARIABILIDADE ESPAÇO-REGIONAL E CONTINENTAL DOS FLUXOS DIFUSIVOS DE CH ₄ E CO ₂ : UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR.....	78
5.5. VARIABILIDADE ESPACIAL DOS FLUXOS TOTAIS EXTRAPOLADOS PELAS ÁREAS OBTIDAS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE IMAGEM DE SATÉLITE E INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS ABIÓTICAS NA MAGNITUDE DOS FLUXOS TOTAIS DE CH ₄ E CO ₂	83
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7. CONCLUSÕES.....	94
REFERÊNCIAS	96
ANEXOS	106

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

O metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), depois do vapor d'água, são os gases mais importantes no aquecimento global. O CH_4 possui uma concentração média global de 1,8 ppm e o CO_2 de 391 ppm estimados em 2011, segundo o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (em inglês Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) (IPCC, 2013). Entretanto de acordo com o mesmo documento, uma molécula de CH_4 é 34 vezes mais eficiente que uma molécula de CO_2 na retenção de calor proveniente das radiações infravermelhas em um horizonte de 100 anos.

Em função desta capacidade, do aumento de suas concentrações na atmosfera, principalmente à partir do ano de 1750 (intensa exploração de combustíveis fósseis a partir da revolução industrial) até hoje e diante das projeções que vem sendo realizadas considerando o efeito destas elevadas concentrações na saúde, economia, cultura e biodiversidade, muitos dos estudos à respeito destes gases são temas de pesquisas em cenários atuais e futuros de mudanças climáticas (Houghton, 2005; McMichael et al., 2006). Sendo um dos objetivos em comum, aprimorar ainda mais as projeções ao reduzir as incertezas quanto as contribuições de diversos processos (antrópicos e naturais) em todas as regiões do planeta.

Entre as principais fontes de CH_4 e CO_2 para a atmosfera, cinco são de fundamental importância para regiões tropicais: ecossistemas aquáticos, queima de combustíveis fósseis, depósito de lixo urbano, agricultura/pecuária e as queimadas (biomassa vegetal). Esta última principalmente na época de seca (Alvalá et al., 1999; IPCC, 2013). Os ecossistemas aquáticos naturais formam uma grande fonte de carbono, principalmente de CH_4 para a atmosfera, semelhante às atividades de agricultura em solos encharcados (Zhuang et al., 2009). Estes sistemas estão concentrados no hemisfério norte temperado, mas também estão presentes nas regiões tropicais onde estão localizadas entre 20°N e 30°S . Embora as áreas tropicais representem apenas 35% dos ecossistemas aquáticos de todo o planeta, sua contribuição na emissão de CH_4 anual através desta fonte está em torno de 40% (Bartlett & Harriss, 1993).

De acordo com Alvalá (1999), os ecossistemas aquáticos, respondem individualmente por 22% da emissão total e global de CH_4 e apresentam efeito significativo no balanço do aquecimento do planeta. Diante disso, muitas pesquisas têm sido realizadas nestes ambientes a fim de se obter modelos robustos quanto às emissões naturais. No entanto, além da grande

variabilidade entre estes sistemas e entre períodos distintos, ainda há grande incerteza quanto aos resultados gerados até aqui em muitas classes de ecossistemas aquáticos naturais.

Os fluxos de CH_4 e CO_2 estão intimamente ligados ao balanço de carbono nos sistemas aquáticos. Esse balanço é determinado através de processos metabólicos, onde o carbono orgânico é produzido e degradado (Cole et al., 2000; Murase et al., 2005). A degradação do carbono nesses ambientes libera CO_2 para a água e posteriormente para a atmosfera através de processos biológicos, químicos e fotodegradantes e CH_4 através da decomposição da matéria orgânica sedimentada em anaerobiose (Esteves, 2011; Roland et al., 2005). É válido ressaltar que existe uma elevada amplitude de variação nas concentrações de CH_4 e CO_2 nos diversos ecossistemas aquáticos tanto em uma escala temporal, pelo efeito da sazonalidade, quanto em uma escala espacial, devido as variadas características físicas, químicas e biológicas que podem ser encontradas em um ecossistema aquático (Bastviken et al., 2004; Belger et al., 2011; Bridgham et al., 2006; Butman & Raymond, 2011; Figueiredo-Barros, 2008; Fonseca, 2005; Gripp, 2011; Laque, 2011; Marotta et al., 2008; Van Der Nat & Middelburg, 1998).

1.1.1. O GÁS CH_4

O CH_4 é o produto final da decomposição de compostos orgânicos que chegam à ambientes anaeróbicos colonizados por arqueobactérias metanogênicas (Roland et al., 2005). A produção microbiana de CH_4 ou metanogênese é o estágio final da degradação do carbono em vários ambientes anaeróbicos, como exemplo, o trato gastrointestinal de animais, solos inundados, habitats geotérmicos e sedimentos de áreas alagadas de água doce ou salina (Fenchel et al., 1998). A metanogênese pode ocorrer de duas maneiras distintas, a primeira corresponde a fermentação do acetato [CH_3COO^-] produzindo [$\text{CH}_4 + \text{CO}_2$], a segunda ocorre através da reação de redução do dióxido de carbono [$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2$] produzindo [$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$] (Libes, 2011). Em lagos rasos, onde geralmente há oxigenação em toda a coluna d'água, o CH_4 que escapa de camadas profundas do sedimento e da interface sedimento-água que se encontra em escassez de oxigênio ($<2\text{mg/L}^{-1}$) e que é colonizada por bactérias anaeróbicas (metanogênica), pode servir como fonte de energia para bactérias aeróbicas (Minello, 2004), as quais realizam a metanotrofia, processo que corresponde à oxidação do metano [$\text{CH}_4 + \text{O}_2$] formando [$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$]. Essa reação é realizada através de bactérias metanotróficas, microrganismos que realizam seu metabolismo na coluna d'água e na superfície do sedimento onde há presença de oxigênio, podendo consumir cerca de 90% do CH_4 produzido e assim

impedindo que grande parte deste gás seja liberado diretamente na coluna d'água e posteriormente alcance a atmosfera (King, 1992).

A emissão de CH₄ pode ocorrer por três caminhos distintos como demonstrado na figura 1: i) por difusão da coluna d'água para a atmosfera; ii) através da formação de bolhas em ecossistemas com sedimentos anaeróbicos ricos em matéria orgânica, sendo importante destacar que este caminho representa uma importante via de emissão de CH₄ devido a velocidade que o gás chega à atmosfera e o curto tempo de exposição à metanotrofia; iii) por difusão e transporte através do sistema radicular de plantas aquáticas enraizadas no sedimento com folhas fora da água (macrófitas aquáticas emersas) (Bastviken et al., 2004; Figueiredo-Barros, 2008; Van Der Nat & Middelburg, 1998).

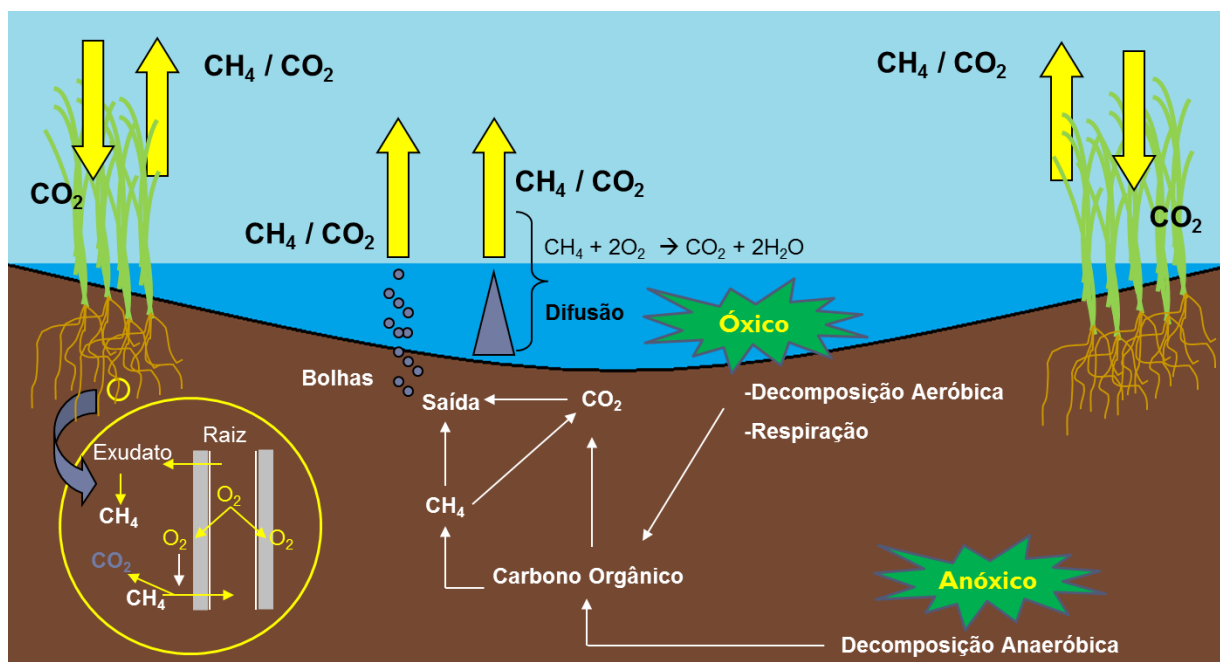


Figura 1. Figura esquemática do perfil vertical de profundidade do sedimento, coluna d'água e atmosfera mostrando os processos de fixação de CO₂ e emissão de CH₄ e CO₂ em ambientes aquáticos continentais rasos. Referências: (Cole et al., 2000; Esteves, 2011; Figueiredo-Barros, 2008; Libes, 2011; Minello, 2004; Murase et al., 2005; Roland et al., 2005; Van Der Nat & Middelburg, 1998).

Alguns fatores ambientais influenciam a produção, oxidação e emissão de CH₄ em ambientes aquáticos de água doce, como: vento; temperatura; pressão atmosférica; profundidade; quantidade e qualidade de substratos orgânicos disponíveis; presença de agregados microbianos; presença de macrófitas aquáticas; potencial redox; concentração de oxigênio dissolvido; nutrientes; entre outros (Barros et al., 2011; Engle & Melack, 2000a;

Figueiredo-Barros, 2008; Joyce & Jewell, 2003; Laanbroek, 2010; Liblik et al., 1997; Mattson & Likens, 1990; Rosenqvist et al., 2002; Sorrell & Boon, 1994; Whalen, 2005).

1.1.2. O GÁS CO₂

O CO₂ é produzido biologicamente em ambientes aquáticos através da respiração aeróbica dos organismos $\{[(CH_2O)_n + O_2]\}$ formando $[H_2O + CO_2 + Energia]$ e através de processos de decomposição sobre a matéria orgânica. Nestes processos, dentre os metabólitos produzidos, além do CO₂, também há a formação de carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP) que posteriormente também podem servir de recurso para a produção de CO₂ (Roland et al., 2005). É importante destacar que o COD ou COP da matéria orgânica utilizada para o catabolismo dos organismos pode ser proveniente da produção do próprio sistema (principalmente derivada do fitoplâncton e da lixiviação e excreção de plantas aquáticas e perifíton) e do material importado dos ambientes terrestres (Figura 2) (Esteves, 2011; Schlesinger & Melack, 1981).

Nos ecossistemas aquáticos o CO₂ reage com a água gerando diferentes formas de carbono (carbono inorgânico dissolvido – CID) que são utilizadas por produtores primários para realização da fotossíntese (Esteves, 2011). A produtividade primária ou fixação biológica de CO₂ ocorre por meio da atividade fisiológica de organismos através dos processos fotossintéticos (principalmente) ou quimiossintéticos, onde os organismos utilizam, respectivamente, energia solar e água ou outros componentes químicos como fonte de energia. Independente da forma, a energia obtida nestes processos é utilizada para sintetizar carboidratos simples que são usados posteriormente na produção de biomassa, proteínas, lipídios e no processo de respiração. A maior parte do carbono incorporado pelos organismos é novamente disponibilizada para o ecossistema na forma de CO₂ que pode ser reutilizado na produtividade primária ou alcançar a atmosfera por meio da difusão (Roland et al., 2005).

A emissão de CO₂ (Figura 1) pode ocorrer através de caminhos semelhantes ao CH₄. No entanto, ao contrário do CH₄ a emissão por bolhas costuma ser pouco eficiente pela elevada solubilidade do CO₂ na água em relação ao CH₄ (Casper et al., 2000; Li et al., 2008). Sendo assim, as formas principais são por meio da difusão quando a água e o ar apresentam concentrações distintas e através das plantas aquáticas emersas. No entanto, ao invés de funcionarem apenas como uma passagem para o gás produzido no sedimento alcançar a atmosfera como ocorre com o CH₄, estes vegetais apresentam elevados potenciais

respiratório e fotossintetizante e apesar de trocarem gases diretamente com a atmosfera, quando excretam exudatos e quando morrem aportam carbono orgânico no sistema em grandes quantidades que pode contribuir significativamente com o balanço deste nutriente nos sistemas aquáticos, principalmente quando apresentam ampla colonização.

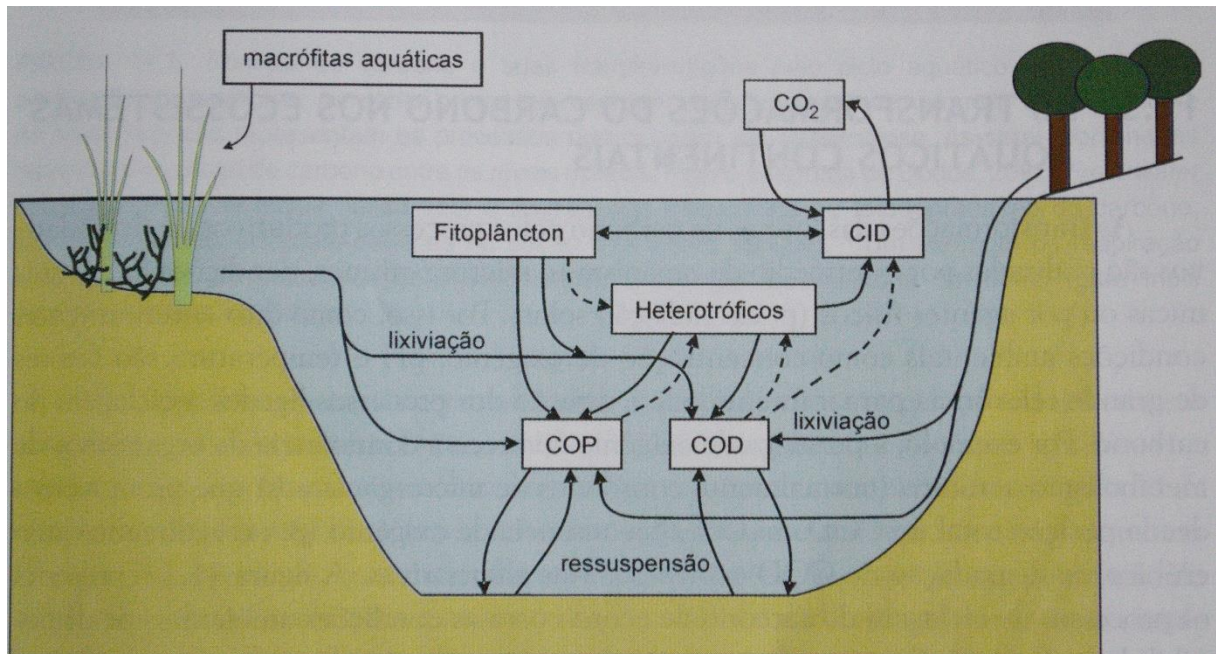


Figura 2. Esquema sobre as entradas e saídas de carbono em lagos sob condições aeróbicas. As setas em linhas cheias indicam fluxo de carbono entre organismos e compartimentos, as setas tracejadas indicam o fluxo de carbono em relações tróficas e processos de degradação do COD. Retirado de (Esteves, 2011).

Alguns fatores ambientais, como a salinidade, profundidade, temperatura e principalmente o potencial hidrogeniônico (pH), estão associados a variabilidade espaço-temporal da disponibilidade de CID na água pelo efeito dos mesmos na capacidade de tamponamento do sistema e conseqüentemente na regulação das diferentes formas de carbono (H_2CO_3 ; HCO_3^- ; CO_3^{2-}) (Roland et al., 2005). No entanto, a literatura vem destacando os processos de fotooxidação (Amado, 2008) e principalmente o balanço entre respiração e produtividade primária como os processos que exercem maior influência na disponibilidade de CID (Cole et al., 2007). Neste contexto tem se encontrado maior relevância para o processo de respiração do sistema que é suportada principalmente pela mineralização do COD alóctone e autóctone (Sobek et al., 2005). Dentre as principais fontes de carbono alóctone, a matéria orgânica vegetal e animal de ecossistemas terrestres são comumente citadas (Marinho et al., 2010), enquanto as fontes de carbono autóctone correspondem principalmente ao fitoplâncton ou a macrófitas aquáticas (Huttunen et al., 2003; Sobek et al., 2006).

1.1.3. PRESENÇA DE PLANTAS AQUÁTICAS NA DINÂMICA DOS FLUXOS DE CH₄ E CO₂

De acordo com Wetzel (2001), as plantas aquáticas são organismos que respondem por até 50% do aporte de matéria orgânica e de nutrientes para o sistema aquático, podendo ser ainda mais elevado em ambientes rasos, colonizados por extensos estandes de macrófitas emersas, principalmente em ambientes húmicos e oligotróficos. Nestes ecossistemas é comum ocorrer baixa incidência solar devido a coloração escura da água e baixas concentrações de nutrientes que possam sustentar alta densidade fitoplanctônica (Roland, 1998).

A matéria orgânica oriunda das macrófitas aquáticas serve de energia para os organismos decompositores. Estes vegetais, além de estarem diretamente envolvidos na produtividade de sistemas aquáticos, também apresentam papel importante em interações ecológicas com a fauna e ciclagem de nutrientes (Esteves, 2011). Sendo assim, as plantas são fundamentais como fonte de carbono e energia autóctone para o ecossistema aquático, o que ressalta ainda mais a importância de levar em consideração os bancos de plantas aquáticas localizados nas regiões litorâneas destes ambientes para estudos relacionados à produção e emissão destes gases.

A presença dos estandes formam habitats importantes no balanço de carbono, devido sua alta capacidade de incorporação de carbono atmosférico (CO₂) em biomassa e geração de detritos para a decomposição, contribuindo significativamente com as emissões de CH₄ e CO₂ no sistema (Belarmino, 2013; Bianchini Jr & Cunha-Santino, 2008). Segundo Van Der Nat & Middleburg (1998), as plantas aquáticas exercem um efeito estimulante no balanço de CH₄, pois apesar de serem consideradas importantes condutoras do CH₄ produzido no sedimento que difunde-se para seu tecido parenquimático em contato direto com as porções mais profundas, estas também formam um importante sítio de oxidação, via oxigenação de uma fina camada entre as raízes e o sedimento para a homeostase do metabolismo vegetal. No entanto, ainda que uma parte do CH₄ seja oxidada, uma fração importante do que é produzido difunde-se para o interior destes vegetais através da raiz e posteriormente através do tecido parenquimático (podendo ser impulsionada por transporte convectivo dependendo da espécie vegetal) chega rapidamente à atmosfera (Figura 1) (Laanbroek, 2010).

Apesar disso, a comunidade científica não tem focado sua atenção à presença destes vegetais nos estudos de balanço do carbono. Mesmo com o crescente número de trabalhos à respeito das emissões de CH₄ e CO₂ em diversos sistemas aquáticos (naturais ou antrópicos)

em áreas temperadas (Algesten et al., 2003; Bartlett et al., 1987; Bastviken et al., 2004; Butman & Raymond, 2011; Sobek et al., 2006) e recentemente em reservatórios, campos de arroz, lagos e rios em áreas tropicais (Algesten et al., 2003; Bartlett et al., 1987; Bastviken et al., 2004; Butman & Raymond, 2011; Sobek et al., 2006). De uma forma geral, estes trabalhos procuram estimar o orçamento final entre os processos que inserem e retiram carbono do ecossistema e identificar quais ambientes funcionam como emissores ou sequestradores de carbono atmosférico (Cole et al., 2007).

No estudo mais amplo sobre o balanço de carbono em ecossistemas aquáticos continentais, onde foi encontrado frequente tendência à função de fonte de carbono para a atmosfera, os ambientes amostrados foram basicamente lagos temperados geralmente profundos e pouco colonizados por macrófitas aquáticas (Sobek et al., 2005). Já nos estudos mais recentes considerando os ambientes tropicais, os sistemas foram amostrados apenas quanto à pressão parcial de CO_2 ($p\text{CO}_2$) em compartimentos limnéticos (áreas abertas) (Kosten et al., 2010; Marotta et al., 2009), onde foi considerado essencialmente o balanço de carbono regulado por organismos pelágicos e bentônicos, que para lagos temperados e profundos formam geralmente a comunidade que dirige este ciclo. No entanto, em algumas regiões boreais e principalmente nas áreas tropicais, os lagos são geralmente rasos, ou seja, lagos que apresentam razão área/volume mais elevada, onde geralmente a zona eufótica alcança o sedimento e que apresentam pequena ou ausência de estratificação térmica. Esta classe de lagos geralmente apresenta extensos estandes de macrófitas aquáticas emersas que desempenham importante papel na magnitude dos fluxos de carbono, sendo esta comunidade frequentemente desconsiderada nestes estudos mais amplos. Diante disso, ainda há uma defasagem de informações referentes à produção e consumo de CH_4 e CO_2 , considerando a importância da comunidade de macrófitas aquáticas no balanço de carbono em ecossistemas aquáticos pequenos e rasos, como zonas húmidas continentais (em inglês “wetlands”) e em zonas húmidas costeiras como lagoas e lagunas de água doce e salina. Este fato torna os dados gerados insuficientes para estimar os fluxos de CH_4 e CO_2 e sua importância no balanço de carbono regional e mesmo global devido a expressividade destes sistemas no Brasil e em outros lugares do planeta.

De acordo com Knoppers (1994), as lagoas costeiras estão entre os ecossistemas mais produtivos, sendo assim, podem ser importantes no que diz respeito ao sequestro de carbono através da produtividade primária das plantas aquáticas. No entanto, é preciso determinar a

perda do carbono para a atmosfera através dos seus diversos processos e mecanismos e a partir daí gerar subsídios necessários para saber se lagoas costeiras são sequestradoras ou emissoras de carbono. Por serem consideradas como um dos conjuntos de sistemas aquáticos continentais mais representativos do país, tais informações iriam contribuir significativamente para o conhecimento do papel destes sistemas no ciclo do carbono, pois somente no Brasil estas lagoas ocorrem em todo o litoral, principalmente nas regiões Sudeste e Sul (Esteves, 2011). Naquelas localizadas no norte fluminense já foi observada elevada variabilidade quanto a morfometria, salinidade, teor de matéria orgânica, cor e concentração de COD (Caliman et al., 2010; Felix, 2012; Laque, 2011). Portanto, estipular um modelo para o balanço de carbono para todas as lagoas da região ou do Brasil não seria o ideal para abranger o gradiente de características destes sistemas. No entanto, no estudo de Downing et al (2006), foi demonstrado que, dentre um levantamento global do número e área de lagos no planeta, os pequenos lagos além de serem mais numerosos que os grandes lagos, também ocupam a maior parte dos 4,2 milhões de km² de área ocupada por todos na superfície da Terra. Neste trabalho foi apontado que os processos mais característicos de lagos pequenos dominam em área de cobertura dentre todos os lagos e podem assumir valores significativos num âmbito global. Os autores ainda destacaram que estudos prévios que indicaram que lagos pequenos não apresentavam importância espacial em processos de ciclagem de carbono e nutrientes possivelmente subestimaram o papel destes ambientes para biogeoquímica de elementos no planeta, portanto, em estudos futuros deve-se enfatizar o papel global de pequenos corpos de água para o ciclo global de carbono.

Neste contexto pode ser destacada a utilização do sensoriamento remoto empregado em muitos trabalhos de modelos hidrológicos e biogeoquímicos para a caracterização, além da área total, das áreas permanentemente ocupadas por coluna d'água, áreas sazonalmente alagáveis e ainda aquelas ocupadas por água e ampla vegetação aquática exposta acima da lâmina d'água. A utilização de sistemas com radares em satélites vem se mostrando como uma ótima ferramenta para o delineamento de áreas de inundação e estimativas dos fluxos de nutrientes em ecossistemas aquáticos. Alguns trabalhos (Bastviken et al., 2010; Belger et al., 2011; Costa et al., 2002; Hess et al., 2003; Melack et al., 2004; Rosenqvist et al., 2002) tem demonstrado maior potencial de acurácia e elevada aceitação da comunidade científica na extrapolação dos dados gerados no campo para todo o sistema estudado, ou áreas ainda maiores quando estes estão acompanhados do monitoramento da variação da área de

inundação e da resposta do ecossistema frente à modificações sazonais e/ou aperiódicas no ciclo hidrológico.

Desta forma, no presente trabalho também foram monitoradas modificações na retração e expansão dos sistemas aquáticos estudados e a influência do efeito da chuva na colonização de plantas aquáticas emersas em períodos distintos. Este monitoramento foi realizado com o objetivo de proporcionar o mínimo de incertezas quanto as extrapolações pelas áreas dos sistemas estudados e seus distintos habitats no âmbito do balanço de carbono.

1.1.4. ESTUDOS À RESPEITO DOS FLUXOS DE GASES PARA À ATMOSFERA NAS LAGOAS COSTEIRAS TROPICAIS E INSERÇÃO DA PROPOSTA DE TRABALHO

Alguns poucos estudos já verificaram atividades de oxidação, concentração e produção de CH₄ (Fonseca, 2005; Furtado et al., 2002; Marinho, 2004; Minello, 2004) e a dinâmica da pressão parcial do CO₂ (pCO₂) (Laque, 2011) em lagoas costeiras subtropicais no Brasil. Entretanto, apenas recentemente, nos estudos realizados por Gripp et al. (2011 e 2013) os autores começaram a abordar as emissões de CH₄ e CO₂ do sistema e de seus diversos compartimentos para a atmosfera dentro de um contexto de longa duração como o da proposta do PELD Sítio-5 para lagoas costeiras da região norte fluminense. Porém, com um esforço amostral ainda muito reduzido e realizado exclusivamente em um período do ano.

O PELD Sítio-5, dentro de sua proposta principal busca gerar conhecimento à respeito do funcionamento dos ecossistemas costeiros da bacia de campos frente às mudanças climáticas regionais e globais numa perspectiva espacial e temporal. Para este fim, um dos objetivos dos pesquisadores é avaliar a contribuição dos compartimentos nos ambientes aquáticos costeiros e terrestres e integrá-los no balanço de carbono da área de restinga no norte do Estado do Rio de Janeiro. Além de entender as peculiaridades destes sistemas em relação ao que já se encontra no acervo literário, busca-se quantificar o estoque e os fluxos de carbono visando a construção de um orçamento final do quanto estes sistemas contribuem com a emissão ou sequestro de carbono.

Sendo assim, a proposta do presente trabalho se baseia em estimar as entradas e saídas de carbono nas lagoas costeiras Comprida e Jurubatiba, sistemas que apresentam as características descritas nos parágrafos anteriores quanto a emissão e fixação destes gases, e que possivelmente, assim como outros sistemas rasos, se destacam e apresentam importante contribuição no balanço de carbono local, regional e até global em conjunto com outros

sistemas semelhantes. Além disso, ao considerar as diferentes características limnológicas que distinguem as áreas abertas dos estandes de macrófitas aquáticas emersas (também destacando o efeito da continentalidade, bastante expressiva em ambientes costeiros, principalmente àqueles perpendiculares à linha de costa) e a importância destes vegetais para o balanço de carbono do sistema, esperamos determinar quais fatores regulam a magnitude dos fluxos e revisar o modelo literário atual que majoritariamente considera ecossistemas aquáticos continentais como fonte de carbono para a atmosfera.

1.2. HIPÓTESE

Lagoas rasas com ampla colonização de macrófitas aquáticas emersas são sequestradoras de carbono para a atmosfera, ao contrário do recomendado pela literatura atual, ao considerar o importante papel sequestrador das regiões litorâneas.

1.3. OBJETIVOS

- Quantificar os fluxos de CH_4 e CO_2 por difusão via coluna d'água, através do transporte por bolhas e via macrófitas aquáticas emersas nas lagoas costeiras Comprida e Jurubatiba;
- Quantificar os fluxos de CH_4 e CO_2 nas áreas abertas (regiões limnéticas) e nos estandes de plantas aquáticas (regiões litorâneas) e extrapolar considerando cada região em ambos os ecossistemas com base na classificação gerada por sensoriamento remoto;
- Comparar as emissões de CH_4 e CO_2 por diferentes vias entre as lagoas Comprida e Jurubatiba;
- Verificar a influência de variáveis ambientais na coluna d'água, no sedimento e na atmosfera nos fluxos totais de CH_4 e CO_2 ;
- Verificar a influência dos períodos de chuva e estiagem nos fluxos de CH_4 e CO_2 ;
- Determinar se as lagoas estudadas agem como sequestradoras ou emissoras no balanço de carbono.

2. ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado nas lagoas costeiras Comprida e Jurubatiba (Figura 3), localizadas na planície costeira no norte do Estado do Rio de Janeiro dentro de uma unidade de conservação chamada Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (PARNA Jurubatiba). Ambas as lagoas apresentam hidroperíodo permanente, ou seja, não secam ao longo do ano, mesmo diante de fortes estiagens atípicas, como observado no histórico de pesquisa dos últimos 25 anos de pesquisa na região. As lagoas foram formadas por faixas de areia provenientes do acúmulo de sedimentos da plataforma continental com a dinâmica de elevação do nível do mar em períodos glaciais e interglaciais (Esteves, 2011; Muehe, 2003). Estas faixas represam o afloramento de águas subterrâneas nas duas lagoas e especificamente na Jurubatiba há também aporte de água através do Rio Cabiúnas (um pequeno sistema lótico que drena uma área rural dos municípios de Macaé e Carapebus) (Esteves, 2011).

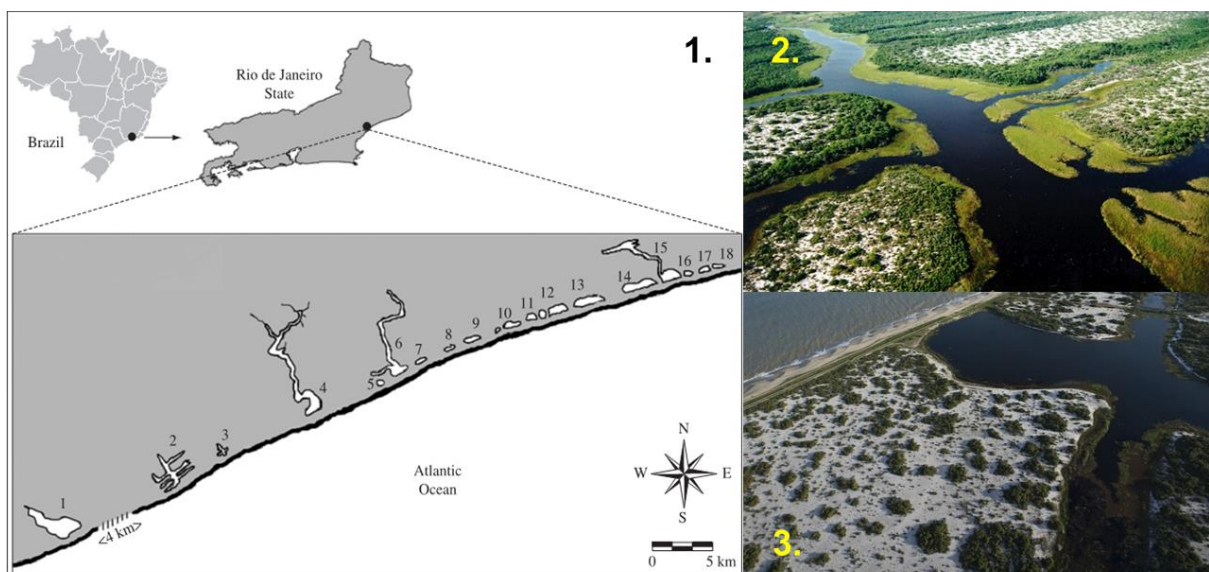


Figura 3. Figura ilustrando a lagoa Imboassica e 17 lagoas costeiras localizadas no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, RJ (Adaptado de Caliman et al., 2010); 2. Lagoa Jurubatiba (Fotografia: Rômulo Campos); 3. Lagoa Comprida (Fotografia: Rômulo Campos).

Hoje, a faixa de areia apresenta cerca de 50m e separa ambas as lagoas do mar. Além da percolação e do spray marinho, conexões eventuais ocorrem em períodos de ressacas, no entanto, não são suficientes para alterar consideravelmente a salinidade destes ecossistemas, uma vez que ambos possuem seus eixos principais perpendiculares à linha de costa, apresentando apenas uma pequena área em potencial sob influência do mar. A região da

barra de areia é pobremente colonizada por plantas e a vegetação de restinga aparece no entorno. Diante da baixa profundidade e elevada razão perímetro:volume (forma dendrítica), as macrófitas aquáticas colonizam principalmente a região central, o fundo e os braços das lagoas, sendo estes vegetais uma das principais fontes de carbono orgânico para estes sistemas (Faria & Esteves, 2001; Panosso et al., 1998).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a sazonalidade da região é principalmente caracterizada pelo regime de chuvas, diante disso, as áreas das lagoas sofrem intensas modificações dependendo do período do ano, sendo a sazonalidade geralmente marcada por precipitação de outubro à março e estiagem de abril à setembro.

As lagoas Comprida e Jurubatiba podem ser consideradas como sistemas pouco perturbados, pois apesar de estarem presentes no interior do PARNA Jurubatiba, são sistemas submetidos à pequenas influências antrópicas, principalmente à lagoa Jurubatiba, onde há utilização das margens para criação de gado, captação de água (não-contínua) do Terminal Cabiúnas (PETROBRAS) e expansão urbana do bairro Lagomar (município de Macaé).

2.1. LAGOA COMPRIDA

Localizada a 22° 17'S, 41° 39'O, apresenta área média de 0,13km², temperatura média anual da água de 22,7 °C e baixa profundidade (menor que dois metros) (Caliman et al., 2010; Fisher et al., 2005). A coloração escura da água que atenua a radiação solar nos primeiros centímetros é devido às altas concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) (média de 2,92 mmol L⁻¹), majoritariamente composto por ácidos húmicos refratários que são formados pela decomposição da matéria orgânica da vegetação de restinga que percolam o solo arenoso do sistema adjacente e aportam na lagoa (Farjalla et al., 2002; Suhett et al., 2007). Apesar das macrófitas aquáticas apresentarem papel importante como fonte de matéria orgânica dissolvida (MOD) e particulada (MOP), a restinga adjacente é fundamental, pois entre diversas características, contribui como a principal fonte de MOD para este ambiente (Amado, 2008).

A água apresenta pH ácido (média de 5,5), profundidade média do disco de Secchi (Secchi) de 0,7m, salinidade média de 0,4, condutividade de 0,8 mS cm⁻¹ L⁻¹, oxigênio dissolvido (OD) 8,24mg L⁻¹, baixas concentrações de Nitrogênio (N) e Fósforo (P) totais (64,53µM e 0,53µM, respectivamente) e clorofila-*a* (clo-*a*) (2,27 ug L⁻¹), sugerindo baixa produtividade primária fitoplanctônica (Caliman et al., 2010; Enrich-Prast et al., 2004; Farjalla et al., 2006).

2.2. LAGOA JURUBATIBA

Localizada a 22° 15'S, 41° 30'O, apresenta área média de 0,34km², temperatura média anual da água de 22,7 °C e profundidade máxima de cerca de três metros (Caliman et al., 2010; Fisher et al., 2005). A água também é rica em compostos húmicos e assim como a lagoa Comprida também é considerada como um sistema de água preta, apesar de apresentar concentrações de COD um pouco mais baixas (média de 0,96 mmol L⁻¹) e conseqüentemente coloração escura menos intensa em relação à lagoa anteriormente caracterizada (Farjalla et al., 2009).

Uma das maiores diferenças é quanto a colonização de macrófitas aquáticas. Jurubatiba é amplamente colonizada por estes vegetais e possui a maior riqueza de espécies das lagoas da região (Bove & Paz, 2009). São encontradas cerca de 15 espécies com diversas estratégias de vida como *Eleocharis interstincta*, *Potamogeton stenostachys*, *Nymphaea ampla* e *Utricularia foliosa* (Henriques et al., 1988). Contudo, é importante destacar a espécie *Typha domingensis* Pers., popularmente conhecida como “Taboa”, como a macrófita aquática emersa de maior representatividade (densidade e área de colonização) nesta lagoa.

Quanto às características limnológicas, além das concentrações de COD, a lagoa Jurubatiba também difere da Comprida principalmente em relação ao pH e Secchi (média de 6,3 e 1,8m, respectivamente) e se assemelham principalmente quanto à salinidade média (1,1), condutividade (1,3mS cm⁻¹ L⁻¹), OD (7,18mg L⁻¹), baixas concentrações de N e P totais (55,59µM e 0,36µM, respectivamente), razões N:P de 154:1 e clo-*a* (4,34 ug L⁻¹). (Caliman et al., 2010; Enrich-Prast et al., 2004).

2.3. CLIMA DA REGIÃO

O clima da região é quente e sub-úmido/úmido relativamente constante ao longo do ano, a umidade relativa média anual é de 83% e a temperatura média anual corresponde à 23 °C, sendo a média do verão de 26,5 °C e a média do inverno de 19,5 °C (INMET). A região apresenta pouco ou nenhum déficit de água, as chuvas alcançam a média anual de 1000mm e se concentram nas estações de primavera e verão e a estiagem ocorre nos meses de inverno. Os ventos ocorrem o ano todo, com o predomínio de direção Nordeste, e em menor grau de direção Leste, Sudeste e Sudoeste (FIDERJ, 1977).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. AMOSTRAGEM: DESENHO EXPERIMENTAL

No presente estudo os fluxos de CH₄ e CO₂ para a atmosfera foram amostrados considerando três vias principais: Transporte através de bolhas (fluxo ebulitivo), via sistema radicular de macrófitas aquáticas (fluxo via macrófitas) e via difusão através da coluna d'água (fluxo difusivo). Além dos gases, as lagoas foram estudadas quanto as variáveis ambientais presentes na água, no ar e no sedimento em cinco campanhas distribuídas ao longo de um ano e dois meses com o objetivo de contemplar a variabilidade que ocorre sazonalmente (chuva e estiagem) na região. Estas campanhas ocorreram precisamente nos meses de junho, agosto e novembro de 2012 e abril e agosto/setembro de 2013, com duração de cerca de oito dias de coleta no período diurno (8-18h).

Para contemplar a heterogeneidade dos ecossistemas quanto às emissões, estes foram divididos em dois compartimentos chamados regiões limnéticas (áreas abertas, geralmente nas partes centrais do corpo principal das lagoas, onde a profundidade era maior) e regiões litorâneas (áreas que compreendiam as margens ou braços, locais amplamente colonizados por macrófitas aquáticas emersas, onde a profundidade era menor) (Figura 4). Além disso, para contemplar o efeito da continentalidade, os sistemas foram divididos em duas porções (fundo e barra – sentido continente-oceano). Na lagoa Jurubatiba todas as regiões litorâneas amostradas foram colonizadas por grandes estandes da macrófita aquática emersa *Typha domingensis* Pers.. Já na lagoa Comprida, apenas um estande desta espécie foi representativo, julgando-se necessária a amostragem de uma outra espécie de macrófita emersa (*Eleocharis intersticta* Vahl Roem. & Schult) para compor o desenho amostral.

Para cada fluxo e em cada estação amostral foram obtidas cinco réplicas representadas por cada campanha ao longo dos anos de 2012 e 2013. Para o fluxo ebulitivo foram realizadas dez subamostragens (pseudoréplicas) em cada estação limnética e seis em cada estação litorânea procurando-se obter maior acurácia na captação de bolhas, por se tratar de um mecanismo sujeito à extrema eventualidade (Chanton et al., 1989; Fechner-Levy & Hemond, 1996; Joyce & Jewell, 2003; Varadharajan & Hemond, 2012). A diferença de dez para seis pseudoréplicas foi apenas logística na colocação do amostrador, no entanto o intuito era obter um número central robusto para as diferentes estações de amostragem.

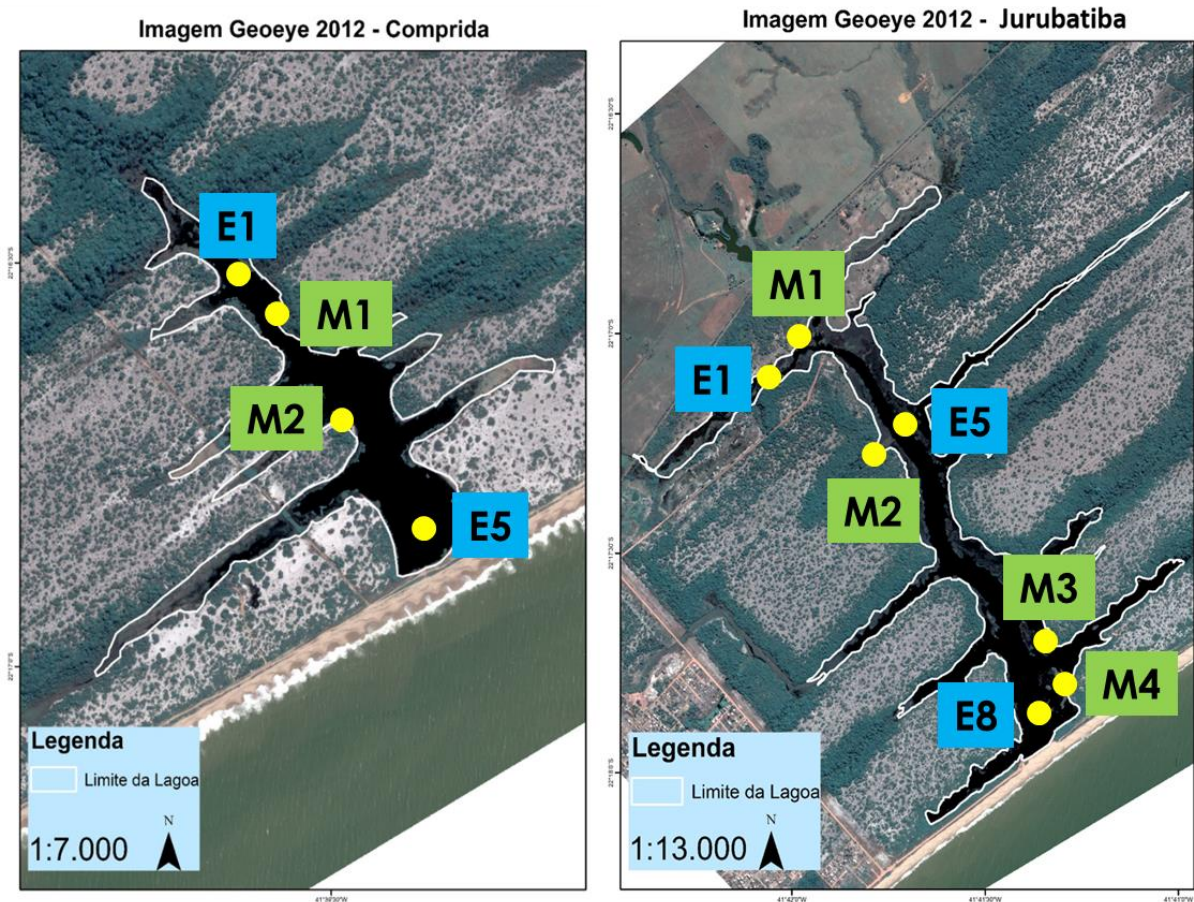


Figura 4. Esquema ilustrando a localização das estações de amostragem nas lagoas Comprida e Jurubatiba. As estações identificadas na cor azul correspondem às estações limnéticas e as estações identificadas pela cor verde correspondem às estações litorâneas.

Para os fluxos via macrófitas e difusivo o número de pseudoréplicas foi reduzido para três em cada estação, pois além de se tratar de um fluxo contínuo que apresentou menor variabilidade dentro de uma única estação, também foi logisticamente mais viável para contemplar a forma de amostragem, o número de amostradores disponíveis e a menor interferência possível dos intervalos entre as amostragens para preparar o aparato da coleta, principalmente ao se amostrar as macrófitas. É importante destacar no fluxo via macrófitas, que os indivíduos pseudoreplicados e replicados eram diferentes, não havia acompanhamento de um único indivíduo e no fim da amostragem o mesmo era removido do sistema para posterior análise de conteúdo de carbono e número de folhas em laboratório, no entanto estes dados não estarão inclusos nesta dissertação.

3.2. AMOSTRAGEM: FLUXOS DE GASES

Para mensurar os fluxos de CH₄ e CO₂ emitidos para a atmosfera foram utilizados três tipos de amostradores dependendo da via de emissão destes gases:

Para o fluxo ebulitivo foi utilizada uma série de funis invertidos (área de abertura de 0,070m²) (Figura 5) com tubos de aprisionamento de gases (de até 200mL) no topo, acoplados num aparato flutuante na sua base e presos por ancoras para controlar sua flutuação e fixação, mantendo assim, sua localização nas diferentes estações de amostragem das lagoas (Adaptado de (Huttunen et al., 2001) e modificado por (Figueiredo-Barros, 2008). Desta forma, foi possível capturar os gases emitidos por bolhas em um período de 24 horas. No dia seguinte os tubos com ar eram retirados dos funis, refrigerados e levados para o laboratório para imediata análise de concentrações de gases.

Para o fluxo difusivo via sistema radicular de plantas aquáticas foi adaptada a metodologia usada por (Van Der Nat & Middelburg, 1998) onde os autores usaram uma câmara de acrílico cilíndrica acoplada à um monitor de gases e um ventilador na porção superior para homogeneizar o ar interno, sem causar turbulência na água. No entanto, a câmara do presente trabalho não possuía o monitor de gases acoplado e sim septos de borracha para a retirada das alíquotas de gases. A área de abertura e o volume (adaptável) correspondiam, respectivamente, à 0,0491m² e 13-93L (Figura 6) para comportar a altura de um indivíduo da macrófita aquática *Typha domingensis Pers.* ou para amostrar por área a macrófita aquática *Eleocharis intersticta Vahl Roem. & Schult.* As alíquotas foram retiradas com o auxílio de seringas de 20mL (com torneiras de três vias para proteção contra vazamentos) à cada quatro minutos em séries de 12 minutos e refrigeradas imediatamente até a posterior análise em laboratório.

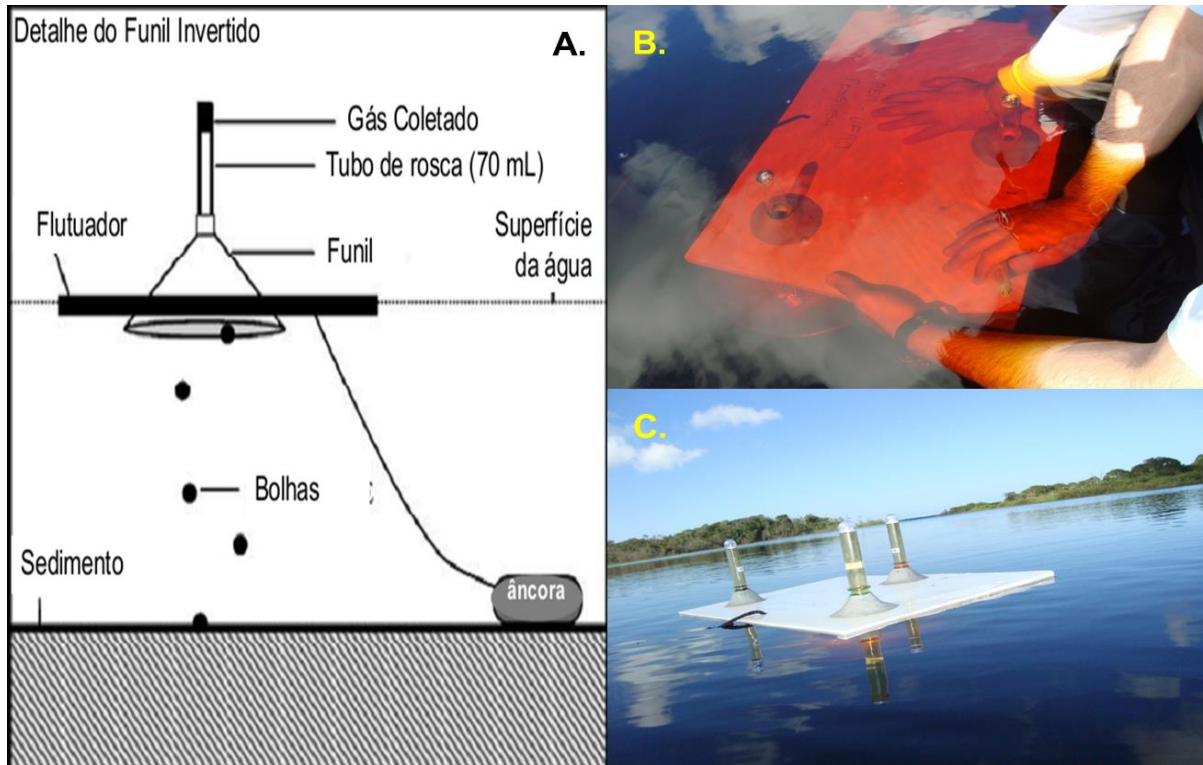


Figura 5. Metodologia de captação de CH_4 e CO_2 proveniente do desprendimento de bolhas do sedimento. A. Esquema retirado de Figueiredo-Barros, 2008 demonstrando o funcionamento da captação por funis invertidos; B e C. Fotos de arquivo pessoal obtida em junho de 2012 demonstrando a instalação e o posicionamento dos funis em regiões limnéticas na lagoa Comprida.

Para o fluxo difusivo foi utilizada metodologia adaptada de (Rosenqvist et al., 2002) onde os autores empregaram câmaras de acrílico flutuantes com septos de borracha para fazer a alíquotagem dos gases. No presente trabalho as câmaras possuíam formato de cubo e a área de abertura e volume correspondiam, respectivamente, à $0,09\text{m}^2$ e $13,5\text{L}$ (Figura 7). Para mitigar interferências causadas por turbulência gerada através dos ventos, as câmaras possuíam um prolongamento de acrílico de cerca de 10cm que permanecia completamente submerso durante a amostragem. As amostras foram coletadas em tempos regulares, a cada três minutos em séries de nove minutos e a homogeneização foi realizada através do bombeamento do êmbolo das próprias seringas usadas na alíquotagem. Os gases foram armazenados em seringas de $3,0\text{ mL}$ com torneira de três vias para proteção contra vazamentos e imediatamente refrigeradas até a posterior análise em laboratório.

É importante destacar o esforço amostral com objetivo de buscar maior robustez dos dados, quanto às emissões de gases, que representam importantes processos dinâmicos no balanço de carbono dos sistemas aquáticos. Para isso foram geradas, em cada campanha, 86 amostras de fluxo ebulitivo, 72 amostras de fluxo via macrófitas aquáticas e 132 amostras de

fluxo difusivo totalizando 290 amostras, em média, por campanha e 1364 amostras de cada gás durante as cinco campanhas em sete estações amostrais que representassem a lagoa Jurubatiba e quatro estações que representassem a lagoa Comprida.

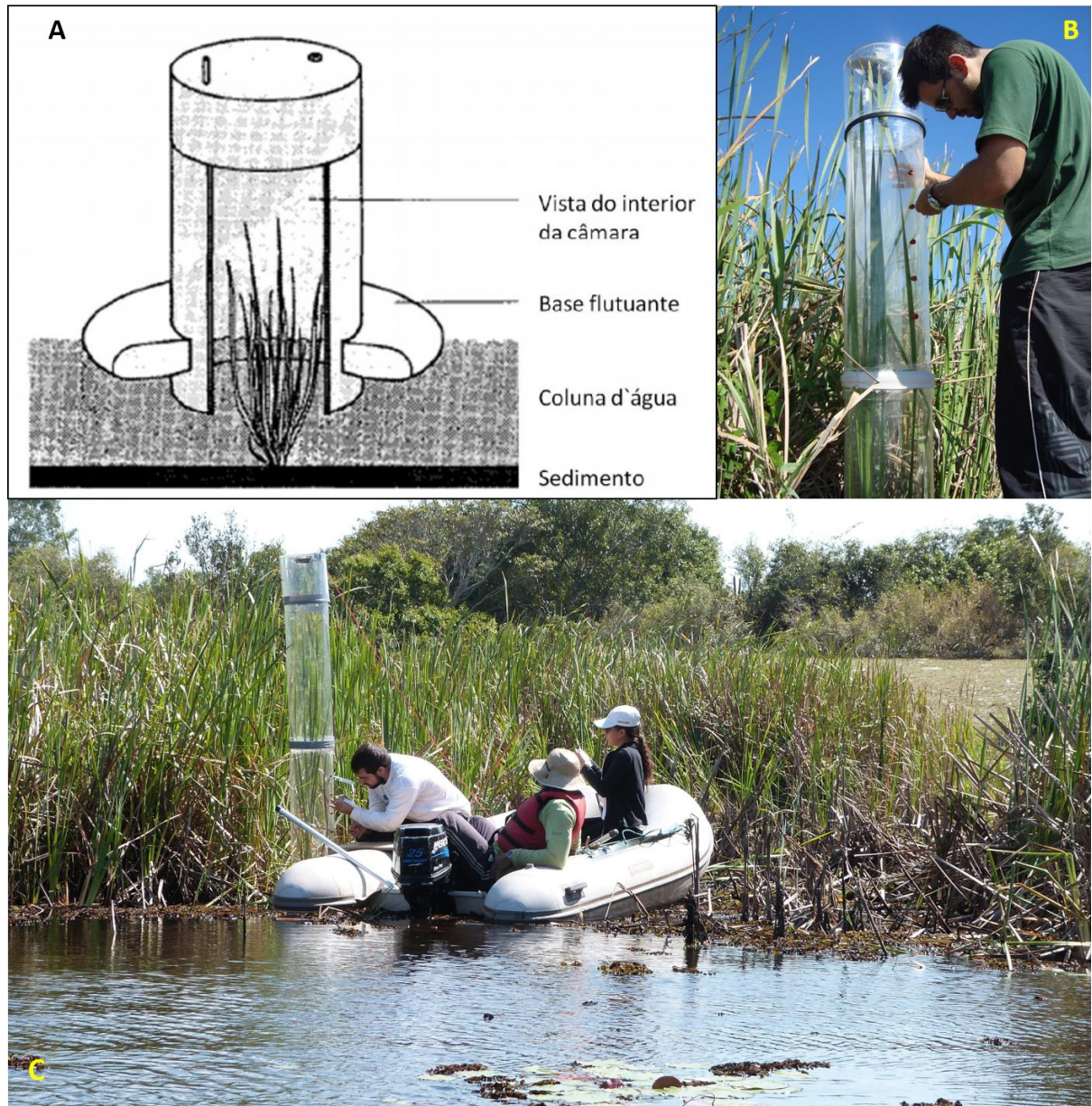


Figura 6. Metodologia de captação de CH_4 e CO_2 via transporte por macrófitas aquáticas emersas. A. Esquema adaptado de Livingston & Hutchinson, 1995 demonstrando a vista do interior da câmara flutuante; B e C. Fotos de arquivo pessoal obtidas em junho de 2012 demonstrando a alíquotagem de gases em indivíduos do gênero *Typha* sp. na lagoa Jurubatiba.

3.3. AMOSTRAGEM: ABIÓTICOS DA COLUNA D'ÁGUA, ATMOSFERA E SEDIMENTO

Em cada estação de amostragem foram coletadas amostras de água na superfície para posterior análise em laboratório de pH, N e P totais, clo-*a* (biomassa fitoplanctônica) e COD.

Além destes, no campo ainda foram mensurados outros parâmetros com equipamentos portáteis. Para profundidade máxima e transparência foi utilizado um disco de Secchi; para condutividade elétrica, salinidade e temperatura da água um condutivímetro (modelo YSI-30, com acurácia de $\pm 0,5\%$ FE; $\pm 0,1$ ppt; $\pm 0,1^\circ\text{C}$ e resolução de 0,1uS; 0,1ppt; 0,1 $^\circ\text{C}$); para oxigênio dissolvido (OD) um oxímetro (modelo YSI-95, calibrado ao nível do mar com acurácia de $\pm 0,2\text{mg/L}$; $\pm 2\%$ ar; $\pm 0,2^\circ\text{C}$ e resolução de 0,01mg/L; 0,1% ar; 0,1 $^\circ\text{C}$). A temperatura do ar foi medida com um termômetro de bulbo; o vento máximo e a média das velocidades do mesmo durante as amostragens de emissão utilizando um anemômetro digital (modelo Kestrel-2000). A coleta de sedimento foi realizada com um coletor tipo Core (0,018 m²), onde foram retiradas, em triplicatas, a fração superficial de 6cm e estas foram homogeneizadas e acondicionadas em potes plásticos opacos e levadas para laboratório para posterior análise do conteúdo de carbono orgânico.

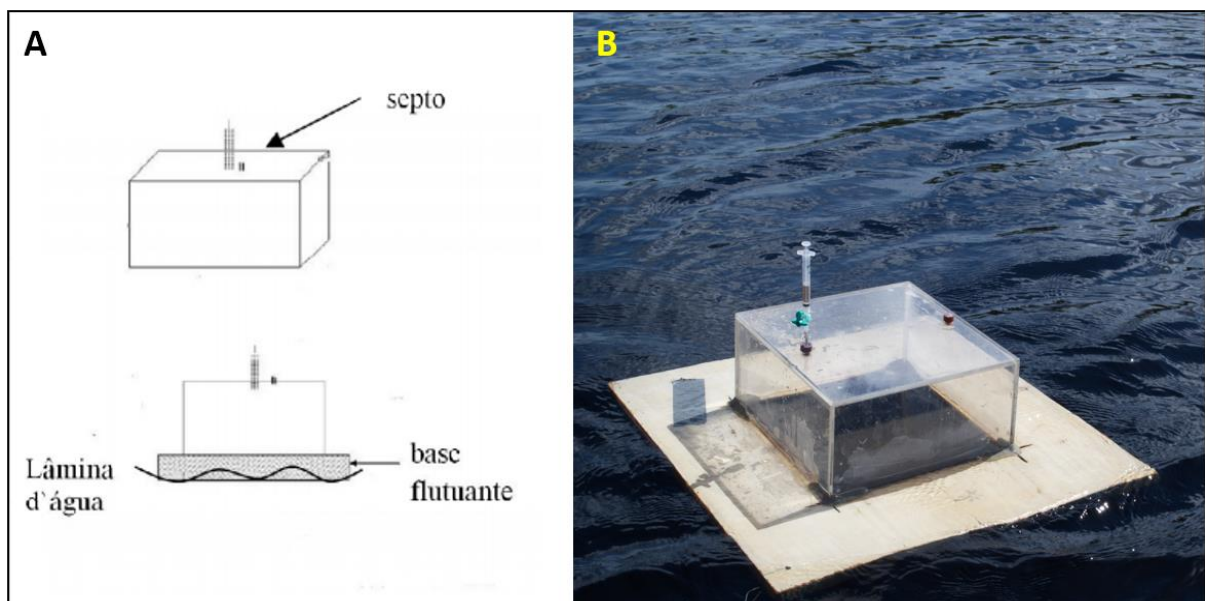


Figura 7. Metodologia de captação de CH_4 e CO_2 por transporte difusivo na coluna d'água. A. Esquema retirado de Gripp, 2011 demonstrando a localização do septo e o mecanismo de flutuabilidade da câmara estática; B. Foto de arquivo pessoal obtida em novembro de 2012 demonstrando o posicionamento da câmara em uma região limnética na lagoa Jurubatiba.

3.4. ANÁLISE DE DADOS: DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CH_4 E CO_2

As análises da concentração de CH_4 e CO_2 das amostras foram realizadas através de cromatografia gasosa que possibilita separar e analisar diferentes misturas de gases. O modelo do aparelho foi o Shimadzu GC-2010 equipado com metanador e um detector de

ionização de chama (FID). Para a detecção pelo FID, o gás contido na amostra foi queimado junto com nitrogênio (N₂) ultra-puro utilizado como gás de arraste, na presença de hidrogênio (H₂) e ar sintético. As temperaturas de injeção, detecção e da coluna foram mantidas a 120°C, 200°C e 85°C, respectivamente. Em todos os dias de análise foram realizadas seis calibrações utilizando um padrão de 201.805ppm puro e em 11 diluições (5,4 à 201.805ppm) para o CH₄ e três calibrações utilizando um padrão de 50.355ppm sem diluições para CO₂.

Os dados brutos foram obtidos em áreas das curvas de CH₄ e CO₂ e cada leitura foi ajustada através do software Shimadzu GC Solution 2010 para posterior conversão dos resultados em ppm, respeitando-se três métodos principais: i) o tempo de detecção inicial (saída) da leitura dos padrões puros e diluídos; ii) o tempo de retenção de maior amplitude para cada gás; iii) o efeito de cauda ajustado para diferentes concentrações.

As conversões de concentração em ppm para unidade de emissão (mg m⁻² dia⁻¹) dos fluxos oriundos do processo ebulitivo foram realizadas de forma distinta dos fluxos via macrófitas e difusivo.

As amostras obtidas através do fluxo ebulitivo captadas pelos funis invertidos foram calculadas à partir da concentração do gás no espaço de ar dos tubos acoplados aos funis. O valor da concentração foi multiplicado pelo volume¹ do espaço de ar, sendo este resultado então dividido pela área da boca do funil, levando-se em consideração o período de amostragem conforme as equações 1 e 2 propostas por Keller & Stallard (1994) e modificada por UNESCO/IHA (2010).

Equação 1: Determinação da concentração do gás em mg.m⁻³

$$Conc. \text{ Gás} [mg. m^{-3}] = \frac{Conc. \text{ Gás} [ppm] * MassaMolecular [g. mol^{-1}] * PressãoATM [KPa]}{8,3144J. K^{-1}. mol^{-1} * (273,13K + T [^{\circ}C])}$$

Equação 2: Cálculo do fluxo ebulitivo em mg m⁻² d⁻¹

$$FluxoEbul. [mg. m^{-2}. d^{-1}] = \frac{Conc. \text{ Gás.} [mg. m^{-3}] * Vol. \text{ GásColetado} [m^3]}{ÁreaFunil [m^2] * TempoAmostragem [dias]}$$

Para as emissões obtidas através do fluxo via macrófitas e difusivo na coluna d'água, o cálculo foi realizado a partir da variação temporal da concentração dos gases no interior da

¹ O volume de espaço de ar foi calculado a partir da subtração do volume total do frasco pelo volume de água encontrado na amostra.

câmara durante a amostragem. Esta variação foi analisada em regressões lineares para seleção das amostragens que apresentaram R^2 superior a 0,75 através da equação 3.

Equação 3: Equação da reta.

$$\text{Conc. Gás} = \text{Inclin. Reta} * \text{tempo} + \text{Intercepto}$$

É importante destacar que em situações onde haviam tendências às variações lineares e um ponto destoava, geralmente, na amostra referente a última alíquota, a mesma era excluída e posteriormente verificava-se se as linearidades apresentavam um R^2 superior a 0,95. Caso apresentassem, os fluxos eram considerados lineares onde possivelmente ocorreram erros associados à entrada de microbolhas, à turbulência na amostragem ou à detecção de concentrações em um dos tempos. No entanto, não foram abruptos para invalidar a linearidade de uma determinada amostragem. Como as estações de coleta eram subamostradas três vezes, se um fluxo fosse invalidado, apenas a média dos demais era utilizada.

À partir dos resultados das inclinações das retas foram empregadas as equações 1 e 4 adaptadas de (UNESCO/IHA, 2010). Após o cálculo dos fluxos difusivos, a média dos mesmos foram subtraídas dos fluxos via macrófitas para se obter o fluxo relacionado apenas ao vegetal, sendo este cálculo repetido em cada estação litorânea.

Equação 4: Cálculo dos fluxos via macrófitas e difusivo em $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$

$$\text{Fluxo}[\text{mg. m}^{-2}. \text{d}^{-1}] = \frac{\text{Inclinação}[\text{ppm. s}^{-1}] * F1 * F2 * \text{VolumeCâmara}[\text{m}^3]}{\text{ÁreaAberturaCâmara}[\text{m}^2]}$$

F1= Fator de conversão de ppm para mg m^{-3} para uma temperatura e pressão nas condições normais.

F2= Fator de conversão de minutos em dias ($60\text{min} * 24\text{h} = 1440 \text{m d}^{-1}$).

Os valores apresentados nos quadros em equivalência de CO_2 (CO_2eq) consideram o potencial de aquecimento global (em inglês global warming potential – GWP) adaptado do relatório AR5 do IPCC, 2013. O GWP foi uma unidade criada com o objetivo de estabelecer uma padronização entre os gases de efeito estufa em relação às suas capacidades de radiação ativa e retenção de calor na atmosfera equivalentes ao CO_2 em um horizonte de 100 anos, sendo o AR5 o relatório mais recente do IPCC onde podem ser encontrados valores mais refinados de GWP em relação aos relatórios anteriores para diversos gases de efeito estufa,

entre eles o CH₄ (IPCC, 2013). O documento veio a público em 2013 e atualizou o GWP do CH₄ para 34 vezes equivalente ao potencial de aquecimento global do CO₂, sendo assim, os valores de GWP apresentados no presente estudo consideram os valores médios de emissão total de CH₄ multiplicados por 34.

3.5. ANÁLISE DE DADOS: ABIÓTICOS DA COLUNA D'ÁGUA E SEDIMENTO

As amostras de água coletadas no campo foram levadas para o laboratório e imediatamente filtradas (Filtros GF/F 75/C 25mm) para se obter a fração dissolvida para análise de COD e o material particulado nos filtros para análise de clo-*a*. A determinação de COD foi realizada através da oxidação catalítica a alta temperatura com detector de infravermelho não dispersivo em um analisador de carbono (modelo Shimadzu TOC-5000). A análise de clo-*a* foi realizada por extração de pigmentos clorofilianos através do solvente etanol 90% e depois quantificados por espectrofotometria seguida de acidificação (Ácido HCl 2N) para posterior análise de produtos da degradação da clorofila (Nusch & Palme, 1975).

Parte da amostra não filtrada foi utilizada para determinação do pH através de um pHmetro Quimis Q400MT e parte destinada às análises de N e P totais. Para a determinação de N total foi utilizado o método da formação de óxido nítrico através da digestão com persulfato em autoclave seguida de combustão quemiluminescente oxidativa do nitrogênio em um analisador de Nitrogênio (Shimadzu TOC-5000, módulo TNM-1) (Alcaide & Forti, 2012). Para P total foi utilizado o método da determinação de fósforo na forma de ortofosfato, onde todo o fósforo foi convertido para esta forma através de sua oxidação por uma solução de persulfato de potássio a 120°C no autoclave. Posteriormente foi adicionado um reagente misto e as amostras foram lidas por espectrofotometria (Golterman et al., 1978).

As amostras de sedimento foram submetidas a secagem em estufas a 60°C por 10 dias (para eliminar a umidade da amostra), posteriormente homogeneizadas e aproximadamente 100g foram maceradas, para atingir granulometria fina, e armazenadas em sacos plásticos tipo Ziploc™. Estas amostradas foram analisadas através do método da combustão total em analisador de carbono (modelo Shimadzu TOC-5000, unidade sólida) para determinação do carbono orgânico total (Froehner & Martins, 2008).

3.6. ANÁLISE DE DADOS: VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Os dados meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura do ar, vento, precipitação, umidade e radiação) foram extraídos do Sistema de Informações Hidro-Meteorológicas (SIM) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), especificamente da estação meteorológica automática (A620) localizada à 8m de altitude nas coordenadas 22°02'S 41°03'O no município de São Tomé/RJ (cerca de 80km de distância dos ecossistemas amostrados).

3.7. ANÁLISE DE DADOS: ESTIMATIVAS DE ÁREAS OCUPADAS POR REGIÕES LIMNÉTICAS E LITORÂNEAS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO.

Foram adquiridas imagens de um fragmento do PARNA Jurubatiba abrangendo as lagoas costeiras Comprida e Jurubatiba referentes à um mosaico de dezembro de 2011 à fevereiro de 2012 e de uma cobertura de setembro de 2012 do banco de dados da operadora DigitalGlobe (Satélite GeoEye-1) e imagens referentes à cobertura de abril de 2008 do mesmo banco de dados, no entanto, do satélite Ikonos. As imagens foram analisadas com os objetivos de estimar os fluxos de CH₄ e CO₂ pelas áreas das lagoas estudadas em setembro de 2012, considerando sua divisão em regiões limnéticas e litorâneas, além de correlacioná-los com a variação sazonal destas regiões para desenvolver estimativas mais robustas quanto a emissão destes gases quando as lagoas apresentam áreas de colonização de macrófitas aquáticas emersas distintas diante das modificações de profundidade e área total das lagoas impostas pelo regime pluviométrico.

As imagens adquiridas (Figuras 24 e 25) apresentavam composição colorida das bandas R, G, B e IR já fusionadas com a banda pancromática, resolução espacial de 50cm e representavam uma área de 25km². As análises das áreas de ocupações limnéticas e litorâneas foram realizadas por um indicador gráfico chamado de índice de vegetação por diferença normalizada (do inglês normalized difference vegetation index – NDVI) (Figuras 24 e 25) que varia de -1 a 1. Sua geração possibilita, dentre muitas aplicações, diferenciar áreas ocupadas por água (NDVI baixo ou negativo - coloração azul) de áreas ocupadas por vegetação verde fotossinteticamente ativa (NDVI médio-alto – coloração amarela-verde) a partir de diferenças de refletâncias (Jakubauskas & Legates, 2000; Liira et al., 2010).

À partir dos resultados gerados através da aplicação do NDVI, foram criadas classificações baseadas na presença exclusiva de água ou de regiões colonizadas por

macrófitas aquáticas (Figura 16), sendo este produto final utilizado como base para as estimativas de emissão por áreas totais. Para avaliar a fidedignidade da classificação gerada, as classes foram submetidas aos cálculos de exatidão do índice Kappa, que expressa o grau de concordância entre imagens considerando uma escala de 0 (diferença completa) à 1 (semelhança completa) (Landis & Koch, 1977). Todos os dados foram obtidos e analisados através da parceria entre o Laboratório de Limnologia da UFRJ, PELD Sítio 5 e Embrapa Monitoramento por Satélite.

Para realizar as estimativas de emissão total e destacar a variação existente nos dados considerando o percentual de ocupação das regiões limnéticas e litorâneas e as áreas totais das lagoas baseadas na classificação de setembro de 2012, foram aplicadas equações de médias aritméticas ponderadas (Equação 5).

Equação 5: Emissão total em kg de CH₄ ou CO₂ por dia.

$$Emis.Total[Kg\ d^{-1}] = \frac{Média\ Emis.LIM.\ [kg.d^{-1}] * Área\ LIM.\ [%] + MédiaEmis.LIT.\ [kg.d^{-1}] * Área\ LIT.\ [%]}{Área\ LIM.\ [%] + Área\ LIT.\ [%]}$$

3.8. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para verificar a ocorrência de variabilidade espacial inter e intra lagunar nos fluxos ebulitivos, via macrófitas, difusivos e totais de CH₄ e CO₂ e encontrar números centrais que caracterizassem esta espacialidade assim como possíveis diferenças significativas entre regiões, porções e ecossistemas (tratamentos), foram realizadas análises de variância paramétricas e não paramétricas dependendo dos pressupostos alcançados. É importante destacar que a distribuição dos dados em cada tratamento representa a covariância sazonal das estações de coleta controladas por variáveis que regulam a magnitude dos fluxos, no entanto, esta abordagem estatística não permite distinguir especificamente qual variável contribuiu com as diferenças espaciais encontradas e sim quantificar a magnitude, em conjunto, de seus efeitos.

Inicialmente os dados foram submetidos aos testes para a verificação da normalidade e homogeneidade das variâncias com o objetivo de se determinar quais testes seriam empregados adiante. Para a normalidade foi utilizado o teste de D'Agostino-Pearson Omnibus K2, onde foi verificada a distância da distribuição de dados de uma distribuição normal em termos de assimetria e forma. Para rejeitar a hipótese nula que todos os valores

foram amostrados de uma distribuição normal o valor do nível de significância (p) deveria ser maior que 0,05. Para verificar a homogeneidade das variâncias foram utilizados os testes de Bartlett (quando os dados apresentavam distribuição normal) e Levene (quando não apresentavam distribuição normal) ambos considerando p maior que 0,05 para se rejeitar a hipótese nula, que neste caso, assumia que as amostras pertenciam a populações com mesma variância. Os dados que não se apresentaram inicialmente normais e homocedásticos foram logaritmizados e novamente testados quanto a estes pressupostos na tentativa de se trabalhar preferencialmente com estatísticas paramétricas, no entanto, aqueles que mesmo após a transformação ainda não estavam de acordo com os pressupostos foram analisados através de estatísticas não paramétricas. Foram realizadas ANOVAs (para distribuições normais e homocedásticas) e Kruskal-Wallis (distribuições que não se apresentaram normais), seguidas de pós teste de Tukey e Dunn, respectivamente, para avaliação de quais tratamentos (regiões e porções) diferiam entre si. Para comparação dos tratamentos considerando somente as lagoas foram realizados testes de soma de duas amostras de Wilcoxon-Mann-Whitney (não paramétrico) que possibilita estimar se há probabilidade das amostras de um tratamento escolhido aleatoriamente de uma população A ter um peso maior que as amostras de um tratamento escolhido aleatoriamente da população B. Nos testes destinados à comparação de diferentes tratamentos (regiões, porções e lagoas) foi considerado $p < 0,05$ afim de se rejeitar a hipótese nula, que neste caso, assumia que os tratamentos não apresentavam diferença entre médias, medianas ou ranks (particulares de cada teste) e assim foram amostrados da mesma população. Os testes de normalidade, homocedasticidade, ANOVA, Kruskal-Wallis e Wilcoxon-Mann-Whitney foram realizados através dos softwares GraphPad Prism v.6.01 e SAS JMP v.10.

Com o objetivo de diminuir a dimensionalidade dos dados e selecionar as variáveis abióticas e meteorológicas que apresentaram maior variabilidade entre as estações de coleta e entre campanhas foi utilizado um método multivariado de ordenação chamado análise de componentes principais (do inglês principal component analysis – PCA) através dos softwares IBM SPSS Statistics v.22 e SAS JMP v.10. Previamente à aplicação do método, os dados foram transformados em \log_{10} e foi verificada a adequação dos dados através da técnica de Kaiser Meyer Olkin (KMO) (Ten Caten et al., 2010). Após a análise foi utilizado o critério do scree plot e autovalor > 1 para seleção e interpretação dos componentes principais gerados. Este método é um procedimento matemático, não estatístico, que não requer pressupostos de

normalidade e que não resulta em testes estatísticos de significância. No entanto, ele ordena os dados em um gráfico uni, bi ou tridimensional que auxilia a verificar variáveis dependentes (quando apresentam componentes direta ou inversamente proporcionais em um mesmo eixo) e independentes (quando há ortogonalidade entre os sucessivos componentes), sendo importante destacar que a identificação destas relações e dos processos limnológicos que as regem não depende exclusivamente do resultado do teste e sim do conhecimento ecológico destas relações e do ambiente estudado (Bini, 2004).

As relações entre os fluxos totais de CH₄ e CO₂ com as variáveis abióticas de maior variabilidade entre estações de coleta foram testadas utilizando-se o critério de seleção de Akaike (AIC), através do software R versão 3.1.10, pacote de dados: AICcmodavg (Mazerolle, 2014). Este critério seleciona modelos que apresentam maior informação considerando o número de variáveis utilizadas e a força de explicação do modelo. A escolha do melhor modelo entre um conjunto de possíveis candidatos se dá em função do menor valor de AIC (Burnham & Anderson, 2004) e as diferenças encontradas nos valores de $\Delta AICc > 2$ evidenciam alta probabilidade para modelos alternativos, sendo assim, foram adotadas como linha de corte. A estratégia para a escolha de variáveis abióticas destinadas à geração de modelos selecionados através do critério de Akaike foi primeiramente utilizar àquelas selecionadas pela PCA referente às variáveis abióticas e gradativamente adicionar as demais que apresentassem maior relação com os fluxos de gases de acordo com a literatura, para assim, evitar a criação de uma seleção final com mais de 10 variáveis que em conjunto também pudessem aumentar a probabilidade de geração de modelos alternativos.

4. RESULTADOS

4.1. CONTRIBUIÇÕES DE REGIÕES E VIAS DE TRANSPORTE PARA AS EMISSÕES DE CH₄ E CO₂

As contribuições das regiões e suas respectivas vias para as emissões totais de CH₄ e CO₂ nas lagoas Comprida e Jurubatiba podem ser observadas nas figuras 8 à 11. O percentual de cada conjunto “região-via” foi determinado à partir do orçamento final destes conjuntos nos fluxos totais. Por exemplo, o percentual de 7,65% do fluxo difusivo de CH₄ referente à região litorânea na lagoa Comprida considera o balanço final de CH₄ que é emitido e sequestrado através deste conjunto para a emissão deste gás. Ainda é importante destacar que a contribuição dos fluxos via macrófitas para as emissões totais de CO₂ não foram apresentados nestas figuras, pois os balanços finais em ambos os sistemas foram negativos (sequestro).

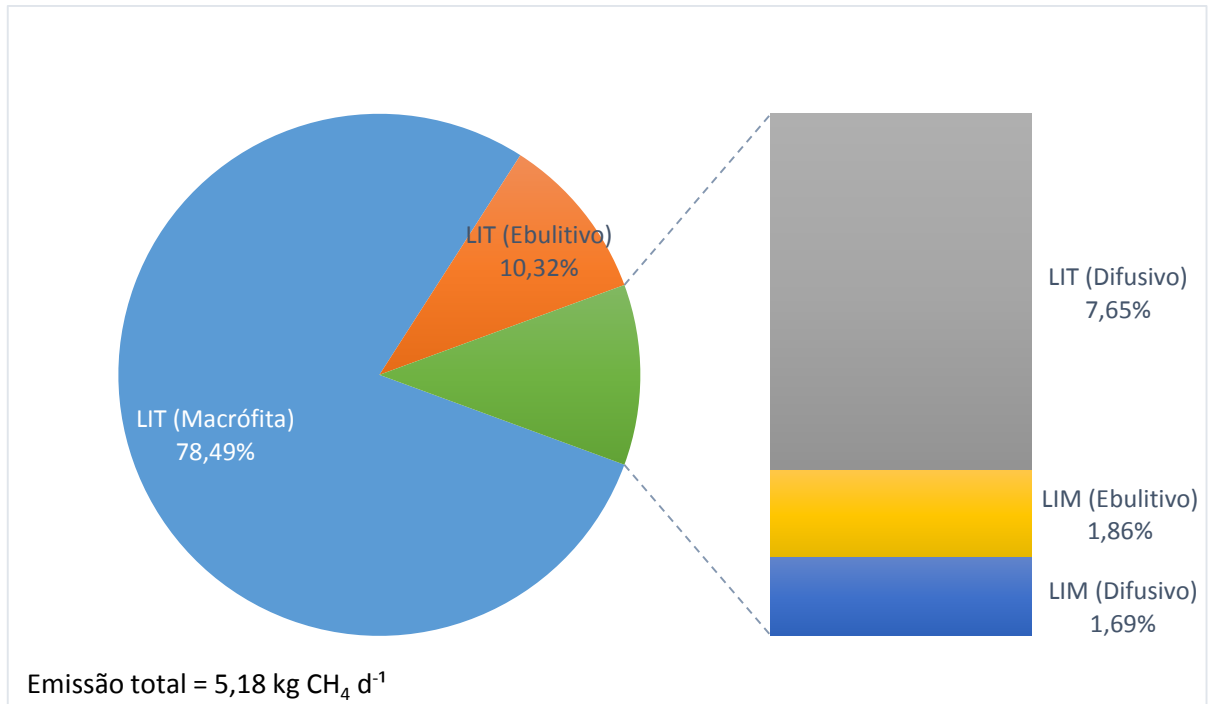


Figura 8. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitivo, macrófita e difusiva) para a emissão total de CH₄ na lagoa Comprida considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada.

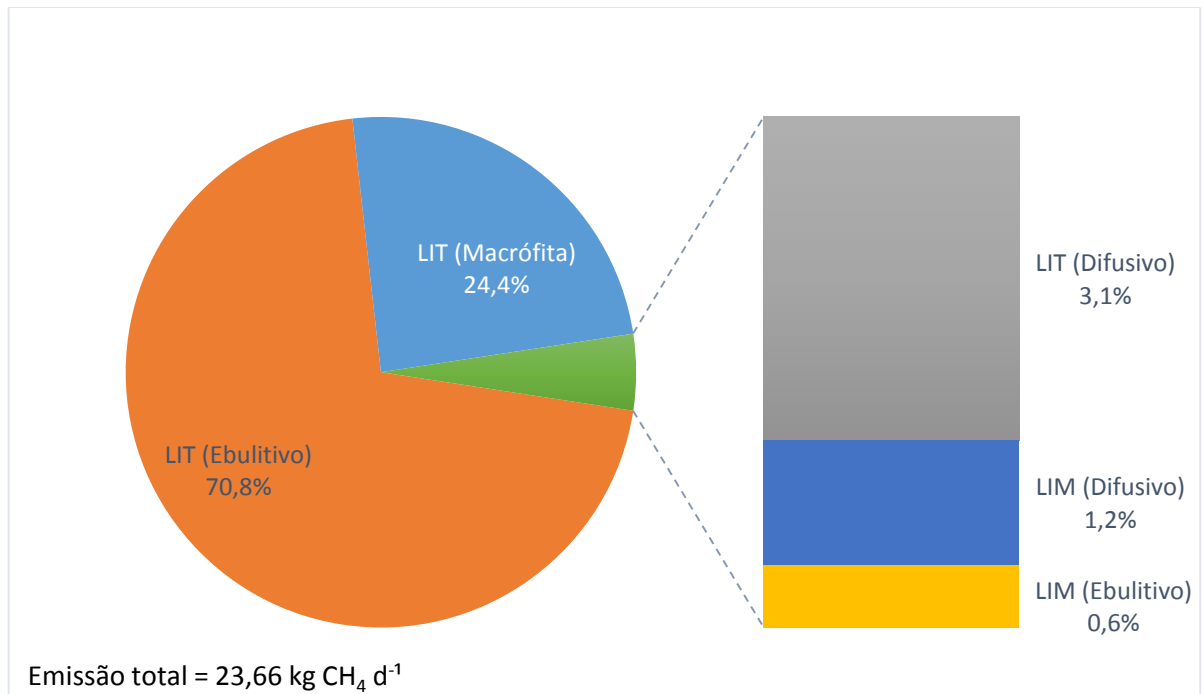


Figura 9. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitivo, macrófita e difusiva) para a emissão total de CH₄ na lagoa Jurubatiba considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada.

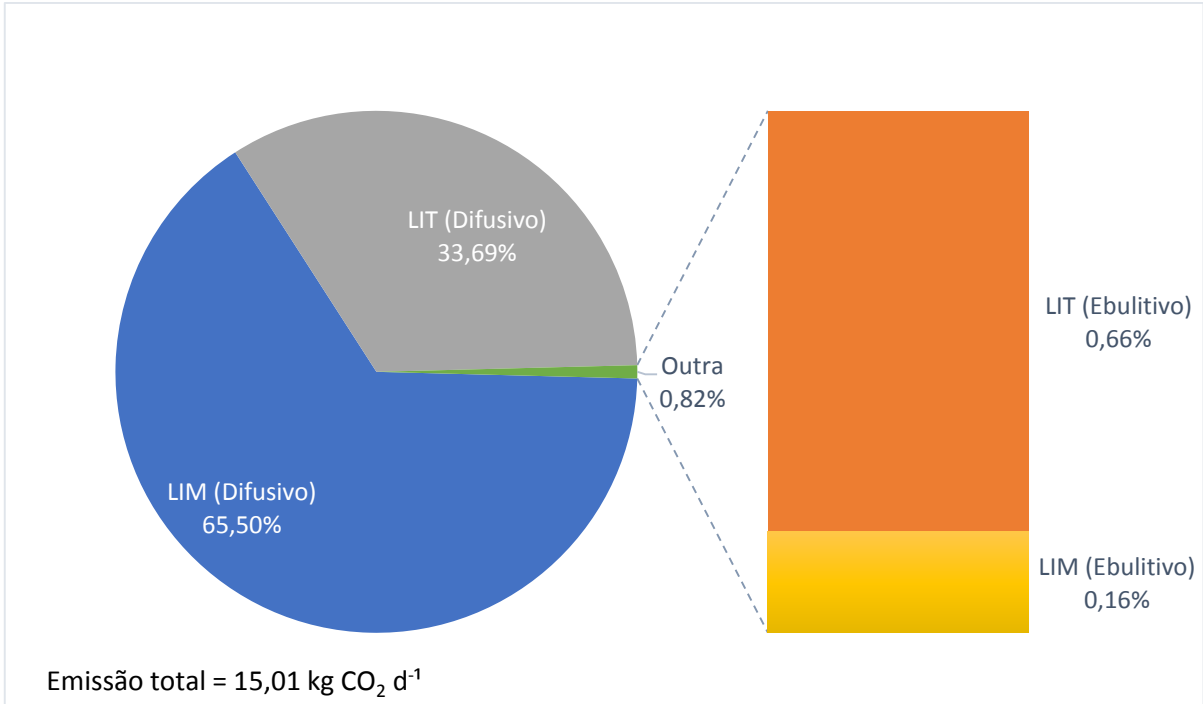


Figura 10. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitiva e difusiva) para a emissão total de CO₂ na lagoa Comprida considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada. Os dados referentes ao fluxo via macrófitas não foram inseridos neste gráfico, pois estes apresentaram balanço final negativo (sequestro).

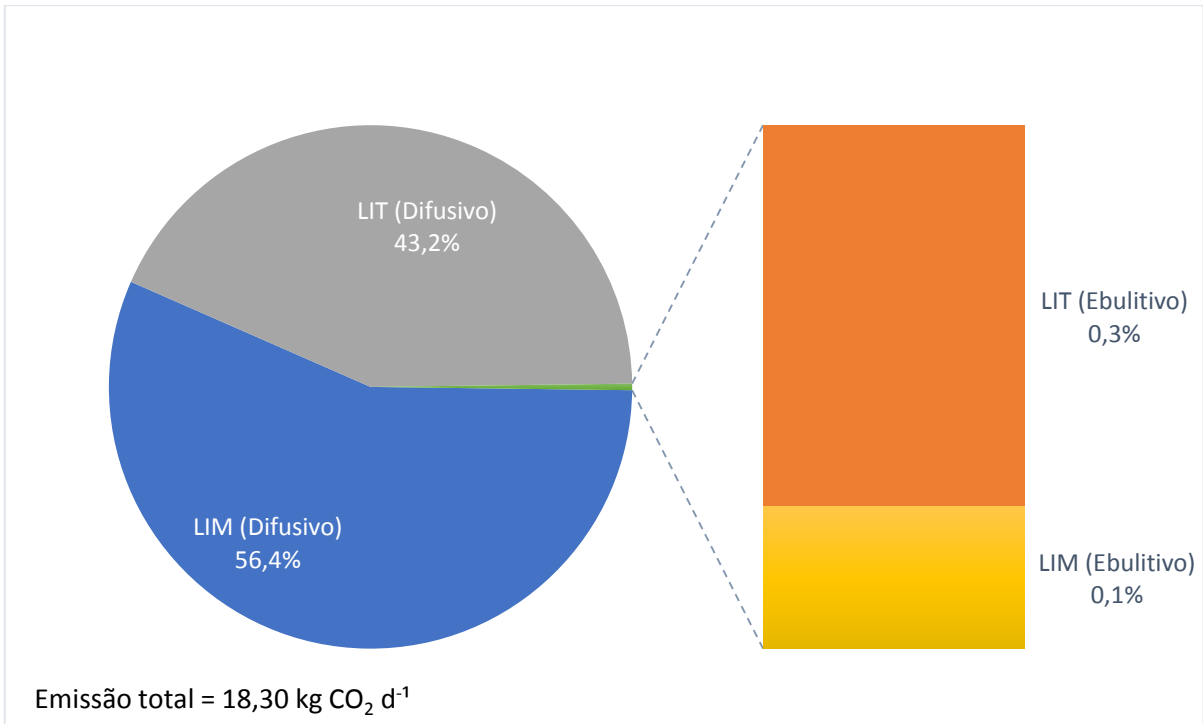


Figura 11. Contribuição das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) e suas vias (Ebulitiva e difusiva) para a emissão total de CO₂ na lagoa Jurubatiba considerando os fluxos analisados ao longo de cinco campanhas em 2012 e 2013 extrapolados pelas áreas referentes à classificação de 2012 de cada região estudada. Os dados referentes ao fluxo via macrófitas não foram inseridos neste gráfico, pois estes apresentaram balanço final negativo (sequestro).

4.2. VARIABILIDADE ESPACIAL (REGIONAL E CONTINENTAL) DOS FLUXOS EBULITIVOS DE CH₄ E CO₂: UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR

Os fluxos ebulitivos de CH₄, ao contrário de CO₂, foram importantes vias de emissão de carbono nas duas lagoas estudadas (Figura 8 à 11). À partir dos resultados dos testes estatísticos apresentados no quadro 1 e figura 12, foi observada diferença significativa entre as regiões limnética e litorânea. As regiões litorâneas apresentaram medianas de emissão de CH₄ de cerca de 70 e 520 vezes maiores em relação às regiões limnéticas nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente. Neste contexto, é importante destacar que as regiões limnéticas de ambas as lagoas apresentaram valores baixos e semelhantes (mediana Comprida = 0,05905 mgCH₄ m⁻² d⁻¹; mediana Jurubatiba = 0,0799 mgCH₄ m⁻² d⁻¹). Com a integração destes resultados à figura de percentuais de emissão (Figuras 8 e 9), foi possível observar que os fluxos ebulitivos de CH₄ nas regiões litorâneas da lagoa Jurubatiba apresentaram grande importância para o balanço total deste gás. Já em uma abordagem continental, diante dos frequentes coeficientes de variação (CV) elevados nos tratamentos, não foram encontradas diferenças significativas entre os mesmos (Quadro 1 e figura 12). No entanto, foram observadas tendências quanto à espacialidade destas emissões, sendo os valores mais elevados encontrados na porção do fundo (porção mais continental) e da barra (porção próxima ao oceano) nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente.

Apesar dos fluxos ebulitivos de CO₂ terem apresentado pequena contribuição na emissão total deste gás (Figuras 10 e 11), estes também foram analisados e também pôde ser observada diferenças significativas quanto à abordagem intralagunar (entre regiões). De forma semelhante aos fluxos de CH₄, as regiões litorâneas de ambas as lagoas também apresentaram valores de emissão mais elevados em relação às regiões limnéticas. No entanto, com proporções inferiores ao gás tratado anteriormente (Figura 12). As médias das regiões litorâneas nas lagoas Comprida e Jurubatiba foram, respectivamente, cerca de cinco e três vezes maiores em relação às médias das regiões limnéticas (semelhantes entre si) (Comprida LIM = 0,4322 mgCO₂ m⁻² d⁻¹; Jurubatiba LIM = 0,6596 mgCO₂ m⁻² d⁻¹). Sendo assim, foram encontradas ligeiras diferenças entre as médias de regiões litorâneas de cada lagoa (Comprida LIT = 1,948 mgCO₂ m⁻² d⁻¹; Jurubatiba LIT = 2,069 mgCO₂ m⁻² d⁻¹), culminando num padrão mais homogêneo, quando consideradas as mesmas regiões em lagoas diferentes (Figura 12). Por fim, em uma abordagem considerando a continentalidade, assim como os fluxos de CH₄, também não foram encontradas diferenças significativas diante do elevado CV em todos os

tratamentos, ainda que menor em relação ao gás tratado anteriormente (Quadro 1 e figura 12).

De uma forma geral tanto para fluxos ebulitivos de CH₄ quanto para CO₂ pôde ser observada duas populações distintas de dados convergindo em uma clara espacialidade na abordagem regional (limnéticas e litorâneas) e menor heterogeneidade e altos CVs ao considerar a abordagem continental (porções barra e fundo). Este último possivelmente ocorreu pela forma que os dados foram tratados, onde foram agrupadas regiões limnéticas e litorâneas para compor as porções barra e fundo, portanto, o peso das regiões limnéticas (semelhantes intralagunariamente e interlagunariamente) em 50% dos dados aproximou todos os tratamentos.

Quadro 1. Resultados dos testes estatísticos realizados através de ANOVA e Kruskal-Wallis referentes aos fluxos ebulitivos de CH₄ e CO₂ (mg m⁻² d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando as abordagens regionais (limnética-Lim e litorânea-Lit) e continentais (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). A identificação da figura e gráfico correspondente, o resultado do teste F (quando aplicável), estatística de Kruskal-Wallis (H) (quando aplicável), o nível de significância (p), o coeficiente de determinação (R²) (quando aplicável) e o n amostral de cada tratamento encontram-se nesta ordem no quadro abaixo. As medianas, quartis e a identificação de quais tratamentos foram significativamente diferentes através do pós teste de Tukey ou Dunn podem ser observadas na figura 12.

Figura 12- Gráficos	ANOVA (Teste F)	Kruskal-Wallis (H)	p	R ²	n-Comp (Lim/Lit) ou (Bar/Fun)	n-Juru (Lim/Lit) ou (Bar/Fun)
A	x	29,08	<0,05	x	8/8	12/16
B	x	18,74	<0,05	x	8/8	8/8
C	2,40	x	0,08	0,20	8/8	12/16
D	x	5,40	0,14	x	8/8	8/8

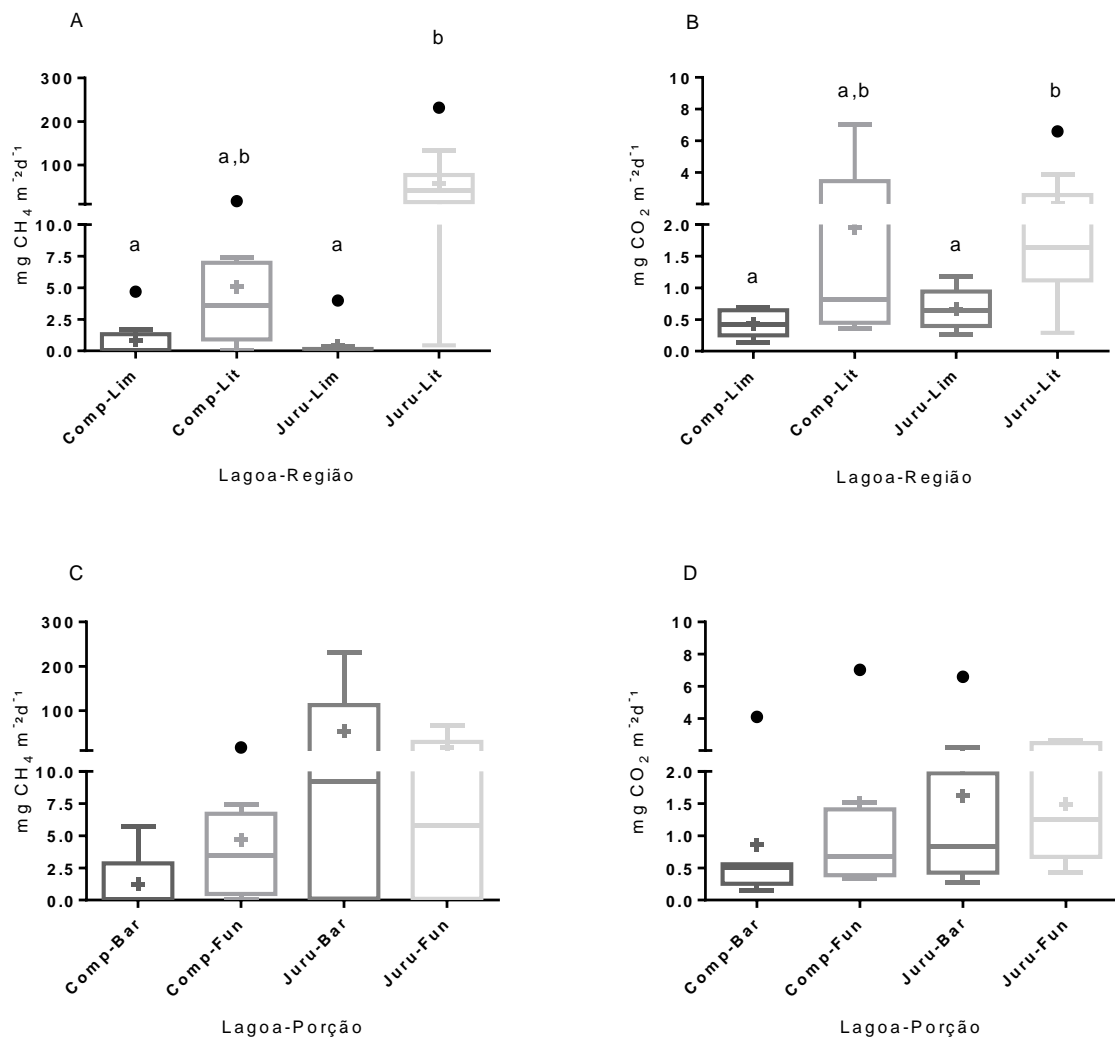


Figura 12. Fluxos ebulitivos de CH_4 e CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando as abordagens regionais (limnética-Lim e litorânea-Lit) e continentais (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). Abordagem regional dos gases CH_4 e CO_2 (A e B, respectivamente) e abordagem continental dos gases CH_4 e CO_2 (C e D, respectivamente). A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1º e 2º quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 1).

4.3. VARIABILIDADE ESPACIAL (CONTINENTAL) DOS FLUXOS DE CH_4 E CO_2 VIA MACRÓFITAS EMERSAS: UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR

O transporte de CH_4 e CO_2 através de macrófitas foi uma importante via de saída e entrada de carbono nas lagoas estudadas (Figuras 8 à 11). Contudo, no caso dos fluxos de CO_2 , não foram apresentados percentuais de contribuição para emissão nas figuras 10 e 11, pois o balanço final desta via foi de sequestro de carbono, contribuindo com médias de $-862,6$ e $-2092 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente. Os fluxos via

macrófitas foram testados apenas na abordagem continental, pois não haviam macrófitas aquáticas emersas nas regiões identificadas como limnéticas neste estudo, portanto, para encontrar comparações entre as estimativas de balanço de carbono de todas as regiões litorâneas referentes à cada lagoa via transporte por macrófita, verificar figura 15.

Na abordagem continental do fluxo de CH_4 (Figura 13) pôde ser observada grande variabilidade em cada estação, principalmente nas amostragens da porção fundo da lagoa Comprida, onde foi encontrada a menor mediana (valores próximos de $0 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), ou seja, perto de uma ausência de emissão quando considerada a subtração da média do fluxo difusivo, atribuída ao grande número de amostragens (cerca de 60%) que apresentaram este perfil nesta estação. Em compensação, esta porção também apresentou o maior valor de emissão (Máx= $208,7 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) dentre todos os tratamentos apresentados neste gráfico.

Em relação aos fluxos de CO_2 , estes apresentaram maior variabilidade entre porções da barra e do fundo da lagoa Jurubatiba em relação às mesmas porções da Comprida. Além disso, houve um padrão de consumo de CO_2 nas porções do fundo de ambas as lagoas, destacando-se Jurubatiba, onde foi encontrado o valor mais elevado de consumo deste gás (Mín= $-5488 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; Máx= $2647 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Em um aspecto geral, é importante destacar que em ambas as análises não foram encontradas diferenças significativas entre tratamentos (Quadro 2 e figura 13), apesar de terem sido observados tratamentos com diferenças abruptas nas escalas de distribuição dos dados. Além disso, destacamos o número reduzido de observações, pois houve a inserção de apenas uma única estação de amostragem “MAC” em cada porção para efeito desta comparação. Portanto, pouco pôde ser concluído com respaldo estatístico à respeito da abordagem continental no fluxo via macrófitas de ambos os gases.

Quadro 2. Resultados dos testes estatísticos realizados através de ANOVA e Kruskal-Wallis referentes aos fluxos de CH_4 e CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) via transporte por macrófitas amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando somente a abordagem continental (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). A identificação da figura e gráfico correspondente, o resultado do teste F (quando aplicável), estatística de Kruskal-Wallis (H) (quando aplicável), o nível de significância (p), o coeficiente de determinação (R^2) (quando aplicável) e o n amostral de cada tratamento encontram-se nesta ordem no quadro abaixo. As medianas, quartis e a identificação de quais tratamentos foram significativamente diferentes através do pós teste de Tukey ou Dunn podem ser observadas na figura 13.

Figura13- Gráficos	ANOVA (Teste F)	Kruskal-Wallis (H)	p	R^2	n-Comp (Bar/Fun)	n-Juru (Bar/Fun)
A	x	0,32	0,95	x	5/5	5/5
B	x	3,44	0,32	x	5/5	5/5

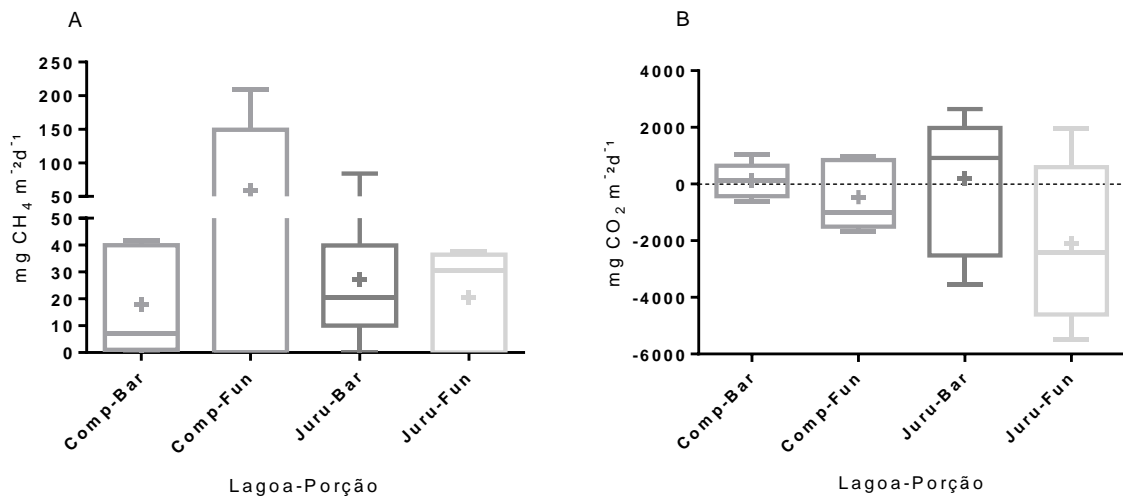


Figura 13. Fluxos de CH_4 (A) e CO_2 (B) ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) via macrófitas amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando somente a abordagem continental (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 2).

4.4. VARIABILIDADE ESPACIAL (REGIONAL E CONTINENTAL) DOS FLUXOS DIFUSIVOS DE CH_4 E CO_2 : UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR

Os fluxos difusivos de acordo com as figuras 8 à 11 (contribuição dos fluxos para as emissões totais) foram importantes vias de emissão de carbono, principalmente na forma de CO_2 , onde foram responsáveis por mais de 99% da emissão total deste gás em ambas as lagoas, ao considerar apenas a soma dos fluxos difusivos e ebulitivos nas duas regiões estudadas devido ao balanço final de sequestro apresentado pelas macrófitas.

Na abordagem considerando os fluxos de CH_4 em regiões limnéticas e litorâneas, não houve diferença significativa entre tratamentos (Quadro 3 e figura 14) e todos apresentaram médias positivas e próximas de zero. No entanto, em todos também foram encontrados grupos de amostragens (entre 30 e 50% dependendo do tratamento) com valores de influxo deste gás. Na abordagem referente à continentalidade dos fluxos de CH_4 , pôde se observar que os valores negativos, que ocorreram nas duas regiões da lagoa Comprida na abordagem anterior, foram restritos somente às estações da porção da barra neste sistema. Já na lagoa Jurubatiba, os influxos ocorreram predominantemente na porção do fundo. Nesta abordagem

foi encontrada diferença significativa entre tratamentos, sendo o único valor médio de influxo ($-2,292 \text{ mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) encontrado na porção da barra na lagoa Comprida.

Em relação à variabilidade espaço-regional e continental nos fluxos difusivos de CO_2 , foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos em ambas abordagens (Quadro 3 e figura 14) e uma tendência à emissões mais elevadas na lagoa Jurubatiba em relação à Comprida, até 3,1 vezes maior considerando a região litorânea na abordagem regional e até 2,4 vezes maior ao considerar à porção barra na abordagem continental. Também é importante destacar que apenas na lagoa Comprida ocorreram influxos, ainda que mais de 75% dos grupos de amostragens em ambas as regiões e porções deste ambiente apresentaram valores acima de 0 (emissão).

Em uma síntese geral, pôde se observar que apesar dos fluxos de CH_4 da porção barra da lagoa Comprida, numa abordagem continental, ter apresentado perfil de influxo que o diferenciou dos demais, em outras abordagens não houve espacialidade significativa dentro da mesma lagoa. Além disso, na abordagem regional dos fluxos de CH_4 todos os tratamentos foram semelhantes, portanto exceto a barra da Comprida, todos os tratamentos apresentaram-se homogêneos num aspecto intralagunar e com tendência à perfis mais heterogêneos ao considerar compartimentos interlagunares.

Quadro 3. Resultados dos testes estatísticos realizados através de ANOVA e Kruskal-Wallis referentes aos fluxos difusivos de CH_4 e CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando as abordagens regionais (limnética-Lim e litorânea-Lit) e continentais (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). A identificação da figura e gráfico correspondente, o resultado do teste F (quando aplicável), estatística de Kruskal-Wallis (H) (quando aplicável), o nível de significância (p), o coeficiente de determinação (R^2) (quando aplicável) e o n amostral de cada tratamento encontram-se nesta ordem no quadro abaixo. As medianas, quartis e a identificação de quais tratamentos foram significativamente diferentes através do pós teste de Tukey ou Dunn podem ser observadas na figura 14.

Figura 14- Gráficos	ANOVA (Teste F)	Kruskal-Wallis (H)	p	R^2	n-Comp (Lim/Lit) ou (Bar/Fun)	n-Juru (Lim/Lit) ou (Bar/Fun)
A	0,35	x	0,78	0,02	10/9	14/14
B	x	13,99	<0,05	x	10/10	15/13
C	3,67	x	<0,05	0,25	10/9	8/10
D	x	12,42	<0,05	x	10/10	9/9

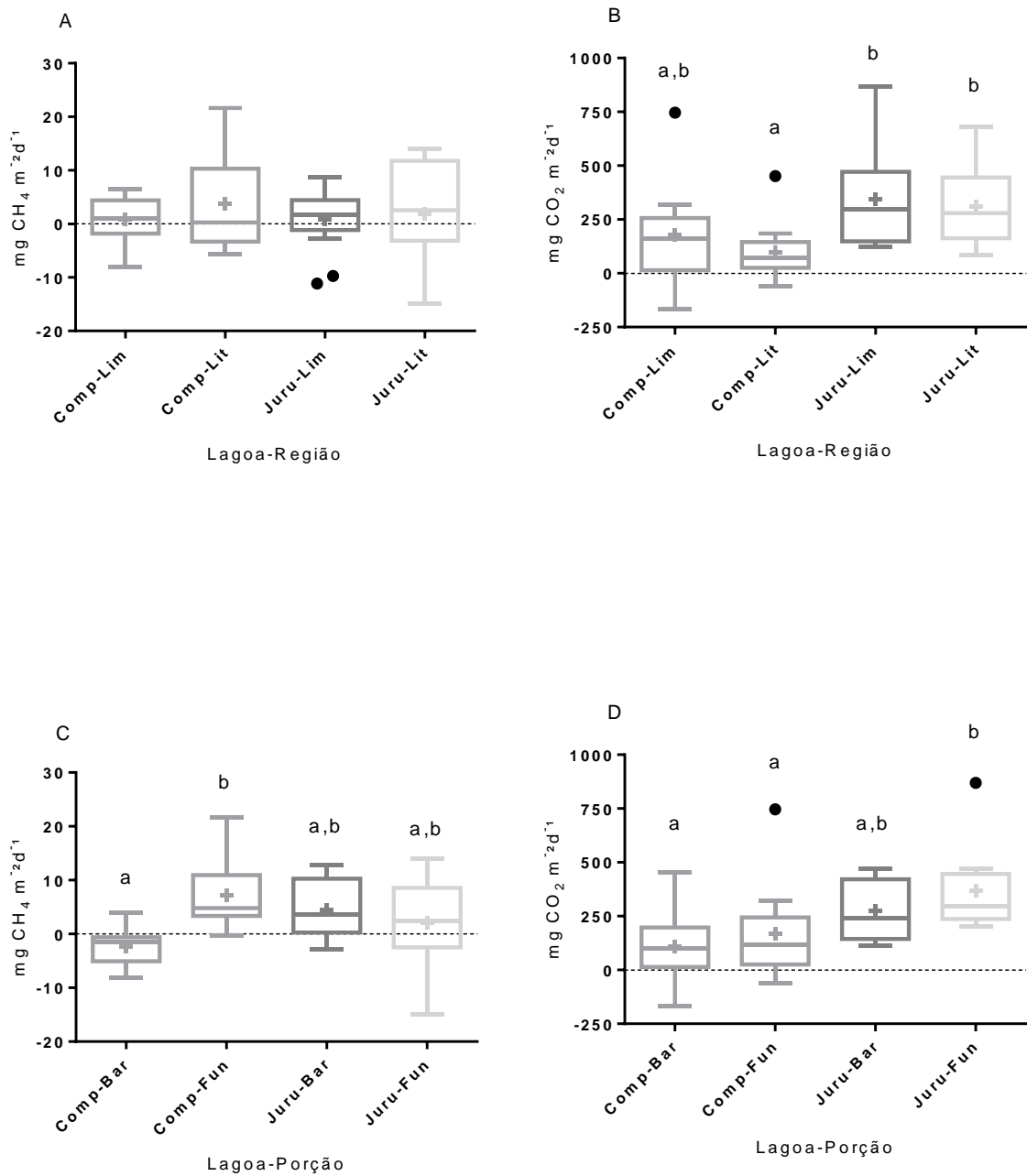


Figura 14. Fluxos difusivos de CH_4 e CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 considerando as abordagens regionais (limnética-Lim e litorânea-Lit) e continentais (porção barra-Bar e porção fundo-Fun). Abordagem regional dos gases CH_4 e CO_2 (A e B, respectivamente) e abordagem continental dos gases CH_4 e CO_2 (C e D, respectivamente). A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 3).

4.5. VARIABILIDADE ESPACIAL INTERLAGUNAR DOS FLUXOS DE CH₄ E CO₂ VIA EBULIÇÃO, MACRÓFITAS E DIFUSÃO

Considerando as características morfológicas e a variação sazonal observada no campo durante o período de coleta somadas aos dados referentes às classificações de regiões limnéticas e litorâneas obtidas em períodos pluviométricos distintos nos anos de 2008, 2011 e 2012, pôde-se observar uma variabilidade temporal nas áreas destas regiões. Esta temporalidade foi caracterizada pela contração das áreas limnéticas (área limnética \approx 40% da área total) em períodos de estiagem e a expansão (área limnética \approx 60% da área total) em períodos chuvosos, ocorrendo uma variação aproximadamente inversa em regiões colonizadas por macrófitas emersas. Diante disso, na figura 15 e nos resultados dos testes apresentados no quadro 4, foi considerada uma área média de 50% do total como contribuição de cada região em uma abordagem interlagunar dos fluxos amostrados.

Apesar de apenas os fluxos ebulitivos e difusivos de CO₂ terem apresentado diferenças significativas na abordagem interlagunar (Quadro 4 e figura 15), foi observada uma tendência à valores elevados (medianas) de emissão de ambos os gases na lagoa Jurubatiba, mesmo desconsiderando sua maior área total em relação à lagoa Comprida. Além disso, apenas nos fluxos ebulitivos de CH₄ foi observada parte considerável dos dados (intervalo interquartil) referentes à lagoa Jurubatiba em uma ordem de grandeza superior, cerca de 40 vezes maior em relação à lagoa Comprida.

Quadro 4. Resultados dos testes de soma de duas amostras de Wilcoxon-Mann-Whitney referentes aos tratamentos lagoa Comprida (Comp) e lagoa Jurubatiba (Juru), sem distinção de região ou porção, considerando os fluxos ebulitivo, via macrófitas, difusivo e total de CH₄ e CO₂ amostrados ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. A identificação da figura e gráfico correspondente, o resultado do teste U, o nível de significância (p) e o n amostral de cada tratamento encontram-se nesta ordem no quadro abaixo. As medianas, quartis e a identificação dos tratamentos que foram significativamente diferentes podem ser observados na figura 15.

Figura 15-Gráficos	Mann-Whitney (U)	p	n-Comp	n-Juru
A	132	0,09	16	24
B	118	<0,05	16	24
C	81	0,85	10	17
D	77	0,70	10	17
E	258	0,86	19	28
F	131	<0,05	20	33

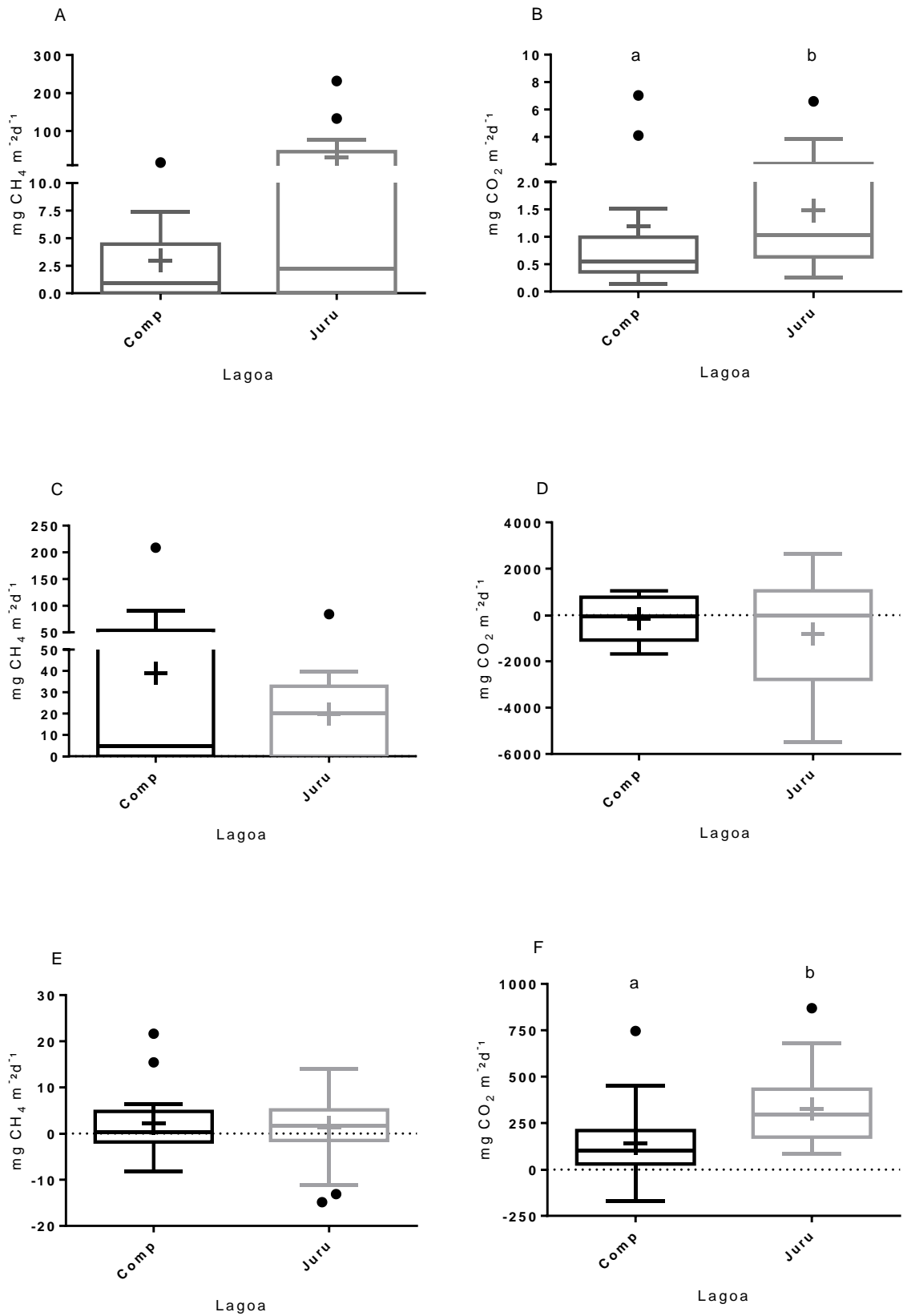


Figura 15. Fluxos de CH_4 e CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas (somente ebullitivo) e cinco campanhas (via macrófitas e difusivo) realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os gráficos A e B correspondem à via ebullitiva dos gases CH_4 e CO_2 , respectivamente; os gráficos C e D correspondem ao transporte via

macrófitas dos gases CH_4 e CO_2 , respectivamente; e os gráficos **E** e **F** correspondem à via difusiva dos gases CH_4 e CO_2 , respectivamente. A barra horizontal corresponde à *mediana, os limites da caixa correspondem ao 1º e 2º quartis, o símbolo (+) corresponde à *média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras *a* e *b* indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através do teste U de soma de duas amostras de Wilcoxon-Mann-Whitney (Mais detalhes no quadro 4).

* As médias e medianas obtidas em cada lagoa consideram ocupações de 50% da área total por região limnética e 50% por região litorânea.

4.6. VARIABILIDADE ESPACIAL DOS FLUXOS TOTAIS EXTRAPOLADOS PELAS ÁREAS OBTIDAS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE IMAGEM DE SATÉLITE

As estimativas das áreas ocupadas por regiões limnéticas, litorâneas e totais obtidas através da classificação referente à cobertura de satélite em setembro de 2012 (figura 16) podem ser verificadas no quadro 5. As imagens obtidas para classificação apresentaram índice kappa de 0,773 e de acordo com (Landis & Koch, 1977), foram classificadas com qualidade “muito boa” numa escala onde acima de 0,6 é “bom” ou adequado para se trabalhar e 1,0 é “excelente”.

Apesar de uma diferença considerável nas áreas totais das lagoas, sendo a lagoa Jurubatiba cerca de 3,5 vezes maior que a lagoa Comprida, as áreas classificadas em regiões limnéticas e litorâneas apresentaram proporções relativas semelhantes entre lagoas (quadro 5). A partir destas estimativas, os fluxos totais (soma dos três fluxos estudados) foram extrapolados pelas áreas ocupadas por cada região e estes foram testados estatisticamente seguindo um padrão de tratamentos semelhantes àqueles apresentados nos estudos de fluxos isolados, no entanto, apenas considerando a abordagem regional.

Em relação aos fluxos totais de CH_4 (Quadro 6 e figura 17), as regiões litorâneas apresentaram as maiores amplitudes bem como medianas mais elevadas (mediana Comprida LIT = 2,01 kg CH_4 d⁻¹; mediana Jurubatiba LIT = 17,39 kg CH_4 d⁻¹), cerca de 14 e 18 vezes maiores em relação às regiões limnéticas das lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente. Nesta abordagem foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos (Quadro 6), sendo a região litorânea da lagoa Jurubatiba aquela que apresentou o valor mais elevado de emissão (Máx= 81,20 kg CH_4 d⁻¹) e a região limnética desta mesma lagoa, o maior valor de consumo (Mín= -5,261 kg CH_4 d⁻¹). É importante destacar que as distribuições dos dados referentes aos fluxos totais de CH_4 , apesar de estarem numa escala maior, foram mais semelhantes às distribuições dos fluxos ebulitivos em relação à outros fluxos deste gás,

apontando novamente a importância do desprendimento de bolhas para o balanço final de CH_4 .

Nos fluxos totais de CO_2 , além da importância das regiões litorâneas como sítios emissores, estas também contribuíram consideravelmente com o sequestro de carbono atmosférico, principalmente quanto as macrófitas aquáticas. Diante disso, estes fluxos apresentaram uma compensação dos extremos dos processos de entrada e saída, os tornando mais neutros em relação as regiões limnéticas, que pela ausência destes vegetais, apresentaram maiores emissões devido a pequena expressividade dos influxos difusivos. Portanto no balanço final as medianas das regiões limnéticas foram mais elevadas (mediana Comprida LIM = $20,43 \text{ kg CO}_2 \text{ d}^{-1}$; mediana Jurubatiba LIM = $141,60 \text{ kg CO}_2 \text{ d}^{-1}$), cerca de 7 e 1,5 vezes em relação às medianas das regiões litorâneas das lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente. As diferenças significativas entre tratamentos podem ser verificadas no (Quadro 6 e figura 17). O tratamento que apresentou valores de emissão e consumo mais altos no balanço final foi a região litorânea da lagoa Jurubatiba (Emissão MÁX. = $967,80 \text{ kg CO}_2 \text{ d}^{-1}$; Consumo MÁX. = $-1776 \text{ kg CO}_2 \text{ d}^{-1}$). Na lagoa Comprida este balanço foi importante quanto ao maior equilíbrio dos processos de entrada e saída de carbono, no entanto, seu valor central ficou próximo da neutralidade no balanço final, tornando a região limnética mais importante para o saldo final de emissão deste sistema (fonte de carbono). Apesar de uma importância semelhante da região litorânea da lagoa Jurubatiba para o equilíbrio na dinâmica do metabolismo aquático, o saldo final permaneceu positivo, potencializando os valores de emissão ao considerar a soma total (quadro 7).

Na figura 18 além de ter sido considerado os valores extrapolados dos fluxos totais para as duas regiões, também foi respeitado o percentual de ocupação de cada região de acordo com os dados do quadro 5. Assim, foi possível, através de cálculos de médias ponderadas, identificar as variabilidades nos fluxos totais dos gases em todo o sistema. Os valores mínimos e máximos de cada lagoa correspondem aos mesmos apresentados na figura 17, no entanto, o peso de cada valor para a média final foi determinado por suas áreas limnéticas e litorâneas correspondentes.

Em relação ao CH_4 , foi concluído que a lagoa Comprida apresentou um fluxo médio de $2,39$ e amplitude de $-1,03$ à $26,06 \text{ kg CH}_4 \text{ d}^{-1}$, totalizando $5,18 \text{ kg CH}_4 \text{ d}^{-1}$ ao somar os fluxos médios das regiões limnéticas e litorâneas. Já a lagoa Jurubatiba apresentou um fluxo médio

de 10,02 e amplitude de -5,26 à 81,20 kg CH₄ d⁻¹, totalizando 23,66 kg CH₄ d⁻¹ ao somar os fluxos médios das regiões estudadas.

Em relação ao CO₂, foi observado que a lagoa Comprida apresentou um fluxo médio de 8,73 e amplitude de -187,42 à 127,31 kg CO₂ d⁻¹, totalizando 15,01 kg CO₂ d⁻¹ ao somar os fluxos médios de ambas as regiões. Já a lagoa Jurubatiba exibiu um fluxo médio de 33,97 e amplitude de -1776 à 967,81 kg CO₂ d⁻¹, totalizando 18,30 kg CO₂ d⁻¹ ao somar os fluxos médios das duas regiões.

No quadro 7 podem ser observados além dos valores médios e desvios-padrão dos fluxos totais em cada região e lagoa, os seus valores correspondentes em CO₂eq considerando o GWP do CH₄.

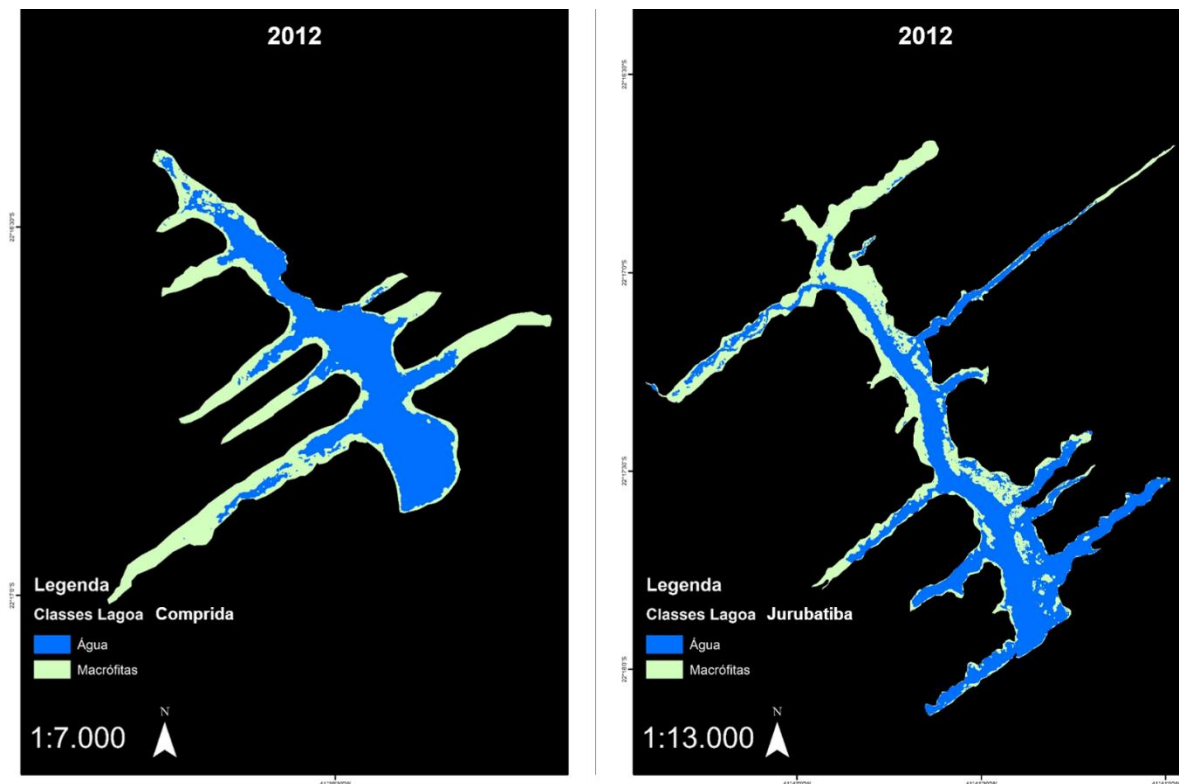


Figura 16. Classificações de áreas ocupadas somente por água (limnética) e áreas ocupadas por macrófitas (litorânea) referentes à uma imagem de satélite obtida de uma cobertura realizada em setembro de 2012 abrangendo as lagoas Comprida (à esquerda) e Jurubatiba (à direita).

Quadro 5. Áreas em km² e percentuais de ocupação das regiões limnéticas (LIM) e litorâneas (LIT) nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) referentes às classificações estabelecidas na imagem de satélite obtida de uma cobertura realizada em setembro de 2012. Ambas as imagens apresentaram índice kappa de 0,773, sendo este responsável por estimar a qualidade visual das imagens obtidas para a classificação, onde valores acima de 0,6 são considerados adequados para se trabalhar.

2012				
Comp	Área (km ²)	0,127	0,108	0,235
	%	54,04	45,96	100
Juru	Área (km ²)	0,476	0,350	0,827
	%	57,61	42,39	100

Quadro 6. Resultados dos testes estatísticos realizados através de Kruskal-Wallis referentes aos fluxos totais de CH₄ e CO₂ (kg d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os valores foram extrapolados pelas áreas totais ocupadas por região limnética (Lim) e litorânea (Lit) obtidas por classificação de imagem de satélite de uma cobertura realizada em setembro de 2012. A identificação da figura e gráfico correspondente, o resultado do teste F (quando aplicável), estatística de Kruskal-Wallis (H) (quando aplicável), o nível de significância (p), o coeficiente de determinação (R²) (quando aplicável) e o n amostral de cada tratamento encontram-se nesta ordem no quadro abaixo. As medianas, quartis e a identificação de quais tratamentos foram significativamente diferentes através do pós teste de Dunn podem ser observadas na figura 17.

Figura 17- Gráfico	ANOVA (Teste F)	Kruskal-Wallis (H)	p	R ²	n-Comp (Lim/Lit)	n-Juru (Lim/Lit)
A	-	22,72	<0,05	-	8/8	12/12
B	-	12,57	<0,05	-	8/8	12/12

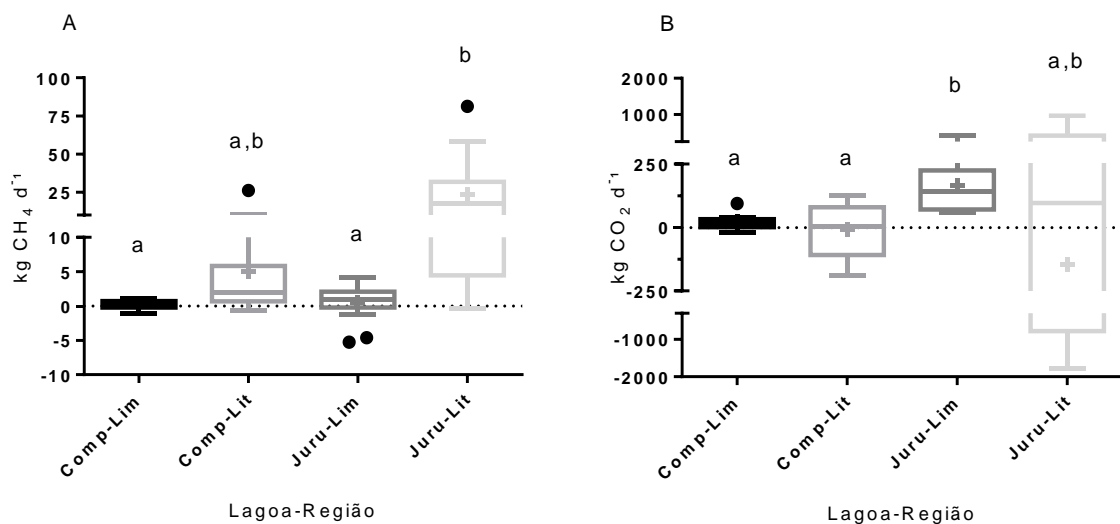


Figura 17. Fluxos totais de CH₄ (A) e CO₂ (B) (kg d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os valores foram extrapolados pelas áreas totais ocupadas por região limnética (Lim) e litorânea (Lit) obtidas por classificação de imagem de satélite de uma cobertura realizada em setembro de 2012. A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média, as barras de erros correspondem ao intervalo interquartil multiplicado por 1,5 (Tukey) e os pontos individuais correspondem à todos os valores acima ou abaixo deste produto. As presenças das letras a e b indicam diferenças significativas entre tratamentos analisados através de ANOVA, seguida de pós teste de Tukey ou Kruskal-Wallis, seguido de pós teste de Dunn (Mais detalhes no quadro 6).

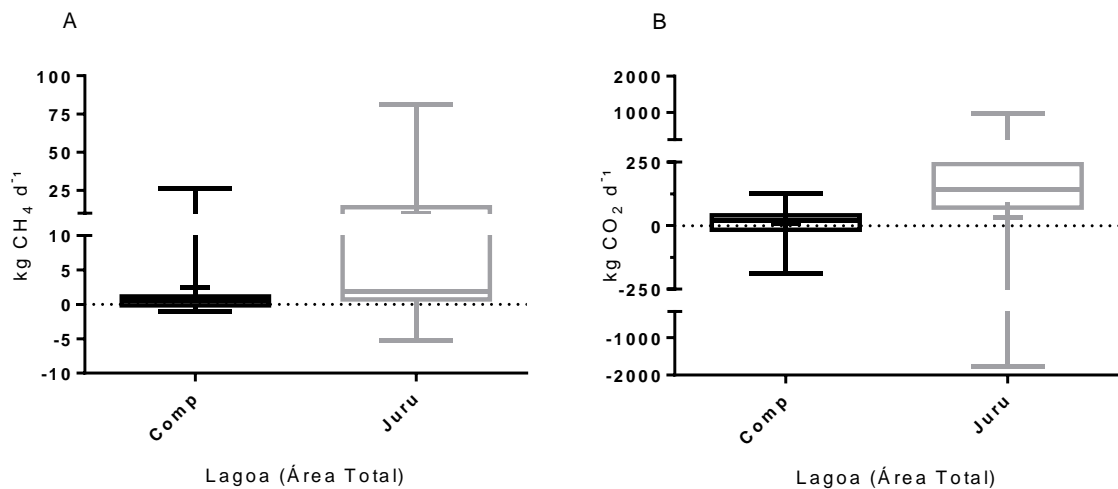


Figura 18. Fluxos totais de CH₄ (A) e CO₂ (B) (kg d⁻¹) amostrados nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os valores foram extrapolados pelas áreas totais dos sistemas obtidas por classificação de imagem de satélite de uma cobertura realizada em setembro de 2012. A barra horizontal corresponde à mediana, os limites da caixa correspondem ao 1° e 2° quartis, o símbolo (+) corresponde à média e as barras de erros correspondem ao valor mínimo e máximo. Nestes gráficos não foram apresentadas letras para diferenças significativas pois a mediana, média e quartis foram calculados à partir de médias aritméticas ponderadas do fluxo total considerando o percentual de contribuição das regiões limnéticas e litorâneas na área total das lagoas estudadas, portanto, não foram obtidas réplicas para análises estatísticas.

Quadro 7. Fluxos totais de CH₄ e CO₂ (kg d⁻¹) e balanço final em *equivalência de CO₂ (CO₂eq) estimados à partir das amostragens de gases conduzidas nas lagoas Comprida (Comp) e Jurubatiba (Juru) ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Os valores foram extrapolados pelas áreas totais da região limnética, litorânea e de todo o sistema (área total). Os valores nas colunas de fluxos totais de CH₄ e CO₂ correspondem às médias, sendo àqueles entre parênteses referentes à amplitude quando divididos pelo símbolo (—), já na coluna de balanço final são apresentados apenas os valores médios.

Lagoas-Regiões	Fluxo total de CH ₄ (kg.CH ₄ .d ⁻¹)	Fluxo total de CO ₂ (kg.CO ₂ .d ⁻¹)	Balanço final (kg.CO ₂ eq.d ⁻¹)
COMP (Área Limnética)	0,14 (-1,02 — 1,13)	20,43 (-21,4 — 94,88)	25,19
COMP (Área Litorânea)	2,01 (-0,6 — 26,06)	2,96 (-187,4 — 127,28)	71,30
COMP (ÁREA TOTAL)	2,15 (-1,02 — 26,06)	23,39 (-187,4 — 127,28)	96,49
JURU (Área Limnética)	0,97 (-5,26 — 4,13)	141,59 (58,06 — 414,09)	174,57
JURU (Área Litorânea)	17,38 (-0,37 — 81,2)	96,31 (-1776,29 — 967,82)	687,23
JURU (ÁREA TOTAL)	18,35 (-5,26 — 81,2)	237,9 (-1776,29 — 967,82)	861,80

*Os valores para conversão em CO₂eq foram adaptados da tabela de potencial de aquecimento global encontrada no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Sendo assim, os valores apresentados no balanço final nesta tabela consideram os valores médios dos fluxos totais de CH₄ multiplicados por 34, somados aos valores médios referentes aos fluxos totais de CO₂.

4.7. AMPLITUDE DAS VARIÁVEIS ABIÓTICAS E CLOROFILA A

As médias e desvios-padrão das variáveis ambientais: temperatura do ar (T. Ar), velocidade máxima do vento (V. Máx), profundidade do disco de Secchi (Secchi), profundidade (Prof.), condutividade elétrica da água superficial (Cond. SUP), condutividade elétrica da água no fundo (Cond. FUN), OD na superfície (OD SUP), OD no fundo (OD FUN), temperatura da água superficial (T. Água SUP), temperatura da água no fundo (T. Água FUN), pH, clo-*a*, COD, N total, P total e carbono orgânico total do sedimento (COT-SED) — mensuradas nas lagoas Comprida (C) e Jurubatiba (J) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 estão presentes no quadro 8 quando consideradas individualmente todas as estações amostrais monitoradas (Figura 4). No quadro 9, as estações (E) foram agrupadas em regiões limnéticas (LIM) e as estações (M) foram agrupadas em regiões litorâneas (LIT), já no quadro 10, as estações E1 e M1, em ambas as lagoas, foram agrupadas formando a porção fundo (FUN) e as estações E5 e M2 na lagoa Comprida e E8 e M3 na Jurubatiba foram agrupadas formando a porção barra (BAR) de cada sistema. Por fim, no quadro 11, foi realizado um último agrupamento considerando todas as estações de amostragem (fora M4) formando uma identidade geral de cada lagoa. É importante destacar que a salinidade apesar de ter sido monitorada em todas as estações amostrais durante às cinco campanhas, foi mensurada sempre com valor de 0,1, portanto, não foi inserida nos quadros de variáveis abióticas pela ausência de modificação temporal e espacial ao longo de todo o estudo.

Dentre as variáveis abióticas amostradas, algumas merecem destaque quanto à variabilidade entre regiões, porções e lagoas. Em uma abordagem considerando as regiões limnéticas e litorâneas, foram observados padrões onde uma variável apresentava CV semelhante e elevado independente da lagoa. Assim foi possível observar algumas das características que distinguem estas regiões independente da lagoa estudada. Entre elas destacam-se a profundidade (cerca de duas vezes maior em áreas limnéticas), P total (cerca de duas vezes mais elevado em regiões litorâneas) e COT-SED (cerca de 4,5 vezes mais elevado em regiões litorâneas, no entanto esta última proporção foi restrita à lagoa Jurubatiba). Em uma abordagem considerando as porções barra e fundo e partindo-se de um critério semelhante à análise realizada entre regiões, destacam-se a velocidade do vento (cerca de 1,5 e 2,5 vezes maiores nas barras das lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente) e OD, independente do perfil vertical amostrado, (cerca de 1,2 e 1,6 mais elevados nas barras das lagoas Jurubatiba e Comprida, respectivamente).

Já em uma abordagem interlagunar as variáveis: Secchi, condutividade, pH, COD e COT-SED destacaram-se, pois se distanciaram consideravelmente além dos limites máximos e mínimos dos desvios-padrão apresentados no quadro 11, convergindo assim, nas principais variáveis (entre àquelas mensuradas) que distinguem estes sistemas.

Quadro 8. Amplitude das variáveis abióticas: temperatura do ar (T. Ar), velocidade máxima do vento (V. Máx), profundidade do disco de Secchi (Secchi), profundidade (Prof.), condutividade da água superficial (Cond. SUP), condutividade da água no fundo (Cond. FUN), OD na superfície (OD SUP), OD no fundo (OD FUN), temperatura da água superficial (T. Água SUP), temperatura da água no fundo (T. Água FUN), pH, clo-a, COD, N total, P total e COT-SED — nas estações de amostragem E1, E5, M1 e M2 na lagoa Comprida (C) e E1, E5, E8, MAC1, MAC2, MAC3 e MAC4 na lagoa Jurubatiba (J) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Em cada linha o valor na célula superior corresponde à média e o valor na célula inferior e entre parênteses ao desvio padrão.

Lagoa	Estação	T. Ar (°C)	V.Máx (m/s)	Secchi (m)	Prof. (m)	Cond. SUP (µs)	Cond. FUN (µs)	OD SUP (mg/L)	OD FUN (mg/L)	T. Água SUP (°C)	T. Água FUN (°C)	pH	Clo-a (ug/mL)	COD (ppm)	N Total (mg/L)	P Total (µg/L)	COT-SED (%PS)
C	E1	26,6 (±3,9)	1,9 (±1,4)	0,3 (±0,1)	1,3 (±0,4)	160,9 (±82,9)	161,6 (±83)	7,2 (±0,8)	6,1 (±2,1)	24,2 (±1,5)	23,8 (±1,5)	4,2 (±0,2)	6,5 (±4,4)	39 (±4,4)	5,84 (±5,7)	25,39 (±15,7)	44,74 (±1,88)
C	E5	26,8 (±3,9)	5,9 (±3,9)	0,3 (±0,1)	2,6 (±0,5)	162,5 (±83,5)	164,7 (±86,3)	7,4 (±1,1)	6,8 (±1,8)	24,9 (±1,1)	23,9 (±1,4)	4,3 (±0,1)	6,79 (±4,5)	37,94 (±4,1)	6,08 (±6,7)	24,01 (±9,5)	34,99 (±5,13)
C	M1	27,2 (±3,4)	1,7 (±2)	0,3 (±0,1)	0,9 (±0,4)	161,7 (±82,9)	161,1 (±81,4)	6,1 (±0,6)	5,1 (±1,1)	24,6 (±2)	23,8 (±1,9)	4,2 (±0,1)	7,07 (±5)	38,58 (±4)	5,94 (±5,6)	37,2 (±13)	49,23 (±0,49)
C	M2	26,6 (±3,2)	3,4 (±1,8)	0,2 (±0)	0,8 (±0,4)	162,9 (±83,4)	163,4 (±85)	7 (±0,6)	6 (±1,2)	25,4 (±2,4)	24 (±1,3)	4,3 (±0,1)	8,02 (±5,8)	38,11 (±3,8)	5,83 (±6)	36,97 (±14,3)	34,67 (±11,72)
J	E1	27,3 (±2,4)	3,2 (±1,6)	1,5 (±0,7)	2,6 (±0,6)	401,2 (±93)	386,3 (±180,3)	4,8 (±0,9)	3,6 (±1,3)	24,3 (±3)	22,8 (±2,3)	6,5 (±0,2)	3,64 (±2,2)	6,96 (±1,8)	2,59 (±3,1)	12,69 (±8,4)	3,76 (±6,13)
J	E5	27,5 (±2,7)	4 (±1,3)	1,2 (±0,6)	3,3 (±0,7)	354,3 (±41,8)	350,4 (±44,5)	5 (±1,6)	4,1 (±2,3)	24,3 (±2,4)	23,6 (±2,5)	6,3 (±0,2)	4,31 (±1,5)	7,78 (±2,2)	2,43 (±2,5)	16,74 (±10,3)	9,2 (±6,62)
J	E8	26,9 (±2,1)	5,1 (±1,3)	1,2 (±0,6)	4,6 (±0,4)	397,4 (±88,2)	381,7 (±118,1)	5,8 (±1,5)	5 (±1,7)	24,2 (±2,1)	23,3 (±1,9)	6,5 (±0,2)	2,39 (±2,8)	8,13 (±2)	3,55 (±4,4)	17,8 (±3,6)	0,51 (±0,43)
J	M1	28,2 (±2)	2,9 (±1,9)	0,9 (±0,4)	1,3 (±0,4)	406 (±94,9)	398,4 (±99,5)	3,9 (±1,6)	3,1 (±1,6)	25 (±2,9)	23,8 (±2,5)	6,4 (±0,2)	5,65 (±1,6)	6,85 (±1,7)	2,75 (±3,3)	33,02 (±36,2)	17,75 (±9,15)
J	M2	28 (±2,6)	3 (±2,2)	1 (±0,5)	1,9 (±0,9)	394,5 (±90,9)	373,6 (±131,6)	4,9 (±1,5)	3,8 (±1,9)	24,6 (±2,5)	23,8 (±2,6)	6,4 (±0,2)	6,91 (±2,6)	7,67 (±2,1)	2,58 (±2,9)	17,16 (±10,3)	17,27 (±3,68)
J	M3	26,8 (±2)	3,1 (±1,6)	1 (±0,3)	1,5 (±0,6)	401,5 (±96,7)	399,4 (±87,6)	6,2 (±1,2)	5,2 (±2)	24,7 (±2,3)	24 (±2,4)	6,6 (±0,3)	3,77 (±1,5)	8,2 (±1,9)	3,72 (±4,3)	15,65 (±4,7)	23,49 (±3,47)
J	M4	26,3 (±2,1)	3,4 (±1,3)	1 (±0,2)	1,8 (±0,7)	397,5 (±96,6)	399,6 (±84,6)	6,1 (±1,4)	5,5 (±1,7)	24,6 (±2,5)	23,9 (±2,3)	6,6 (±0,2)	4,54 (±5,8)	8,07 (±1,9)	2,89 (±3,4)	21,15 (±11,3)	19,98 (±7,39)

Quadro 9. Amplitude das variáveis abióticas: temperatura do ar (T. Ar), velocidade máxima do vento (V. Máx), profundidade do disco de Secchi (Secchi), profundidade (Prof.), condutividade da água superficial (Cond. SUP), condutividade da água no fundo (Cond. FUN), OD na superfície (OD SUP), OD no fundo (OD FUN), temperatura da água superficial (T. Água SUP), temperatura da água no fundo (T. Água FUN), pH, clo-a, COD, N total, P total e COT-SED — nas estações de amostragem (E) agrupadas em regiões limnéticas (LIM) e estações de amostragem (M) agrupadas em regiões litorâneas (LIT) nas lagoas costeiras Comprida (C) e Jurubatiba (J). Os dados foram gerados ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Em cada linha o valor na célula superior corresponde à média e o valor na célula inferior e entre parênteses ao desvio padrão.

Lagoa	Região	T. Ar (°C)	V.Máx (m/s)	Secchi (m)	Prof. (m)	Cond. SUP (µs)	Cond. FUN (µs)	OD SUP (mg/L)	OD FUN (mg/L)	T. Água SUP (°C)	T. Água FUN (°C)	pH	Clo-a (ug/mL)	COD (ppm)	N Total (mg/L)	P Total (µg/L)	COT-SED (%PS)
C	LIM	26,7 (±3,7)	3,9 (±3,5)	0,3 (±0,1)	2 (±0,8)	161,7 (±78,4)	163,2 (±79,8)	7,3 (±1)	6,5 (±1,9)	24,6 (±1,3)	23,8 (±1,4)	4,2 (±0,1)	6,65 (±4,1)	38,47 (±4,1)	5,96 (±5,9)	24,69 (±12,3)	39,87 (±6,32)
C	LIT	26,9 (±3,2)	2,6 (±1,9)	0,3 (±0,1)	0,8 (±0,4)	162,3 (±78,4)	162,2 (±78,5)	6,6 (±0,7)	5,5 (±1,2)	25 (±2,1)	23,9 (±1,5)	4,2 (±0,1)	7,54 (±5,1)	38,35 (±3,7)	5,89 (±5,5)	37,08 (±12,9)	41,95 (±10,93)
J	LIM	27,2 (±2,3)	4,1 (±1,5)	1,3 (±0,6)	3,5 (±1)	384,3 (±75,3)	372,8 (±118,8)	5,2 (±1,3)	4,3 (±1,8)	24,3 (±2,4)	23,2 (±2,1)	6,4 (±0,2)	3,45 (±2,2)	7,62 (±1,9)	2,86 (±3,2)	15,74 (±7,7)	4,49 (±6,02)
J	LIT	27,3 (±2,2)	3,1 (±1,6)	1 (±0,3)	1,6 (±0,7)	399,9 (±87,1)	392,8 (±94,8)	5,3 (±1,7)	4,4 (±1,9)	24,7 (±2,4)	23,9 (±2,2)	6,5 (±0,2)	5,26 (±3)	7,7 (±1,8)	2,98 (±3,3)	21,74 (±19,4)	19,62 (±6,26)

Quadro 10. Amplitude das variáveis abióticas: temperatura do ar (T. Ar), velocidade máxima do vento (V. Máx), profundidade do disco de Secchi (Secchi), profundidade (Prof.), condutividade da água superficial (Cond. SUP), condutividade da água no fundo (Cond. FUN), OD na superfície (OD SUP), OD no fundo (OD FUN), temperatura da água superficial (T. Água SUP), temperatura da água no fundo (T. Água FUN), pH, clo-a, COD, N total, P total e COT-SED — nas estações de amostragem (E1 e M1) agrupadas na porção fundo (FUN) em ambas as lagoas e estações de amostragem (E5 e MAC2) na lagoa Comprida (C) e (E8 e MAC3) na lagoa Jurubatiba (J) agrupadas na porção barra (BAR). Os dados foram gerados ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Em cada linha o valor na célula superior corresponde à média e o valor na célula inferior e entre parênteses ao desvio padrão.

Lagoa	Porção	T. Ar (°C)	V.Máx (m/s)	Secchi (m)	Prof. (m)	Cond. SUP (µs)	Cond. FUN (µs)	OD SUP (mg/L)	OD FUN (mg/L)	T. Água SUP (°C)	T. Água FUN (°C)	pH	Clo-a (ug/mL)	COD (ppm)	N Total (mg/L)	P Total (µg/L)	COT-SED (%PS)
C	BAR	26,7 (±3,4)	4,7 (±3,1)	0,3 (±0,1)	1,7 (±1,1)	162,7 (±78,7)	164,1 (±80,8)	7,2 (±0,9)	6,4 (±1,5)	25,2 (±1,8)	24 (±1,3)	4,3 (±0,1)	7,4 (±4,8)	38,02 (±3,7)	5,95 (±6)	30,48 (±13,3)	34,83 (±8,38)
C	FUN	26,9 (±3,5)	1,8 (±1,6)	0,3 (±0,1)	1,1 (±0,4)	161,3 (±78,2)	161,4 (±77,5)	6,6 (±0,9)	5,6 (±1,7)	24,4 (±1,7)	23,8 (±1,6)	4,2 (±0,1)	6,79 (±4,4)	38,79 (±4)	5,89 (±5,3)	31,3 (±15)	46,99 (±2,72)
J	BAR	26,7 (±1,9)	3,9 (±1,5)	1,1 (±0,4)	2,6 (±1,5)	398,8 (±86,9)	393,6 (±91,1)	6,1 (±1,3)	5,2 (±1,7)	24,5 (±2,2)	23,7 (±2)	6,6 (±0,2)	3,48 (±3,3)	8,13 (±1,8)	3,39 (±3,8)	18,2 (±7,2)	14,66 (±11,39)
J	FUN	27,8 (±2,1)	3,1 (±1,6)	1,2 (±0,6)	2 (±0,9)	403,6 (±88,6)	392,3 (±137,5)	4,4 (±1,4)	3,4 (±1,4)	24,7 (±2,8)	23,3 (±2,4)	6,4 (±0,2)	4,64 (±2,1)	6,91 (±1,6)	2,67 (±3)	22,85 (±27)	10,76 (±10,39)

Quadro 11. Amplitude das variáveis abióticas: temperatura do ar (T. Ar), velocidade máxima do vento (V. Máx), profundidade do disco de Secchi (Secchi), profundidade (Prof.), condutividade da água superficial (Cond. SUP), condutividade da água no fundo (Cond. FUN), OD na superfície (OD SUP), OD no fundo (OD FUN), temperatura da água superficial (T. Água SUP), temperatura da água no fundo (T. Água FUN), pH, clo-a, COD, N total, P total e COT-SED — nas estações de amostragem de cada lagoa agrupadas em Comprida (C) e Jurubatiba (J) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. Em cada linha o valor na célula superior corresponde à média e o valor na célula inferior e entre parênteses ao desvio padrão.

Lagoa	T. Ar (°C)	V.Máx (m/s)	Secchi (m)	Prof. (m)	Cond. SUP (µs)	Cond. FUN (µs)	OD SUP (mg/L)	OD FUN (mg/L)	T. Água SUP (°C)	T. Água FUN (°C)	pH	Clo-a ug/mL	COD ppm	N Total (mg/L)	P Total (µg/L)	COT-SED (%PS)
C	26,8 (±3,3)	3,2 (±2,8)	0,3 (±0,1)	1,4 (±0,9)	162 (±76,3)	162,7 (±77)	6,9 (±0,9)	6 (±1,6)	24,8 (±1,7)	23,9 (±1,4)	4,2 (±0,1)	7,095 (±4,48)	38,408 (±3,78)	5,922 (±5,51)	30,88 (±13,81)	40,91 (±8,7)
J	27,3 (±2,2)	3,5 (±1,6)	1,1 (±0,5)	2,4 (±1,3)	393,2 (±81,5)	384,2 (±104,6)	5,3 (±1,5)	4,3 (±1,8)	24,5 (±2,3)	23,6 (±2,2)	6,5 (±0,2)	4,456 (±2,76)	7,665 (±1,84)	2,93 (±3,18)	19,17 (±15,64)	13,14 (±9,7)

4.8. ANÁLISE DE ORDENAÇÃO DAS VARIÁVEIS ABIÓTICAS E CLOROFILA A

Os resultados das correlações, gerados previamente à síntese dos componentes principais, demonstraram altas correlações positivas entre os dois perfis mensurados (superfície e fundo) quando consideradas as variáveis abióticas temperatura e condutividade e altas correlações negativas entre as variáveis pH e COD (Tabela 5). Diante disso, os dados referentes à temperatura e condutividade mensuradas no fundo e à variável pH, foram excluídos da PCA para dados abióticos gerada posteriormente.

A ordenação das variáveis abióticas: temperatura do ar, velocidade máxima do vento, profundidade do disco de Secchi, profundidade, condutividade elétrica da água superficial, OD da água superficial, OD no fundo, temperatura da água superficial, COD, COT-SED, N total, P total e Clo-*a* — das lagoas costeiras Comprida e Jurubatiba mensuradas nas campanhas de 2012 e 2013 e obtida através da PCA-1 foi considerada relevante para os critérios do Scree Plot e Autovalores > 1 para os eixos 1, 2, 3 e 4 (Figura 26 e tabela 1). Os eixos de 1 à 4 explicaram 74,9% da variabilidade total dos dados. Os autovetores das variáveis abióticas indicaram condutividade da água superficial e COD como as variáveis mais relevantes para o eixo 1, temperatura da água superficial e OD no fundo como as variáveis principais do eixo 2, N-Total e Clo-*a* como as mais importantes do eixo 3 e temperatura do ar como a principal do eixo 4 (Tabela 2 e figura 19).

No diagrama da PCA-1 (Figura 19) os símbolos referem-se às estações de amostragem e os agrupamentos foram formados, na perspectiva demonstrada, quanto ao eixo 1 que separa estações da lagoa Comprida das estações da lagoa Jurubatiba e o eixo 2 que separa estações limnéticas da porção barra (Comp E5 e Juru E8) de estações litorâneas da porção fundo (Comp M1 e Juru M1), sendo estas zonações regidas pelas variáveis mais relevantes dos eixos citados acima.

Tabela 1. Números dos eixos, autovalores, percentuais de variação explicada e percentuais acumulados dos componentes principais da PCA-1 referente às variáveis abióticas — temperatura do ar, velocidade máxima do vento, profundidade do disco de Secchi, profundidade, condutividade elétrica da água superficial, OD da água superficial, OD da água no fundo, temperatura da água superficial, COD, COT-SED, N total, P total e Clo-a — medidas em todas as estações de amostragem da lagoa Comprida e Jurubatiba ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013.

No.	Autovalor	%	20	40	60	80	% Acumulado
1	4,3928	33,791					33,791
2	2,8496	21,920					55,711
3	1,4535	11,181					66,892
4	1,0428	8,022					74,914
5	0,7646	5,881					80,795
6	0,5968	4,591					85,386
7	0,5260	4,046					89,432
8	0,4320	3,323					92,756
9	0,3294	2,533					95,289
10	0,2422	1,863					97,152
11	0,1626	1,251					98,403
12	0,1135	0,873					99,275
13	0,0942	0,725					100,000

Tabela 2. Autovetores da PCA-1 referente às variáveis abióticas — temperatura do ar, velocidade máxima do vento, profundidade do disco de Secchi, profundidade, condutividade elétrica da água superficial, OD da água superficial, OD da água no fundo, temperatura da água superficial, COD, COT-SED, N total, P total e Clo-a — medidas em todas as estações de amostragem da lagoa Comprida e Jurubatiba ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013.

	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4
Temperatura do ar	-0,13698	-0,30195	0,10900	0,60338
Velocidade do vento (max)	-0,14120	0,34327	0,29072	-0,04449
Secchi	-0,40924	0,09111	0,18644	-0,04916
Profundidade	-0,28076	0,26721	-0,31194	0,10736
Condutividade SUP	-0,41239	-0,03613	0,15767	-0,19013
OD SUP	0,26022	0,34695	0,34513	0,26300
OD FUN	0,22154	0,41018	0,32581	0,11473
Temperatura da água SUP	-0,02475	-0,41665	0,18695	0,25346
COD	0,43662	0,01110	-0,00800	0,19700
COT	0,30629	-0,25722	0,21373	-0,01206
N total	0,23386	0,31207	-0,43067	-0,03992
P total	0,23465	-0,24107	-0,33331	-0,18087
Clo-a	0,18256	-0,16119	0,37966	-0,60334

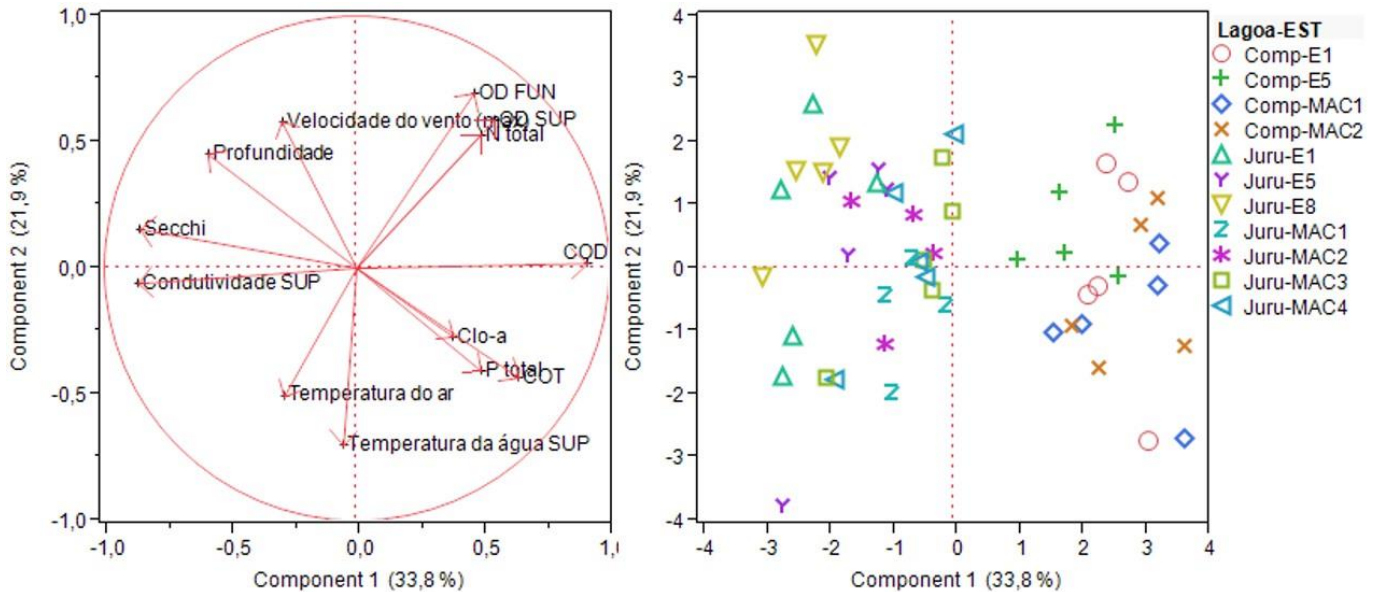


Figura 19. Diagrama da PCA-1 referente às variáveis abióticas — temperatura do ar, velocidade máxima do vento, profundidade do disco de Secchi, profundidade, condutividade elétrica da água superficial, OD da água superficial, OD da água no fundo, temperatura da água superficial, COD, COT-SED, N total, P total e Clo-a — medidas em todas as estações de amostragem da lagoa Comprida e Jurubatiba ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013.

4.9. INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS ABIÓTICAS NA MAGNITUDE DOS FLUXOS TOTAIS DE CH₄ E CO₂

Neste tópico, o termo “análise” faz referência às quatro distintas gerações de n modelos que melhor explicam as relações de fluxos totais de CH₄ e CO₂ com as variáveis abióticas e são representadas por cada quadro (Quadros 12 à 15). Já o termo “modelo” faz referência às variáveis abióticas propriamente ditas ou ao conjunto delas que apresentam maior relevância para os fluxos de gases no critério de seleção de Akaike e são representadas pelas linhas de cada quadro.

Os modelos selecionados pelo critério de Akaike contemplam todas as variáveis selecionadas pela PCA-1 somadas às variáveis profundidade e COT-SED. Nas duas análises (restritas à lagoa Comprida e Jurubatiba, respectivamente) considerando os fluxos totais de CH₄ (Quadros 12 e 13, respectivamente), apenas OD não foi incluído entre os modelos acima da linha de corte ($\Delta AICc = 2$). No geral, houve uma frequência clara dos modelos incluindo profundidade e COT-SED sendo selecionados nestas duas análises, além disso, ambas as variáveis apresentaram valores baixos de $\Delta AICc$ (maior informação e força de explicação), sendo profundidade correlacionada negativamente e COT-SED positivamente aos fluxos totais de CH₄. Já nas duas análises considerando os fluxos totais de CO₂ (Quadros 14 e 15), todas as variáveis foram representadas em pelo menos um modelo, destacando-se COD que foi

selecionada nas duas análises, apresentando correlação positiva ou negativa dependendo da lagoa analisada.

Ao considerar os fluxos totais dos dois gases, COD ou COT-SED novamente foram as variáveis com maiores destaques, estando presentes em 60% dos melhores modelos ($\Delta AICc < 2$) e em todas as análises. Diante disso, pôde ser concluído que estas variáveis, mesmo não formando sempre os modelos com as maiores forças de explicação, apresentaram grande relevância nos processos que regulam os fluxos totais de CH_4 e CO_2 nas lagoas costeiras estudadas.

*Quadro 12. Modelos selecionados (*variáveis abióticas) pelo critério de Akaike para os fluxos totais de CH_4 considerando apenas os dados mensurados na lagoa Comprida ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. A linha tracejada representa a linha de corte, onde o $\Delta AICc$ está dois pontos acima do valor do melhor modelo.*

Modelo	Código	AICc	$\Delta AICc$	Probab.	Wi	W1/Wi	R ² Ajustado	Coef.
Profundidade	8	180,82	0,000 0	1,0000	0,117 6		0,1468	-
COT-SED	9	181,64	0,819 5	0,6638	0,078 1	1,5064	0,102	+
OD	3	183,28	2,459 6	0,2923	0,034 4	3,4206	0,005	-

**Somente as variáveis abióticas selecionadas pela PCA-1 (Condutividade da água superficial, COD, OD no fundo, temperatura da água superficial, Clo-a, N-Total e temperatura do ar) somadas às variáveis profundidade e COT-SED foram utilizadas para a geração de modelos através do critério de Akaike.*

*Quadro 13. Modelos selecionados (*variáveis abióticas) pelo critério de Akaike para os fluxos totais de CH_4 considerando apenas os dados mensurados na lagoa Jurubatiba ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. A linha tracejada representa a linha de corte, onde o $\Delta AICc$ está dois pontos acima do valor do melhor modelo.*

Modelo	Código	AICc	$\Delta AICc$	Probab.	Wi	W1/Wi	R ² Ajustado	Coef.
COD Condutividade COT-SED	52	296,34	0,0000	1,0000	0,0870		0,5457	+ + +
COD Condutividade Profundidade COT-SED	150	297,62	1,2907	0,5245	0,0457	1,9067	0,5583	+ + - +
COD Condutividade T-Água COT-SED	140	298,57	2,2304	0,3279	0,0285	3,0501	0,5432	+ + - +

**Somente as variáveis abióticas selecionadas pela PCA-1 (Condutividade da água superficial, COD, OD no fundo, temperatura da água superficial, Clo-a, N-Total e temperatura do ar) somadas às variáveis profundidade e COT-SED foram utilizadas para a geração de modelos através do critério de Akaike.*

Quadro 14. Modelos selecionados (*variáveis abióticas) pelo critério de Akaike para os fluxos totais de CO₂ considerando apenas os dados mensurados na lagoa Comprida ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. A linha tracejada representa a linha de corte, onde o $\Delta AICc$ está dois pontos acima do valor do melhor modelo.

Modelo	Código	AICc	$\Delta AICc$	Probab.	Wi	W1/Wi	R ² Ajustado	Coef.
COD								-
Condutividade	49	252,78	0,0000	1,0000	0,1582		0,4381	+
N-Total								+
COD								-
Condutividade	132	254,16	1,3810	0,5013	0,0793	1,9947	0,5212	+
OD								-
N-Total								+
T-Ar	7	254,68	1,9021	0,3863	0,0611	2,5884	0,1056	+
COD	1	255,21	2,4326	0,2963	0,0469	3,3747	0,0754	-

*Somente as variáveis abióticas selecionadas pela PCA-1 (Condutividade da água superficial, COD, OD no fundo, temperatura da água superficial, Clo-a, N-Total e temperatura do ar) somadas às variáveis profundidade e COT-SED foram utilizadas para a geração de modelos através do critério de Akaike.

Quadro 15. Modelos selecionados (*variáveis abióticas) pelo critério de Akaike para os fluxos totais de CO₂ considerando apenas os dados mensurados na lagoa Jurubatiba ao longo de quatro campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. A linha tracejada representa a linha de corte, onde o $\Delta AICc$ está dois pontos acima do valor do melhor modelo.

Modelo	Código	AICc	$\Delta AICc$	Probab.	Wi	W1/Wi	R ² Ajustado	Coef.
Clo-a	5	490,67	0,0000	1,0000	0,0887		0,2025	-
Clo-a	39	491,98	1,3040	0,5210	0,0462	1,9193	0,2120	-
COT-SED								+
COD	13	492,14	1,4717	0,4791	0,0425	2,0873	0,2073	+
Clo-a								-
Clo-a	38	492,23	1,5627	0,4578	0,0406	2,1844	0,2047	-
Profundidade								-
T-Água	31	492,44	1,7705	0,4126	0,0366	2,4235	0,1988	+
Clo-a								-
Clo-a	36	492,99	2,3170	0,3139	0,0278	3,1852	0,1830	-
N-Total								-

*Somente as variáveis abióticas selecionadas pela PCA-1 (Condutividade da água superficial, COD, OD no fundo, temperatura da água superficial, Clo-a, N-Total e temperatura do ar) somadas às variáveis profundidade e COT-SED foram utilizadas para a geração de modelos através do critério de Akaike.

4.10. ANÁLISE DE ORDENAÇÃO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Os resultados das correlações, gerados previamente à síntese dos componentes principais, demonstraram, estatisticamente, altas correlações positivas entre as variáveis que apresentavam dados com valores médios, mínimos e máximos como a velocidade do vento, pressão atmosférica e temperatura do ar (Tabela 6). Diante disso, apenas os dados referentes aos valores médios foram mantidos e empregados na PCA gerada posteriormente para dados meteorológicos.

A ordenação dos dados das variáveis meteorológicas: precipitação, velocidade média do vento, direção do vento, pressão média da atmosfera, temperatura média do ar, umidade relativa e radiação — extraídos da estação meteorológica automática A620 (INMET) referentes às campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 e obtida através da PCA-2 foi considerada relevante para os critérios do Scree Plot e Autovalores > 1 para os eixos 1 e 2 (Figura 26 e tabela 3). Os eixos 1 e 2 explicaram 66,4% da variabilidade total dos dados. Os autovetores das variáveis meteorológicas indicaram velocidade média do vento e direção do vento como as variáveis principais para o eixo 1 e precipitação e pressão média da atmosfera como as mais relevantes do eixo 2 (Tabela 4 e figura 20).

No diagrama da PCA-2 (Figura 20) os símbolos referem-se às campanhas e os agrupamentos foram formados principalmente quanto ao eixo 1 que separa os meses nov/12 (C3) e ago/13 (C5) (meses do ano mais próximo do período regionalmente conhecido como “estação dos ventos”) dos demais meses (mais distantes deste período) e o eixo 2 que separa os meses nov/12 (C3) e abr/13 (C4) (mais próximos do período chuvoso) dos demais meses (período de estiagem).

Tabela 3. Números dos eixos, autovalores, percentuais de variação explicada e percentuais acumulados dos componentes principais da PCA-2 referentes às variáveis meteorológicas — Precipitação, velocidade média do vento, direção do vento, pressão média da atmosfera, temperatura média do ar, umidade relativa e radiação — obtidas da estação meteorológica automática A620-INMET nos dias de amostragem de fluxo de gases ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013.







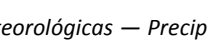
No.	Autovalor	%	20	40	60	80	% Acumulado
1	2,3781	33,973					33,973
2	2,2724	32,462					66,436
3	0,9404	13,434					79,870
4	0,5967	8,524					88,394
5	0,4876	6,966					95,360
6	0,2628	3,754					99,114
7	0,0620	0,886					100,000

Tabela 4. Autovetores da PCA-2 referentes às variáveis meteorológicas — Precipitação, velocidade média do vento, direção do vento, pressão média da atmosfera, temperatura média do ar, umidade relativa e radiação — obtidas da estação meteorológica automática A620-INMET nos dias de amostragem de fluxo de gases ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013.

	Prin1	Prin2
Precipitação	0,14491	0,49036
Vento Veloc.Méd.	-0,46779	-0,04861
Vento Direção	0,53008	-0,13833
Pressão ATM Méd.	0,21548	-0,58201
Temp. Ar Méd.	-0,27507	0,48864
Umidade Relativa	0,44521	0,30519
Radiação	-0,39859	-0,25961

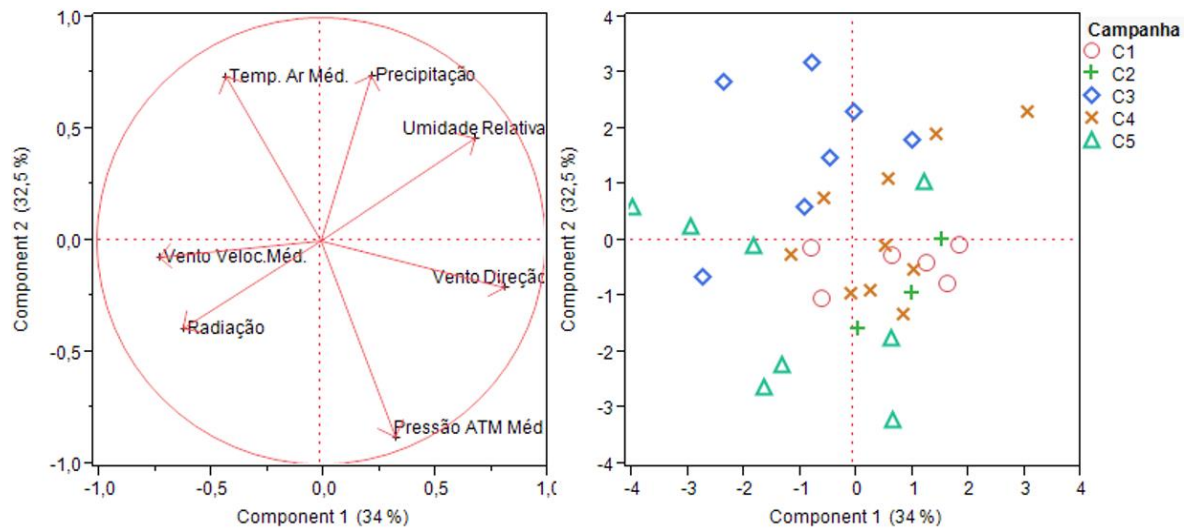


Figura 20. Diagrama da PCA-2 referentes às variáveis meteorológicas — Precipitação, velocidade média do vento, direção do vento, pressão média da atmosfera, temperatura média do ar, umidade relativa e radiação — obtidas da estação meteorológica automática A620-INMET nos dias de amostragem de fluxo de gases ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013. C1, C2, C3, C4 e C5 representam, respectivamente, às cinco campanhas realizadas nos meses de junho/12, agosto/12, novembro/12, abril/13 e agosto/13.

4.11. VARIABILIDADE TEMPORAL DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E FLUXOS TOTAIS DE CH₄ E CO₂

Nesta abordagem foi considerada a média das variáveis meteorológicas selecionadas pela PCA-2: Pressão atmosférica, precipitação, velocidade média e direção do vento ao longo dos dias de coleta de cada campanha (C1-C5) e as médias e desvios-padrão, por campanha, dos fluxos totais de CH₄ e CO₂ (Figura 21) em cada sistema estudado.

No presente trabalho, os dados meteorológicos foram tratados descritivamente com o objetivo de inferir possíveis relações entre o efeito sazonal das variáveis meteorológicas e a magnitude dos fluxos totais (desconsiderando testes estatísticos). Os dados apresentaram baixa variabilidade entre dias da mesma campanha, no entanto, ao comparar as médias entre campanhas foi observada alta variabilidade e possíveis relações com as amplitudes dos fluxos.

Nas campanhas de nov/12 (C3) e abr/13 (C4), que correspondem, respectivamente, aos meses mais próximos do início e fim do período chuvoso na região, foram observadas médias mais elevadas e alta amplitude nos desvios-padrão nos fluxos totais de CH₄ em ambas as lagoas (Figura 21). Já os fluxos totais de CO₂ mostraram padrões de sequestro na primeira campanha em jun/12 (C1) nas duas lagoas e depois dividiram-se em duas características distintas dependendo da lagoa estudada. A lagoa Comprida apresentou uma linearidade

quanto ao aumento dos fluxos ao longo das campanhas, independente da sazonalidade, enquanto a lagoa Jurubatiba de sequestradora passou à emissora de CO₂ no período chuvoso e na última campanha chegou próximo à neutralidade no balanço entre emissão e consumo, sendo até, próxima daquela demonstrada na primeira campanha.

Os dados de pressão atmosférica e precipitação foram antagônicos (Figura 21) e se apresentaram com baixa variabilidade, exceto em nov/12 (C3) (período chuvoso), onde a pressão atmosférica atingiu a menor média (1012 hPa) e a precipitação a maior média (8,34mm) e acumulado de 58mm em 7 dias. A velocidade média do vento (Figura 21) variou pouco entre as campanhas C1-C4, no entanto, se elevou na última campanha em ago/13 (C5), que compreendeu o fim de agosto e o início de setembro de 2013 (período típico de fortes ventos na região). Em relação à direção do vento (Figura 21) destacam-se as campanhas realizadas em nov/12 (C3) e ago/13 (C5) onde as médias foram, respectivamente, de 104° e 109° (vento leste sudeste) correspondendo às campanhas onde houveram os maiores acúmulos de chuva (58 e 11mm).

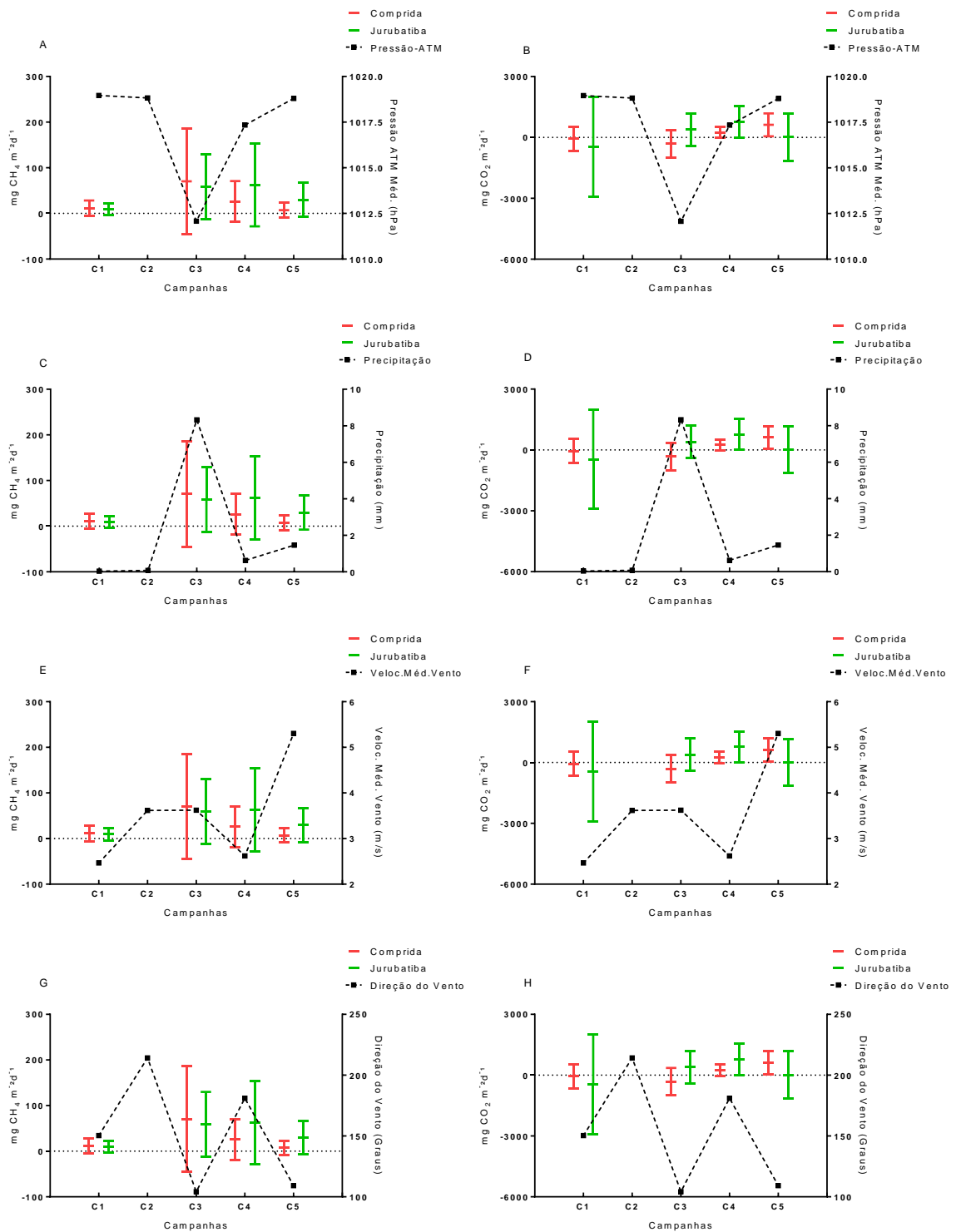


Figura 21. Variabilidade temporal das variáveis meteorológicas selecionadas pela PCA-2 (pressão atmosférica, precipitação, velocidade média do vento e direção do vento) e dos fluxos totais de CH₄ e CO₂ (mg m⁻² d⁻¹) ao longo de cinco campanhas realizadas nos anos de 2012 e 2013 nas lagoas costeiras Comprida e Jurubatiba. Os gráficos A e B correspondem às médias de pressão atmosférica e de fluxos totais de CH₄ e as médias de pressão atmosférica e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente; os gráficos C e D correspondem às médias de precipitação e de fluxos totais de CH₄ e as médias de precipitação e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente; os gráficos E e F correspondem às médias de velocidade do vento e de fluxos totais de CH₄ e as médias de velocidade do vento e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente; os gráficos G e H correspondem às médias de direção do vento e de fluxos totais de CH₄ e as médias de direção do vento e dos fluxos totais de CO₂, respectivamente. As barras horizontais coloridas e centralizadas correspondem às médias dos fluxos de gases da lagoa Comprida (vermelho) e Jurubatiba (verde) e as barras de erros coloridas correspondem aos desvios-padrão dos mesmos. Os quadrados pretos

correspondem às médias das variáveis meteorológicas. C1, C2, C3, C4 e C5 representam, respectivamente, às cinco campanhas realizadas no meses de jun/12, ago/12, nov/12, abr/13 e ago/13.

4.12. VARIABILIDADE TEMPORAL DOS FLUXOS TOTAIS DE CH₄ E CO₂ CONSIDERANDO AS ÁREAS DAS LAGOAS COMPRIDA E JURUBATIBA REFERENTES ÀS CLASSIFICAÇÕES OBTIDAS DAS IMAGENS DE 2008 E 2011

Considerando os dados de fluxos totais gerados nas campanhas de 2012 e 2013 em conjunto com as estimativas de ocupação de áreas limnéticas e litorâneas referentes às coberturas de 2008 e 2011-2012 (Figuras 22 e 23; quadro 16) , foi estimado que em períodos pós grandes eventos de chuva, como 2008 (INMET), em que as áreas das lagoas Comprida e Jurubatiba apresentaram, respectivamente, somente cerca de 32% e 39% de suas regiões cobertas por macrófitas, os valores de emissão de carbono seriam mais baixos em relação à todas as outras estimativas ao somar as duas regiões estudadas. A lagoa Comprida seria responsável pela emissão de 1,67 kgCH₄ d⁻¹ e 29,2 kgCO₂ d⁻¹, totalizando 85,98 kgCO₂eq. d⁻¹ e a lagoa Jurubatiba por 16,81 kgCH₄ d⁻¹ e 236,61 kgCO₂ d⁻¹ que somados corresponderiam ao total de 807,85 kgCO₂eq. d⁻¹.

Já em 2011, apesar de possuímos apenas os dados referentes à área da lagoa Jurubatiba, concluímos que houve pequena retração da área total (cerca de 5%) em relação à 2008, após um forte período de estiagem (INMET). Contudo, houve grande expansão da colonização de macrófitas (56% da área total em 2011) e ao estimar o total emitido a partir dos nossos dados, encontramos valores de emissão de 22,15 kgCH₄ d⁻¹ e 219,6 kgCO₂ d⁻¹, totalizando os valores mais elevados em CO₂ equivalente (972,7 kgCO₂eq. d⁻¹) entre nossas três estimativas, devido a elevada emissão do CH₄ em regiões litorâneas mais amplas e ao potencial de retenção de calor deste gás.

É fundamental destacar que estas estimativas são conservativas e não consideramos dois aspectos importantes: a) o potencial de emissão de regiões que ora foram litorâneas e passaram a ser limnéticas devido ao aumento do nível da água (estimativas de 2008); b) o aumento das áreas colonizadas por macrófitas devido à diminuição da coluna d'água (estimativas de 2011). Estes aspectos fatalmente estimulam processos de emissão e sequestro destes gases, sendo assim, nossas estimativas apesar de terem sido conservativas, foram plausíveis diante de nossos dados terem sido gerados ao longo de modificações encontradas em um ciclo sazonal (um ano de coleta). Deste modo, acreditamos que os dados formaram

uma compilação do que pode ocorrer com as emissões de CH₄ e CO₂ em períodos de chuva e estiagem, mesmo que os períodos estudados (2012-2013) tenham refletido a resposta do ecossistema pós forte evento de chuvas (2011-2012).

Quadro 16. Áreas em km² e percentuais de ocupação das regiões limnéticas e litorâneas nas lagoas Comprida e Jurubatiba referentes às classificações estabelecidas em três imagens de satélites obtidas de uma cobertura realizada em abril de 2008, um mosaico de dezembro de 2011 à fevereiro de 2012 e uma cobertura em setembro de 2012. As imagens de 2008 e 2012 apresentaram índice kappa acima de 0,7 e o mosaico de 2011 abaixo de 0,6, sendo este utilizado como justificativa para a qualidade visual adequada da imagem quando encontra-se acima de 0,6.

		2008			2011			2012		
		LIM	LIT	Total	LIM	LIT	Total	LIM	LIT	Total
C	Área (km ²)	0,168	0,080	0,248	-	-	-	0,127	0,108	0,235
	%	67,72	32,28	100	-	-	-	54,04	45,96	100
J	Área (km ²)	0,501	0,318	0,819	0,339	0,433	0,772	0,476	0,350	0,827
	%	61,14	38,86	100	43,93	56,07	100	57,61	42,39	100

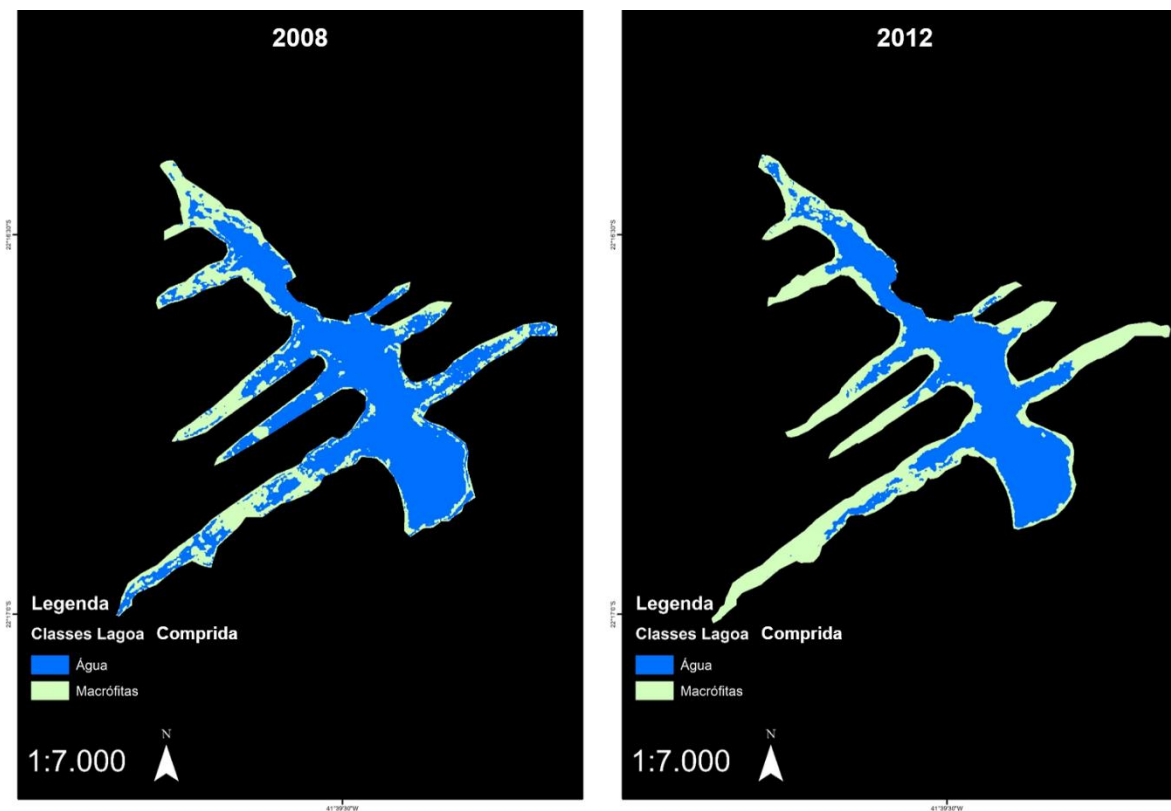


Figura 22. Variabilidade temporal e classificações de áreas ocupadas somente por água (regiões limnéticas) e áreas ocupadas por macrófitas (regiões litorâneas) na lagoa Comprida referentes às coberturas realizadas em abril de 2008 (à esquerda) e setembro de 2012 (à direita).

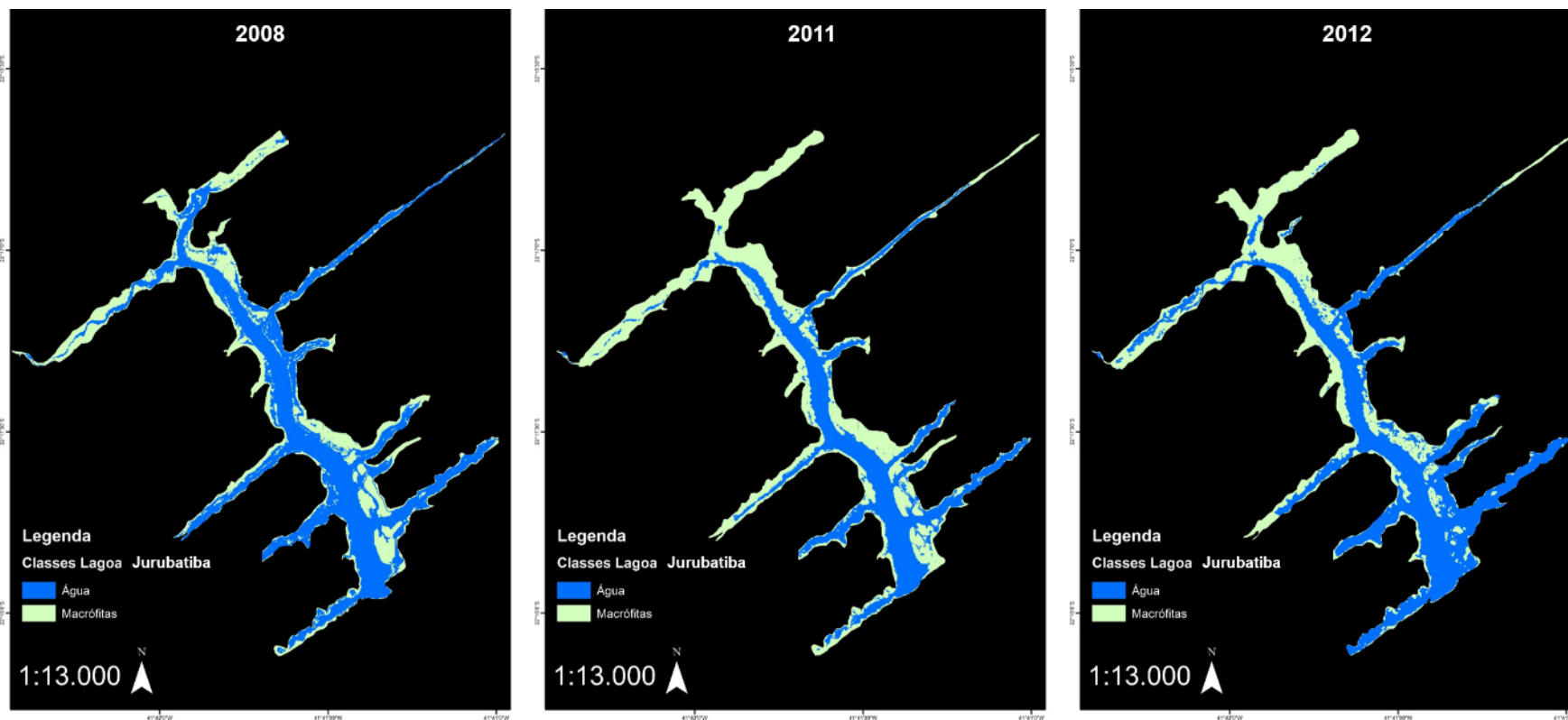


Figura 23. Variabilidade temporal e classificações de áreas ocupadas somente por água (regiões limnéticas) e áreas ocupadas por macrófitas (regiões litorâneas) na lagoa Jurubatiba referentes às coberturas realizadas em abril de 2008 (imagem à esquerda), mosaico de dezembro de 2011 à fevereiro de 2012 (imagem central) e cobertura de setembro de 2012 (à direita).

5. DISCUSSÃO

As três vias de transporte de CH₄ e CO₂ apresentaram elevada variabilidade espacial entre os compartimentos estudados e contribuíram em diferentes graus com os fluxos totais das lagoas Comprida e Jurubatiba. Ambas as lagoas foram caracterizadas com balanço final de emissão de CH₄, sendo os fluxos na lagoa Comprida majoritariamente regulados por processos associados as emissões via macrófitas aquáticas emersas e a lagoa Jurubatiba por processos ligados a formação e liberação de bolhas do sedimento. Já os fluxos de CO₂, ao contrário do que esperávamos, também apresentaram balanço final de emissão, mesmo considerando o importante papel das macrófitas emersas no sequestro de carbono atmosférico (Belarmino, 2013; Bridgham et al., 2006). Os fluxos difusivos foram as principais vias de saída de CO₂ em ambos os sistemas e foram principalmente regulados pelos processos de formação e consumo deste gás nos compartimentos pelágicos e bentônicos, sendo o perfil heterotrófico observado apresentado de acordo com os estudos de pCO₂ realizados em lagos temperados e tropicais que destacam que estes sistemas são essencialmente fontes de carbono para a atmosfera (Kosten et al., 2010; Marotta et al., 2009). No entanto, acreditamos que este perfil foi encontrado devido a reestruturação ecossistêmica, principalmente da comunidade de macrófitas aquáticas emersas, causada pelo evento extremo de chuvas que precedeu nossas campanhas no verão de 2012.

5.1. CONTRIBUIÇÃO DE REGIÕES E VIAS DE TRANSPORTE PARA AS EMISSÕES DE CH₄ E CO₂

Os fluxos difusivos de CH₄ foram as vias que menos contribuíram com as emissões totais deste gás nas lagoas estudadas (9,3% e 4,3% dos totais emitidos nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente). Este fato deve ser explicado pela elevada taxa de oxidação no sedimento e em toda a coluna d'água dos ecossistemas estudados proporcionada pela alta suscetibilidade aos ventos e baixas profundidades que intensificam os processos de mistura vertical e lateral das concentrações de CH₄ na água. Este padrão foi observado por (Fonseca et al., 2004), onde a lagoa Jurubatiba, por exemplo, além de apresentar um perfil vertical de concentrações de CH₄ no sedimento, onde as menores concentrações estavam nas camadas superficiais devido a oxidação, ainda apresentava homogeneidade quanto as baixas concentrações de CH₄ na coluna d'água, mesmo entre os distintos sítios de produção, designados no presente trabalho como regiões limnéticas e litorâneas. Ao contrário do que foi proposto por (Lewis et al., 2000) onde o autor sugeriu condição dominante de anoxia em

sistemas lênticos tropicais e assim como já observado por (Enrich-Prast et al., 2004) à respeito das lagoas costeiras da região norte fluminense, nossos dados demonstraram oxigenação em todo o perfil vertical da água (uma característica comum nestes ambientes), que somados às características descritas anteriormente, possivelmente reforçam a pequena contribuição do fluxo difusivo para as emissões totais de CH₄, diante do potencial regulador dos processos de metanotrofia sobre os fluxos difusivos deste gás como já proposto por (Devol et al., 1988) na bacia amazônica.

As baixas concentrações foram possivelmente difundidas para coluna d'água e destas uma parte ainda menor alcançou a atmosfera e foi liberada via fluxo difusivo. Uma contribuição próxima destas apresentadas no presente trabalho para os fluxos totais de CH₄ já foi observada por (Gripp, 2011) para regiões litorâneas na lagoa Jurubatiba. No entanto, em regiões limnéticas este autor encontrou fluxos difusivos que corresponderam à 100% da emissão total de CH₄, enquanto nossos dados de difusão apontaram cerca de 50% e 70% de contribuição para os totais emitidos em regiões limnéticas nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente. Este resultado indica que outra via de emissão (fluxo ebulitivo) também avaliada nas duas regiões e geralmente negligenciável em regiões limnéticas (Deshmukh et al., 2014; Gripp, 2011), além de ter sido importante via de emissão pela sua capacidade de transportar altas concentrações de CH₄ em regiões litorâneas, também apresentou papel importante na emissão deste gás em ambos os compartimentos estudados.

Em relação aos fluxos de CH₄ via macrófitas aquáticas emersas, embora estas apresentem um potencial de atenuação nas emissões de CH₄ proporcionada pela oxigenação de uma fina camada entre suas raízes e o sedimento (Sorrell & Boon, 1994), este processo foi possivelmente menor em relação à taxa e ao tempo de exposição do CH₄ para oxidação na água em relação aos fluxos difusivos, onde até 90% do que é produzido e difundido para água pode ser oxidado (Gary, 1990). Estes vegetais são considerados importantes condutores do CH₄ produzido no sedimento diretamente para a atmosfera (Carmichael et al., 2014; Ding et al., 2003; Grünfeld & Brix, 1999; Van Der Nat & Middelburg, 1998; Yavitt & Knapp, 1995) e de acordo com nossos dados foram responsáveis por cerca de 80% e 25% do total de CH₄ emitido nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente, sendo que em ambos os sistemas, colonizavam apenas a região litorânea, ou seja cerca de 46% e 42% da área total das lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente. Diante disso concluímos que em sistemas com regiões litorâneas mais amplas em relações às limnéticas ou em períodos após forte evento

de estiagem onde estas regiões podem se tornar maiores, como nossos dados referente a classificação de 2011 indicam, o papel destas macrófitas para o transporte de CH₄ poderia ser ainda mais destacado.

Apesar da diferença entre o percentual (cerca de 55%) de CH₄ emitido via macrófitas para as emissões totais deste gás entre as lagoas estudadas, o total emitido em kg de CH₄ foi semelhante (Comprida= 4,14 e Jurubatiba= 5,91kg CH₄. d⁻¹). No entanto, a lagoa Jurubatiba apresentava área de ocupação de macrófitas de 0,350km² na classificação referente à 2012, cerca de três vezes maior em relação a área de ocupação de macrófitas na lagoa Comprida deste mesmo ano. Portanto, ao considerar a emissão em m² a lagoa Comprida emitiu cerca de duas vezes mais CH₄ em relação à Jurubatiba, sendo assim, pôde ser observado que o papel das macrófitas como transportadoras de CH₄ na lagoa Comprida apresentou maior importância relativa para o total na emissão deste gás em relação à Jurubatiba. Este fato pode ser atribuído ao retorno à estabilidade metabólica, fixação dos vegetais e menor mortalidade na lagoa Comprida (apesar de também terem apresentado instabilidade), mesmo após o intenso período chuvoso ocorrido no período do verão-outono no ano de 2012. De acordo com os dados do INMET referente à este ano, foi reportado 598mm de chuvas nos primeiros cinco meses que antecederam a primeira campanha, do total de 1534mm acumulados em dois anos (de janeiro de 2012 à janeiro de 2014), sendo cerca de 200mm apenas em um período de 12 dias no mês de janeiro de 2012. Este evento elevou rapidamente a coluna d'água, causou intensa mortalidade na comunidade de macrófitas aquáticas emersas e consequentemente um intenso aporte de matéria orgânica, principalmente da fração particulada de acordo com (Fonseca et al., 2013). Segundo (Webster & Benfield, 1986) a degradação deste material particulado ocorre através de rotas metabólicas que dividem-se principalmente em uma rápida lixiviação nas fases iniciais, acompanhada da fragmentação física dos detritos, além disso ocorre modificações químicas associadas aos processos de digestão e do catabolismo de componentes estruturais.

Acreditamos que o processo de decomposição tenha ocorrido rapidamente e com maior intensidade nas raízes por três condições principais: a) Com a elevação do nível da água e a submersão da maioria das folhas, estas diminuíram exponencialmente seu processo de oxigenação das raízes, pois suas trocas gasosas ocorrem majoritariamente pela atmosfera (Esteves, 2011). Assim, os vegetais ficaram deplecionados em oxigênio por um longo período (o que já causa forte distúrbio em sua homeostase de acordo com (Armstrong & Drew, 2002)

e possivelmente ocorreram elevadas taxas de produção de gás sulfídrico (H_2S) no compartimento onde eles estavam ancorados, sendo este gás outro produto do processo de decomposição que é extremamente tóxico às raízes destes vegetais. No entanto, o H_2S geralmente não suprime seu desenvolvimento, pois exposto ao oxigênio é rapidamente oxidado (Esteves, 2011); b) Pela menor riqueza em compostos de sustentação (celulose, lignina, pectina, entre outros) em relação às folhas e o rizoma (Ferreira, 1988); c) Por estarem sujeitas à decomposição por uma riqueza maior de organismos decompositores no sedimento, em relação à coluna d'água, que potencializam o processo de fragmentação de detritos e geração de CO_2 e CH_4 (Stoeva et al., 2014). Portanto, alguns estandes de macrófitas aquáticas apresentaram distúrbios metabólicos ou foram desconectados do sedimento. No entanto, as folhas ricas em componentes estruturais e de sustentação permaneceram eretas e apoiadas umas nas outras em grandes estandes fragmentados e alguns desconectados do sedimento que, inicialmente (nas primeiras campanhas), não encontravam-se à deriva na lagoa. O interessante que este processo foi comum nas estações litorâneas da lagoa Jurubatiba e não foi observado (oculto) nas estações da lagoa Comprida. Assim, acreditamos que pela viabilidade da conexão entre sedimento e atmosfera em parte do período amostrado na lagoa Comprida, a função condutora das macrófitas tenha sofrido menor interrupção e assim os fluxos gerados tenham sido mais elevados em relação à Jurubatiba.

Já os fluxos ebulitivos foram aqueles que possivelmente menos sofreram com a oxidação durante o transporte do CH_4 à atmosfera como já relatado por (Bastviken et al., 2004), diante das elevadas concentrações obtidas nas estimativas desta via. Nossos dados demonstraram importante contribuição destes fluxos para o total de CH_4 emitido, cerca de 12% e 71% nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente, sendo a fração majoritária destes percentuais emitidos nas regiões litorâneas, devido a importância da presença de macrófitas emersas e do ambiente que elas proporcionam para a produção deste gás. Apesar da formação de algumas bolhas por ventura terem contato com camadas superficiais na presença de oxigênio e estas possivelmente sofrerem ataques microbianos da comunidade metanotrófica na interface óxica "sedimento-água", geralmente as mesmas são formadas em regiões mais profundas do sedimento, como já demonstrado por (Fonseca et al., 2004) através do perfil vertical de concentração de CH_4 na água intersticial do sedimento da lagoa Jurubatiba. Quando o sedimento sofre distúrbios físicos numa escala de poucos centímetros a muitos quilômetros (dependendo da força motriz que o gera, por exemplo peixes, ventos,

pressão atmosférica como proposto por (Joyce & Jewell, 2003; Keller & Stallard, 1994; Mattson & Likens, 1990)), as bolhas geralmente se desprendem e alcançam a atmosfera num processo mais rápido comparado aos demais. Portanto, chegam à atmosfera altas concentrações de gases, entre eles o CH₄, acumulados em bolhas produzidas em elevadas taxas de decomposição sob influência de baixa ou nenhuma taxa de oxidação e baixa pressão hidrostática que acreditamos caracterizar estas lagoas, principalmente a Jurubatiba, diante das estimativas encontradas.

Em relação a diferença da contribuição dos fluxos ebulitivos para o total de CH₄ emitido entre as duas lagoas que essencialmente se distinguem em relação às regiões litorâneas, observamos que Jurubatiba apresentou valores mais elevados (cerca de 32 vezes maiores considerando a área ocupada por macrófitas) em relação à lagoa Comprida, sendo cerca de 70% do total emitido neste sistema ou 16,5kgCH₄ d⁻¹ extrapolado pela área de 0,320km². O incremento deste resultado possivelmente está associado, além da alta produção encontrada no sedimento deste sistema (3,36nmol CH₄ g⁻¹ d⁻¹) (Petruzzella et al., 2013), também ao evento de intensa precipitação e o efeito do mesmo (aparentemente mais intenso na Jurubatiba) sobre a comunidade de macrófitas aquáticas e conseqüentemente o aporte de carbono orgânico descrito anteriormente. Neste caso, a acumulação de carbono orgânico originado dos vegetais em senescência contribuiu com altas taxas de decomposição aeróbica no compartimento bentônico, o que reduziu abruptamente o OD disponível abaixo do acúmulo de rizomas e folhas depositadas sobre o sedimento. Este processo facilitou a prevalência de camadas anóxicas que junto com o recurso orgânico gerado pelo tecido morto das macrófitas, possivelmente intensificaram as taxas de metanogênese. Ao longo das campanhas ainda houve uma diminuição da pressão hidrostática através do decréscimo gradual da profundidade e da oscilação natural do regime pluviométrico e da pressão atmosférica, além de um possível aumento nos distúrbios sedimentares causados pelo maior potencial dos ventos em períodos típicos de elevação da velocidade do mesmo numa coluna d'água que apresentava-se mais rasa. Diante disso, houve um aumento na liberação de bolhas contendo gases produzidos nos processos de decomposição, principalmente na campanha de novembro de 2012, possibilitando que altas concentrações de CH₄ alcançassem a atmosfera através desta via.

Ao considerar as emissões de CO₂ retiramos os dados das macrófitas, pois esta via apresentou balanço final de sequestro de carbono nas regiões litorâneas de ambos os

sistemas, o que não seria compatível com os gráficos de contribuição das vias para as emissões totais. Portanto, ao considerar somente a via difusiva e ebulitiva, foi observado que para o CO_2 emitido em ambas as lagoas, os fluxos difusivos corresponderam a mais de 99% do total, sendo ainda importante destacar sua maior homogeneidade em relação à espacialidade das emissões de CH_4 quanto às regiões estudadas. Neste contexto, em primeiro lugar, destacamos o maior potencial de difusão e solubilidade deste gás em relação ao CH_4 , atribuído a seu menor diâmetro cinético e a maior massa e força intermolecular com a água (Casper et al., 2000; Li et al., 2008) o que proporciona maior facilitação na difusão do CO_2 do sedimento para a coluna d'água e desta para atmosfera em relação ao CH_4 . Além disso, a produção deste gás está mais vinculada à compartimentos oxigenados, sendo assim, os processos de formação de CO_2 no compartimento bentônico ocorreriam principalmente nas camadas superficiais, portanto, haveria baixo acúmulo deste gás em bolhas nas camadas profundas do sedimento e rapidamente o que fosse produzido iria se solubilizar na água através da interface “sedimento-água”. Também é importante destacar a respiração no sedimento que já foi descrita por outros autores como uma das mais importantes fontes de CO_2 para a coluna d'água (Cole et al., 2000; Raymond et al., 2000; Striegl et al., 2001). Esta contribuição também já foi estudada em experimentos de bioturbação onde foi observado importante papel dos microrganismos bentônicos e maior ainda da comunidade de macroinvertebrados bentônicos no aumento da saturação de pCO_2 na água originado do sedimento (Rossi, 2013). Diante disso, a respiração neste compartimento pode contribuir significativamente com uma importante fração do CO_2 difundido na coluna da água e emitido para a atmosfera.

Outra questão importante corresponde aos processos produtores de CO_2 na região pelágica destes sistemas, onde podem ser destacados os processos ligados à oxidação de CH_4 e à degradação de COD, principalmente através da respiração do bacterioplâncton, de um processo externo ao metabolismo aquático conhecido como fotodegradação e ainda da formação de CO_2 originada da decomposição de plantas aquáticas emersas.

De acordo com Marinho et al. (2010) o COD encontrado nestes sistemas é majoritariamente alóctone, este possui assinatura isotópica semelhante às plantas terrestres C_4 que colonizam a restinga na região, independente da região amostrada (limnética ou litorânea). Segundo Farjalla et al. (2002), o COD alcança as lagoas do presente trabalho através da percolação do solo arenoso da restinga adjacente, sendo uma parte rapidamente incrementada no metabolismo bacteriano e transformados em biomassa e outros

metabólitos, entre eles o CO_2 . A fotodegradação também é um importante gerador de CO_2 nestes sistemas, principalmente após eventos de chuvas onde ocorre lavagem do material orgânico da restinga para as lagoas estudadas (Farjalla et al., 2009; Suhett et al., 2007). Segundo (Moran & Zepp, 1997), a fotodegradação consiste na irradiação de luz que leva a degradação do COD em compostos de massas moleculares menores e CO_2 , principalmente em sistemas como estes, onde a maior parte do COD apresenta origem alóctone e está mais disponível à degradação via luz solar comparado à degradação bacteriana (Amado et al., 2006). Já a formação de CO_2 à partir da decomposição das plantas aquáticas emersas (restrito as regiões litorâneas) foi apontado como um processo de menor importância no estudo realizado por (Fonseca et al., 2013) na lagoa Jurubatiba, pois a liberação de COD a partir dos detritos gerados por estes vegetais é baixa, indicando fortes indícios para a rota de mineralização de matéria orgânica particulada (processo mais lento e tardio), sendo assim, este último iria contribuir num grau mais baixo com a espacialidade dos distintos processos geradores de CO_2 nestes sistemas.

Portanto, concluímos que além da fácil dissolução do CO_2 , os processos formadores desta molécula, ao contrário do CH_4 , são essencialmente ligados ao metabolismo da superfície do sedimento e da região pelágica nestes sistemas. O que explica a importante contribuição do fluxo difusivo de CO_2 (99%) para a emissão total deste gás e apenas justifica o que já esperávamos, para sistemas húmicos com baixa densidade fitoplanctônica.

5.2. VARIABILIDADE ESPAÇO-REGIONAL E CONTINENTAL DOS FLUXOS EBULITIVOS DE CH_4 E CO_2 : UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR

Os tratamentos referentes à abordagem regional dos fluxos ebulitivos de CH_4 e CO_2 apresentaram comportamento semelhante, possivelmente pelas bolhas liberadas do sedimento serem ricas em gases produzidos nos processos de respiração e decomposição, dentre eles o CH_4 e CO_2 (Esteves, 2011; Fendinger et al., 1992). A partir de nossos resultados foi possível observar que as regiões litorâneas das lagoas Comprida e principalmente Jurubatiba (a lagoa que apresentou maior mortandade de macrófitas aquáticas), apresentaram os valores mais elevados de emissão de CH_4 via fluxo ebulitivo (cerca de 60 e 520 vezes maiores em relação as emissões das regiões limnéticas das mesmas). Além disso, estas regiões também foram caracterizadas pelos valores mais elevados dos fluxos ebulitivos

de CO₂, no entanto, este último em menores proporções e com pequena contribuição para o balanço final de carbono.

Em meio as características encontradas nas regiões litorâneas que as distinguiram das limnéticas, no âmbito da regulação do fluxo ebulitivo neste estudo, destacamos duas principais: a) a menor profundidade, além de ser fundamental para a colonização destes vegetais, diante da necessidade da luz solar e das trocas gasosas, esta variável também exerce uma importante regulação na pressão da água sobre o sedimento, e a mesma já foi descrita como importante limitadora deste tipo de fluxo em outros estudos (Deshmukh et al., 2014; Engle & Melack, 2000b; Figueiredo-Barros, 2008; Keller & Stallard, 1994; Rosenqvist et al., 2002; Wik et al., 2013), pois desfavorece a formação de bolhas no sedimento ao exceder as pressões parciais dos gases dissolvidos neste compartimento (Fendinger et al., 1992). Além disso, apresentam papel importante sobre a estratificação da temperatura e do oxigênio da coluna d'água (Engle & Melack, 2000b), que correspondem a fatores importantes na metanogênese. No entanto, no presente estudo, a estratificação não foi observada pela forte ação dos ventos ao promover a mistura de águas e pela profundidade no geral ter sido baixa, mesmo nos períodos de maior inundação. b) O maior aporte de carbono orgânico, ou seja, maior disponibilidade de recurso para a decomposição aeróbica e anaeróbica, proporcionado pela excreção e pela morte destes vegetais (Bastviken et al., 2010; Bianchini Jr & Cunha-Santino, 2008), sendo esta, possivelmente a principal característica que regulou à espacialidade entre regiões limnéticas e litorâneas quanto às emissões destes gases. Pois além de ter ocorrido em grande escala, devido ao evento extremo de chuvas no verão anterior, esta característica também proporciona outra condição possivelmente favorável como o maior aporte de nutrientes, observado nos valores mais elevados de P-Total, sendo estes, essenciais para a mineralização da matéria orgânica de uma comunidade microbiana que já apresenta limitação natural deste nutriente nas lagoas estudadas (Farjalla et al., 2001). Em um estudo realizado por Gripp (2011) na lagoa Jurubatiba, também foi observada importância fundamental dos sítios ocupados por macrófitas nas elevadas concentrações de carbono orgânico no sedimento e na maior ocorrência de emissão de CH₄ por bolhas.

A presença das plantas aquáticas emersas também pode explicar a maior emissão deste gás observada na Lagoa Jurubatiba, onde, ao contrário da Lagoa Comprida, antes e durante o período de coleta ainda havia extensa colonização destes vegetais. Em um estudo realizado em lagos boreais na Finlândia, Bergstrom et al. (2007) encontraram resultados que

apontaram as regiões colonizadas por plantas aquáticas emersas como as mais importantes fontes naturais de CH₄ nos ecossistemas estudados por eles. Duan et al. (2005) encontraram maior emissão por bolhas em regiões litorâneas comparadas às limnéticas, e supremacia das emissões em estandes de macrófitas emersas em relação as submersas. Sorrell & Boon (1994), investigando a importância do transporte lacunar de gases para a liberação de CH₄ através de macrófitas emersas, encontraram emissão via fluxo ebulitivo até 15 vezes maior na região de plantas aquáticas comparadas às regiões sem cobertura vegetal. Em estudos experimentais Van Der Nat & Middelburg (1998) estudaram os efeitos de duas espécies de macrófitas emersas na dinâmica do fluxo de CH₄, e observaram que durante a fase de crescimento os fluxos de CH₄ mediado por sistema vascular em ambas as espécies foram predominantes (>90%), mas o transporte por bolhas foi significativo antes e depois da fase de crescimento. Ballester & Santos (2001) também encontram resultados mais elevados de fluxos ebulitivos de CH₄ em regiões com presença de estandes de macrófitas emersas e em florestas inundadas em relação à áreas abertas na Amazônia.

Ainda em relação aos fluxos ebulitivos de CH₄, num contexto temporal, foi observado que os “outliers” foram todos referentes às campanhas de novembro de 2012 e/ou abril de 2013 (meses mais próximos do período chuvoso (verão), dentre àqueles amostrados). Este fato sugere um efeito da temperatura elevada no verão (possivelmente em menor escala, pela baixa variabilidade apresentada) e das variáveis precipitação e pressão atmosférica sobre os fluxos ebulitivos de CH₄, sendo estas variáveis meteorológicas já relatadas como importantes reguladoras da produção e liberação de bolhas de CH₄ em outros estudos devido aos seus efeitos sobre o metabolismo da comunidade metanogênica e sobre o efeito físico da pressão hidrostática (Belshe et al., 2013; Casper et al., 2000; Duc et al., 2010; Mattson & Likens, 1990; Natchimuthu et al., 2014; Wik et al., 2013).

Considerando a abordagem continental nos fluxos ebulitivos de CH₄, apesar de não terem sido observadas diferenças significativas entre tratamentos, foram observadas tendências quanto às espacialidades intra e interlagunares que procuramos destacar pela grande contribuição deste fluxo para as emissões de CH₄. No entanto, diante da pequena expressividade dos fluxos ebulitivos em regiões limnéticas, nossas observações destacaram as características principalmente associadas às duas regiões que formaram a porção barra (quando aplicável) ou apenas as regiões litorâneas destas porções.

Na lagoa Comprida, as emissões por bolhas de ambos os gases foram mais elevadas nos tratamentos referentes a porção do fundo (cerca de quatro vezes maior em relação à barra), possivelmente por diferenças encontradas em três características principais: a) a espécie alvo dos estandes de macrófitas aquáticas amostrados, uma característica peculiar somente às regiões litorâneas, dentre àquelas amostradas em cada porção; b) A profundidade entre estações da barra e do fundo, sendo as estações da barra no geral mais profundas e conseqüentemente encontravam-se sujeitas ao efeito da maior pressão hidrostática; c) A matéria orgânica em conjunto com a granulometria e o potencial redox do sedimento.

Nesta lagoa as amostragens em regiões litorâneas foram realizadas em bancos de plantas aquáticas de diferentes espécies, sendo a porção do fundo composta por bancos de macrófitas do gênero *Typha sp.* e a barra por bancos do gênero *Eleocharis sp.*. O gênero *Typha sp.*, apesar de ser caracterizado como macrófita de grande potencial convectivo, maior porosidade nas raízes e de anatomia de enraizamento mais amplo (projeções verticalmente e radialmente mais alongadas do rizoma) em relação a *Eleocharis sp.* (Sorrell et al., 2000), que possibilitaria maiores taxas de oxidação no sedimento, também foi o gênero que apresentou sedimento com maiores percentuais de COT-SED. Isto significa maior oferta de recurso para metanogênese, pelo seu alto investimento em biomassa acima da superfície do sedimento e maiores percentuais em carbono orgânico (Bianchini Jr & Cunha-Santino, 2008; Chanton et al., 1993), que de acordo com (Bastviken et al., 2008), já se configura como um dos principais reguladores da magnitude de fluxos ebulitivos de CH₄, e poderia ser o suficiente para subsidiar a produção mais elevada e a diferença encontrada dentro deste sistema independente da oxigenação proporcionada pela raiz. A redução da profundidade ao longo das campanhas (mais abrupta em porções distintas) também possivelmente facilitou a liberação e emissão de CH₄ através do transporte por bolhas, uma vez que as lagoas estudadas são rasas e estão sujeitas às frequentes perturbações do sedimento atribuídas aos ventos da região como já descrito anteriormente. Além disso os sedimentos de ambas as estações da barra apresentavam uma mistura entre granulometria arenosa e orgânica, e de acordo com estudos realizados por (Kankaala & Bergström, 2004), os fluxos de CH₄ realizados sobre sedimentos com esta característica apresentaram redução de até 97% na emissão deste gás em relação à sedimentos orgânicos, onde os autores concluíram que pela suscetibilidade deste tipo de sedimento aos processos de oxidação, houve uma forte redução das emissões deste gás para atmosfera.

Já na lagoa Jurubatiba, houve uma inversão quanto a porção que mais emitiu (emissões na barra cerca de 3,5 vezes maiores que no fundo) e os valores de emissão foram cerca de 10 vezes mais elevados em relação a lagoa Comprida, mesmo considerando os percentuais mais baixos de COT em relação a esta última lagoa e o papel desta variável, apontada até então, como forte reguladora da espacialidade dos fluxos ebulitivos na lagoa Comprida. Ao contrário da lagoa Comprida, as regiões litorâneas amostradas em Jurubatiba foram restritas ao mesmo gênero de macrófita aquática (*Typha sp.*) e as porções barra e fundo apresentaram menor diferença entre os percentuais de COT-SED (cerca de 4%). No entanto, nesta lagoa foram observados efeitos mais extremos do início ao fim das amostragens, principalmente na barra, relacionados ao forte período de chuva do verão de 2012. Além disso, a batimetria da lagoa Jurubatiba parece apresentar depressão mais acentuada na região da barra, principalmente nos estandes de macrófitas emersas localizados nas estações mais próximas da abertura dos “braços” (prolongamentos dendríticos) da lagoa, como a estação M3, e depressão menos acentuada nas estações da porção fundo, principalmente nas regiões litorâneas localizadas no interior dos “braços” como a estação M1. Diante disso, acreditamos que o efeito da precipitação no verão anterior tenha causado um impacto maior na comunidade de macrófitas emersas na barra, que foi refletido pela elevada mortandade e desprendimento dos bancos, inicialmente apenas na barra da lagoa, e conseqüentemente isso tenha acelerado os processos de decomposição e emissão de bolhas nesta porção do sistema. Os resultados de COD e N-Total mostraram maior disponibilidade destes compostos na coluna d’água das estações da barra, o que possivelmente sustenta esta observação, pois de acordo com Wetzel (2001) também são compostos originados dos processos de lixiviação de plantas aquáticas.

Portanto pode-se propor que o efeito sinérgico entre a elevada produção de matéria orgânica, a menor profundidade em regiões litorâneas em relação às limnéticas e os eventos climáticos durante o período de amostragem (temperatura, precipitação e pressão atmosférica, principalmente nos meses de novembro de 2012 e abril de 2013) tenham se caracterizado como fortes reguladores das emissões através do fluxo ebulitivo.

Ainda observamos que os “outliers” dos fluxos ebulitivos de CH₄, gerados à partir de uma série de subamostragens, (ou seja, resultados que informam um valor mais robusto quanto a variação da região amostrada em relação à resultados de réplicas isoladas) e que se apresentaram restritos às campanhas realizadas próximas do verão, demonstraram uma forte variabilidade temporal quanto à este fluxo, com valores frequentemente mais elevados na

estação mais quente e chuvosa do ano. Conclui-se que para estimativas mais robustas quanto ao valor central de emissão de CH₄ via fluxo ebulitivo (responsáveis por cerca de 10 e 70% do fluxo total de CH₄ emitido nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente) devem ser consideradas variações sazonais, sendo inadequado realizar estimativas com dados de regimes de precipitação isolados, pois estes poderiam ser superestimados, ou subestimados dependendo do período do ano.

Além disso, quantificamos fluxos ebulitivos, mensurados nos meses mais próximos do verão (novembro de 2012 e abril de 2013), com elevada representatividade no total emitido por estes sistemas. A soma destes foram equivalentes à cerca de 63% e 83% dos fluxos ebulitivos de CH₄ mensurados em todo o período estudado nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente, e cerca de 6% e 60% dos fluxos totais de CH₄ em todo o período estudado nas lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente. Ou seja, a emissão por bolhas no período chuvoso (verão) foi mais elevada que no período de estiagem (inverno) principalmente na lagoa Jurubatiba e o transporte por bolhas somente nas estações litorâneas da lagoa Jurubatiba no período do verão contempla cerca de 60% do total de CH₄ emitido neste sistema, evidenciando o papel destas estações em um período do ano restrito para a emissão deste gás.

Diante disso ainda sugerimos que mais importante seria ampliar a geração destes dados para contemplar variações interanuais. À exemplo disso destacamos os fortes eventos de chuvas que ocorreram previamente ao período de coleta no verão de 2012 e aquele sugerido por nossa classificação de imagem de satélite do ano de 2008 ou forte período de estiagem sugerido pela classificação da imagem de satélite de 2011. Esta abrangência de períodos distintos foi também sugerida por (Wik et al., 2013) afim de se obter maior margem de variabilidade dos dados para a geração do balanço de carbono destes sistemas modelos, sendo esta proposta já contemplada no plano do Projeto PELD-Sítio 5 que dentre seus objetivos busca o balanço final de carbono das lagoas costeiras deste estudo numa abordagem de pesquisa de longa duração.

5.3. VARIABILIDADE ESPAÇO-REGIONAL E CONTINENTAL DOS FLUXOS DE CH₄ E CO₂ VIA MACRÓFITAS: UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR

Nossos resultados demonstraram que as macrófitas aquáticas emersas apresentaram importante papel na ciclagem de carbono nas duas lagoas estudadas. Sendo que nos fluxos de

CH₄, estas agem indiretamente sobre a emissão, pois possibilitam a passagem do gás produzido no sedimento para a atmosfera e agem sobre a oxidação deste no sedimento ao promover a oxigenação deste compartimento. Já em relação ao CO₂, os valores dos fluxos resultam do balanço entre produção e consumo do metabolismo do próprio vegetal e do perifíton associado, sendo este fluxo, ao contrário do que estimávamos, pouco expressivos no sequestro de carbono, possivelmente pelo forte estado de senescência em que estes vegetais estavam submetidos durante este trabalho.

Quanto ao CH₄, os fluxos foram restritos às emissões (saída de carbono), e contribuíram com uma importante fração do CH₄ que alcançou a atmosfera. As lagoas Comprida e Jurubatiba emitiram 4,59 mg CH₄.m⁻².d⁻¹ (78,49% da emissão total) e 20,1 mg CH₄.m⁻².d⁻¹ (24,4% da emissão total), respectivamente. Apesar de ambos os sistemas não terem exibido diferenças significativas e a lagoa Jurubatiba não ter alcançado valores máximos elevados em relação à Comprida, foram valores frequentes numa faixa de emissão (entre 5 e 35 mg CH₄.m⁻².d⁻¹). Já na lagoa Comprida, encontramos valores mais elevados nas primeiras campanhas, no entanto, muitos valores tangendo a ausência de emissão nas campanhas seguintes. Neste contexto pôde ser observado que em todos os tratamentos houve muitas réplicas com valores próximos à zero (quartil inferior ou barra de erro tangem a base do gráfico) na lagoa Comprida, indicando forte reincidência de amostragens que apresentaram baixas emissões. Este quadro possivelmente ocorreu devido a maior profundidade em que os poucos vegetais que apresentaram metabolismo estável estavam inseridos na lagoa Jurubatiba e pelo efeito tardio da mortandade de plantas na lagoa Comprida. Já foi descrito por (Brix et al., 1992; Sorrell et al., 2000) que macrófitas emersas, dentre elas o gênero *Typha* sp., em ecossistemas aquáticos mais profundos apresentam uma pressão interna mais elevada e menor resistência ao fluxo interno de gases, conferindo uma vantagem em relação as trocas gasosas como por exemplo o transporte de O₂ e CH₄.

Em relação aos resultados encontrados em ambas as lagoas, observamos baixa emissão de CH₄ para a atmosfera comparado ao resultado observado por (Gripp, 2011) na lagoa Jurubatiba (mesma do estudo), onde o autor encontrou média de 98,6 mg CH₄.m⁻².d⁻¹ (cerca de 30% da emissão total em seu estudo) ao amostrar as plantas aquáticas em períodos diurnos e noturnos. No entanto, destacou indiferença quanto a variabilidade entre o dia e a noite e ausência de senescência em larga escala. Apesar dos nossos dados máximos e mínimos corresponderem de forma semelhante aos mesmos do autor, acreditamos que as diferenças

nos valores centrais tenham ocorrido devido a interrupção da conexão entre sedimento e atmosfera via macrófita aquática proporcionada pela elevação do nível da água no verão anterior, que posteriormente induziu instabilidade no metabolismo e/ou desconexão com o sedimento e conseqüentemente a senescência de muitos destes vegetais. Resultado semelhante já foi observado por (Belger, 2007), onde a autora ao estudar os campos alagados na várzea amazônica também encontrou valores mais elevados de emissão de CH₄ via macrófitas em campos onde as macrófitas emersas estavam fixadas no sedimento em relação àqueles onde não estavam totalmente inseridas no mesmo e possivelmente não transportaram o CH₄ de forma eficiente para atmosfera.

As desconexões apesar de terem sido observadas com maiores frequências na lagoa Jurubatiba e não terem sido observadas na Comprida, não inviabilizaram a mortandade, em menor grau, desta última lagoa. O nível da coluna d'água também se elevou neste sistema, e por este apresentar menor colonização de macrófitas emersas em relação a Jurubatiba, não observamos bancos flutuantes em sua extensão, entretanto, na lagoa Comprida também foram estimadas baixas emissões de CH₄ via macrófitas, principalmente nas duas últimas campanhas.

Acreditamos que a lagoa Comprida apresentou tendência a valores máximos mais elevados de emissão e maior representatividade no fluxo via macrófitas, pois seus estandes sofreram um grau de distúrbio mais extremo em todo o sistema, porém mais pontual. Sendo assim, por mais que tenham apresentado valores baixos de emissão em algumas réplicas, a maior parte do CH₄ produzido no sedimento da lagoa Comprida pôde escapar para atmosfera através do aerênquima destes vegetais em um momento de reestruturação, superando a liberação por bolhas. De acordo com (Bazhin, 2004), em áreas húmidas e rasas com ampla colonização de macrófitas aquáticas emersas, a presença destes vegetais pode reduzir significativamente o transporte via fluxo ebulitivo, uma vez que os gases dissolvidos em sistemas onde ocorrem os três diferentes transportes para a atmosfera estão hidraulicamente conectados e os vegetais em pleno estado de trocas gasosas podem facilitar o carreamento do CH₄ produzido no sedimento antes mesmo que este possa se acumular e formar bolhas. Portanto, acreditamos que o "link" de extravasamento de CH₄ na lagoa Jurubatiba atribuído majoritariamente ao fluxo ebulitivo tenha ocorrido com maior expressividade pela interrupção parcial do transporte via macrófitas e pela demorada reestruturação dos estandes amostrados. (Van Der Nat & Middelburg, 1998) estudaram os efeitos de duas espécies de

macrófitas emersas na dinâmica do fluxo de CH_4 , e observaram que durante a fase de crescimento o CH_4 foi emitido quase que exclusivamente via plantas aquáticas em zonas alagadas experimentais cobertas por estandes destes vegetais. No entanto, também houve elevada emissão através de bolhas nestes compartimentos, enquanto que nas zonas sem cobertura vegetal o CH_4 foi emitido quase que exclusivamente por bolhas. De acordo com nossos resultados a lagoa Comprida possivelmente reestruturou seus estandes entre a primeira e a terceira campanha e logo depois, em um novo evento de chuvas significativamente mais branda, apresentou senescência novamente ainda a tempo de obtermos resultados e assim acompanhamos parte da emissão da fase de morte e crescimento.

Ao considerar a abordagem continental, não encontramos diferenças significativas entre tratamentos. Sendo assim, foi possível observar que os estandes do gênero *Typha sp.* e *Eleocharis sp.* foram semelhantes quanto as emissões via plantas aquáticas, demonstrando que este fluxo poderia ser extrapolado pela área colonizada por macrófitas, independente do gênero alvo na lagoa, pois ao contrário da lagoa Jurubatiba, a lagoa Comprida apresenta estandes de *Eleocharis sp.* com maior representatividade nas regiões litorâneas. No entanto, acreditamos que a homogeneidade tenha sido atribuída à questão da reincidência de amostragens com valores baixos (pela instabilidade dos estandes) e pelo reduzido n amostral nesta abordagem. Sendo assim, sugerimos um acompanhamento das emissões nos estandes das duas macrófitas em uma escala temporal que compreenda mais gerações e não se restrinja a períodos após fortes modificações na estrutura do ecossistema.

Os fluxos de CO_2 via macrófitas também não diferiram na abordagem interlagunar, que devido a ausência de macrófitas emersas na região limnética exibiu essencialmente a diferença entre regiões litorâneas das duas lagoas. Ambas apresentaram perfis autotróficos (mediana Comprida= $-54,19 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; mediana Jurubatiba= $-11,99 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). No entanto, com distinta distribuição dos dados. Destacamos na lagoa Comprida um resultado mais equivalente em relação aos processos de respiração e fotossíntese via macrófita aquática ao considerar as duas porções como uma unidade representativa da lagoa. No entanto, ao considerar as porções barra e fundo separadamente, observamos que apesar do perfil heterotrófico, houve uma tendência á neutralidade em relação ao banco amostrado na barra e elevadas taxas de sequestro na porção do fundo. Neste contexto podemos destacar uma possível explicação entre a diferença dos gêneros *Eleocharis sp.* e *Typha sp.* amostrados,

principalmente quanto ao investimento em biomassa do gênero *Typha sp.* em relação a *Eleocharis sp.* (Bianchini Jr & Cunha-Santino, 2008) e as elevadas taxas de sequestro de CO₂ já descritas para o gênero *Typha sp.* (Belarmino, 2013).

Já ao observar a espacialidade entre as porções da lagoa Jurubatiba, encontramos um retrato semelhante, exceto que a barra foi menos caracterizada por uma neutralidade e sim um perfil heterotrófico mais destoante e com dados mais distribuídos, enquanto no fundo a maior parte dos dados também exibiu um perfil autotrófico. Sendo assim, acreditamos que a diferença entre porções numa abordagem intralagunar seja principalmente atribuída a sensibilidade da barra destas lagoas sofrerem maiores modificações com o aumento do nível da coluna d'água. A porção do fundo de ambas as lagoas aparentemente sofreu menor grau de estresse em relação aos vegetais da barra por conta do processo chuvoso e da depressão mais acentuada na última porção citada. Diante disso, estes vegetais estariam realizando seu metabolismo mais próximo do natural, demonstrado pelas taxas mais altas e frequentes de influxo de CO₂ (sequestro de carbono), considerando que amostramos os vegetais na faixa do período diurno.

Apesar de procurarmos abranger maior aleatoriedade quanto aos horários de amostragem destes vegetais, verificamos em nossa análise que as macrófitas da barra apresentaram uma ligeira tendência em emitir mais CO₂ nos horários mais tardios do dia, enquanto que as amostragens no fundo apresentaram o inverso. Através do recurso da regressão linear confirmamos uma relação positiva ($R^2=0,5$) entre os efluxos de CO₂ via plantas aquáticas e os horários no período vespertino, sendo assim, o delineamento amostral também pode ter contribuído com os resultados encontrados.

Concluimos que a característica do gênero amostrado e da porção tenham demonstrado efeito sinérgico nas estimativas de fluxo de CO₂ via macrófitas na lagoa Comprida. Já na lagoa Jurubatiba, houve ausência do efeito do gênero (amostragem exclusiva em bancos de *Typha sp.*), contudo, o efeito da porção (continentalidade) junto aos horários do dia (delineamento amostral), possivelmente foram os principais reguladores do balanço entre produção e consumo de CO₂ via macrófitas, sendo importante destacar o estado de decomposição que muitas folhas já se encontravam nas amostragens referentes à barra desta lagoa. Adicionalmente também acreditamos que a tendência de sequestro mais elevada exibida no gráfico da abordagem interlagunar seja reflexo da frequência de amostragens em indivíduos de *Typha sp.* maiores (elevada área foliar e maior biomassa) na lagoa Jurubatiba,

em relação aos indivíduos da lagoa Comprida, que encontravam-se num estado mais limitado quanto a estas características.

De uma forma geral acreditamos que as diferenças abruptas encontradas na distribuição dos dados (tanto de CH₄ quanto CO₂) das plantas aquáticas tenha sido principalmente atribuída à instabilidade apresentada por estes organismos, como já proposto por (Natchimuthu et al., 2014) ao encontrar elevada emissão de CO₂ no período que as macrófitas emersas naturalmente começaram a morrer após o verão em um lago na Suécia. Como o ecossistema apresentou um retrato ao longo do tempo de intensa modificação (senescência e/ou instabilidade metabólica dos vegetais) e reestruturação da comunidade de macrófitas emersas como resposta do evento ocorrido no verão de 2012, acreditamos que este efeito tenha regido o padrão encontrado e os valores de emissão via macrófitas tenham ficado distantes do encontrado na literatura que aponta efluxos de CH₄ mais elevados (Duan et al., 2005; Sebacher et al., 1985; Van Der Nat & Middelburg, 1998; Yavitt & Knapp, 1995) e influxos de CO₂ mais elevados durante o período diurno (Bonneville et al., 2008; Brix et al., 2001; Gripp et al., 2013). Em relação aos influxos de CO₂, possivelmente a resposta metabólica de incremento do sequestro de carbono desencadeada pela alternância de atividades dos fitocromos ao se sensibilizarem pelas faixas do vermelho da incidência luminosa não foram eficientes diante da senescência dos vegetais, onde a maior parte das folhas encontravam-se secas e fragmentadas (Taiz & Zeiger, 2006).

5.4. VARIABILIDADE ESPAÇO-REGIONAL E CONTINENTAL DOS FLUXOS DIFUSIVOS DE CH₄ E CO₂: UMA ABORDAGEM INTRA E INTER LAGUNAR

Os resultados obtidos na abordagem interlagunar e regional dos fluxos difusivos de CH₄ demonstraram homogeneidade quanto ao perfil supersaturado deste gás nos compartimentos limnéticos, litorâneos e nos sistemas em relação a atmosfera, o que condicionamos a explicação da mistura de águas no perfil vertical e lateral promovendo oxidação em toda a coluna d'água de acordo com o que já foi explicitado anteriormente. No entanto, nesta abordagem desejamos destacar que em todos os tratamentos foram encontrados valores de influxo, que foram frequentes em duas situações: i) em um contexto temporal em 50% das estações amostradas na campanha realizada em novembro de 2012; ii) no contexto espacial na porção barra da lagoa Comprida que foi significativamente diferente da porção fundo do mesmo sistema.

Acreditamos que pela elevada emissão de CH₄ nas lagoas estudadas na campanha de novembro de 2012, que representou o início do ápice de emissão deste gás, tenha ocorrido um aumento das concentrações na atmosfera adjacente a camada limítrofe. Diante disso a atmosfera supersaturada em CH₄ promoveu a ocorrência dos influxos para a coluna d'água. O padrão de influxo também já foi encontrado por outros autores (Bartlett et al., 1990; Parashar et al., 1996) onde estes também apresentavam valores na ordem de $-10\text{mg CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ em sistemas naturais e em cultivos de arroz, convergindo no mesmo perfil de emissões abruptas em curto período que possivelmente saturavam a atmosfera e estimulavam o influxo da atmosfera para a água.

Em relação ao influxo na barra da lagoa Comprida, acreditamos que seja reflexo da elevada suscetibilidade aos ventos em que as estações que as compunham estavam submetidas, com efeito significativo sobre possíveis taxas elevadas de oxidação nesta porção. Sendo assim, esta região em 80% dos resultados apresentou coluna d'água subsaturada e frequente perfil de absorção.

De acordo com (Gripp, 2011) ao estudar a dinâmica da variação espacial das emissões de CH₄ na lagoa Jurubatiba ao longo do período chuvoso, não foram encontradas variações diárias quanto aos fluxos difusivos de CH₄ entre regiões limnéticas e litorâneas, nos sugerindo que possivelmente a distinção entre as porções barra e fundo da lagoa Comprida não tenham refletido o efeito do horário em que as amostragens foram realizadas. Além disso, o mesmo autor também encontrou frequente padrão de absorção em sua amostragem de transporte difusivo de CH₄, mais frequente até que o encontrado em nosso trabalho, demonstrando que este perfil de influxo de gases deve ser frequente no período do ano que mais chove e em que as pressões atmosféricas reduzem promovendo elevadas concentrações atmosféricas de CH₄ nos ecossistemas estudados causando supersaturação da atmosfera adjacente à lagoa em relação a água e conseqüentemente os influxos observados. Parte dos nossos dados demonstraram resultado semelhante, no entanto, nossos efluxos foram mais frequentes pois de acordo com (Poindexter & Variano, 2013), apesar dos fluxos de CH₄ e CO₂ via transporte ebulitivo e via macrófitas geralmente dominarem áreas húmidas rasas densamente colonizadas por plantas aquáticas, o transporte via fluxo difusivo pode ser particularmente importante quando as macrófitas emersas encontram-se em fase de senescência, período geralmente marcado por taxas de produção e difusão substancialmente mais elevadas que a oxidação, portanto, valores mais elevados de difusão para a atmosfera.

Os fluxos difusivos de CH₄ nas lagoas Comprida (0,29 mg CH₄.m⁻².d⁻¹) e Jurubatiba (1,77 mg CH₄.m⁻².d⁻¹) foram mais baixos que os resultados encontrados na várzea amazônica (Bartlett et al., 1990; Belger, 2007; Engle & Melack, 2000b). No entanto, estes ambientes apresentam pequena influência do vento na mistura de águas e taxas de oxidação muito reduzidas através do perfil anóxico que apresentam na coluna d'água, o que consequentemente traduziu a maior importância do fluxo difusivo nestes sistemas.

Finalmente destacamos que estes fluxos foram representativos nas regiões limnéticas dos sistemas estudados, no entanto, foram desprezíveis em regiões litorâneas e na totalidade de CH₄ emitido em ambos os sistemas. Sendo assim, pouco explicaram nossos resultados em relação ao balanço final de CH₄.

Em relação a variabilidade dos fluxos difusivos de CO₂ entre regiões (distinguindo limnética de litorânea), nossos resultados mostraram maior homogeneidade intralagunar. No entanto, apesar do COD estar presente em todo o sistema, apresentar suscetibilidade semelhante aos mesmos processos de degradação e de acordo com (Laque, 2011) as lagoas apresentarem um perfil heterotrófico em comum (respiração > fotossíntese), durante o período de amostragem desta autora foi encontrado um gradiente espacial quanto ao pCO₂, o que divergiu dos nossos dados.

Estes resultados num primeiro momento podem ser contrastantes, no entanto, acreditamos que (ao se basear em ambos os trabalhos) apesar da heterogeneidade intralagunar quanto ao pCO₂ nos mesmos sistemas estudados por (Laque, 2011), estes estariam sujeitos à um balanço final semelhante. Por exemplo, altas taxas de respiração e degradação de carbono orgânico em regiões litorâneas sujeitas à menor interferência de ventos, logo menor coeficiente de transferência gasosa (k) e baixas taxas de respiração e degradação de carbono orgânico em regiões limnéticas, sendo algumas destas regiões com elevada produtividade primária proporcionada por macrófitas submersas, no entanto, sujeitas à maior interferência de ventos, logo maior k. Portanto, o quadro de homogeneidade pode ter representado apenas um retrato novo do sistema, diante do elevado aporte de matéria orgânica alóctone devido as chuvas ocorridas no verão anterior ou a dinâmica entre o metabolismo aquático acoplado às características ambientais e atmosféricas das regiões pode ter compensado a diferença da espacialidade do pCO₂, e assim o CO₂ emitido por difusão apresentou baixa variabilidade espacial.

Portanto, fora o balanço das macrófitas aquáticas, as emissões de CO₂ praticamente se restringiram aos fluxos difusivos (cerca de 99% das emissões) e estariam majoritariamente ligadas aos processos metabólicos na camada superficial do sedimento e da coluna d'água em um gradiente ambiental, porém, diante do dinamismo entre os processos que o produz, o consome e o emite, esta variabilidade não foi observada na resposta final (emissão de CO₂).

Nos resultados obtidos na abordagem interlagunar do fluxo difusivo de CO₂ foram encontradas duas populações distintas entre os fluxos amostrados, ou seja, neste fluxo também foi refletida a heterogeneidade ecológica e ambiental entre lagoas já observada por (Laque, 2011) ao estudar a dinâmica do pCO₂ em lagoas costeiras da região norte fluminense. À partir dos nossos resultados observamos valores mais elevados nas emissões de CO₂ na lagoa Jurubatiba (mediana de 296,6 mg CO₂.m⁻².d⁻¹), cerca de 3 vezes maior em relação à lagoa Comprida.

No entanto, foi novamente observado que mesmo com a espacialidade entre sistemas, ambas as lagoas apresentaram águas supersaturadas em CO₂ como já relatado por (Cole et al., 1994; Kosten et al., 2010; Marotta et al., 2009; Sobek et al., 2005) para outros sistemas lagunares em regiões temperadas e tropicais e para lagoas costeiras da região, inclusive estas estudadas no presente trabalho segundo os resultados de (Laque, 2011).

Apesar da lagoa Comprida apresentar concentrações mais elevadas de COD (importante recurso para o metabolismo de bactérias pelágicas), este recurso, segundo (Farjalla et al., 2001) estaria acumulado na água pela baixa eficiência da alça microbiana neste sistema, principalmente pela baixa qualidade das moléculas de COD e pela limitação por P. Sendo assim, como já reportado em outros estudos, nem todos os sistemas húmicos proporcionam um ambiente ideal para a respiração pelágica, podendo ser encontrados forte redução no pCO₂ mesmo em condições de elevadas concentrações de COD quando o sistema apresenta alta produtividade primária bentônica demonstrado por (Marotta et al., 2008) na lagoa costeira Carapebus, no norte do Estado do Rio de Janeiro, e até perfis autotróficos como demonstrado por (Andersson & Brunberg, 2006) em um lago oligotrófico na Suécia e por (Laque, 2011) na lagoa costeira oligotrófica Jurubatiba. Sendo estas observações importantes para explicar nossos poucos, porém recorrentes resultados de influxo (subsaturação de CO₂ na coluna d'água) em duas estações amostradas na lagoa Comprida, onde foi observada população da macrófita submersa *Potamogeton sp.* próxima das regiões litorânea da porção fundo e limnética da porção barra nas campanhas de agosto e novembro de 2012.

Além disso, observamos que mesmo com as concentrações mais baixas de COD e P encontradas na lagoa Jurubatiba, o sistema possivelmente apresentou não só maior respiração e decomposição bentônica (devido ao elevado aporte de material orgânico depositado no sedimento), como também pode ter exibido maior respiração pelágica. Neste sistema, (Farjalla et al., 2001) já haviam reportado densidade bacteriana mais elevada em relação à lagoa Comprida, além disso, nesta lagoa também foi observada elevada mortalidade de plantas aquáticas, principalmente após o extremo evento de chuvas reportado anteriormente que pôde ser observado durante o período de coletas. Diante disso, acreditamos que com o processo de decomposição das macrófitas emersas na lagoa Jurubatiba, o sistema foi ligeiramente enriquecido com a elevação de N e P, como já proposto por Enriquez et al. (1993) e Wetzel (2001), e sinergicamente ao COD também produzido neste processo — apesar de apresentar reduzida contribuição na matéria orgânica liberada por estes vegetais (Fonseca et al., 2013), no entanto, neste caso, em larga escala (mortalidade generalizada dos estandes) — foi oferecida à comunidade de bactérias pelágicas maior riqueza de COD de diferentes fontes culminando numa provável produção ainda mais elevada de CO₂ por esta comunidade. Já foi demonstrado por (Enriquez et al., 1993) que a biodegradabilidade de COD aumenta com a elevação das concentrações de N e por (Pomeroy et al., 1995) com a elevação de P, além disso, a combinação de COD de fontes distintas no metabolismo bacteriano já foi descrita por (Findlay, 2003; Fonte et al., 2013) como importante impulsionador da biomassa e crescimento bacteriano através do uso mais eficiente das moléculas de carbono, e conseqüentemente maior liberação de CO₂.

Outra provável explicação para os resultados encontrados é o carreamento de carbono orgânico e inorgânico através do Rio Cabiúnas e do Canal Campos-Macaé. A chuva além de permitir a lavagem da restinga adjacente aos sistemas estudados, também exerce forte influência sobre a vazão dos sistemas lóticos que drenam para a lagoa Jurubatiba. Diante disso, possivelmente as rochas e solos adjacentes à montante destes sistemas sofreram lavagem e parte do carbono estocado foi escoado através dos canais. Apesar de uma fração importante deste carbono ser processada e transformada em sistemas terrestres que fornecem COD para ambientes aquáticos (Cole et al., 2007), uma parte foi levada até a desembocadura, neste caso, a lagoa Jurubatiba. Sendo assim, além do aporte de carbono orgânico, chegam formas de carbono inorgânico (ácido carbônico, bicarbonato ou carbonato) e CO₂ livre que alcançam a atmosfera por este sistema, logo maiores emissões de CO₂ por

difusão. Apesar de não termos realizado amostragem de água para caracterização da cor, na primeira campanha (junho 2012), período mais próximo do forte evento chuvoso na região, além do nível da água mais elevado, observamos coloração “barrenta” na água da lagoa Jurubatiba (Figura 27 – A e B), possivelmente pela drenagem dos canais. Já na lagoa Comprida observamos apenas a água com coloração mais escura (tom marrom) (Figura 28 – A) típica coloração da lavagem de ácidos húmicos da restinga, como já proposto por (Wetzel, 2001). Ao longo das campanhas no restante do ano a coloração da água, principalmente na lagoa Jurubatiba voltou ao tom escuro mais translúcido (Figura 27 – C e D) e a Comprida apesar de ter ficado um pouco mais clara, manteve sua cor característica marrom (Figura 28 – B). Como a alimentação do volume de água da lagoa Comprida ocorre essencialmente pela drenagem do lençol freático e através do acúmulo de água de chuva (Esteves, 2011), possivelmente ocorreu menor entrada de água e aporte de carbono majoritariamente da restinga adjacente, ao contrário da Jurubatiba que recebeu carbono de fontes distintas.

Além disso também ressaltamos que parte do CO_2 presente na água pôde ter se originado do processo de metanotrofia onde o CH_4 (naturalmente produzido em taxas elevadas na lagoa Jurubatiba (Petruzzella et al., 2013), maior ainda na condição promovida pela mortandade de macrófitas (Bianchini Jr & Cunha-Santino, 2008) na presença de oxigênio foi consumido por microrganismos gerando CO_2 , contribuindo também para a saturação mais elevada da Jurubatiba em relação ao CO_2 , uma vez que acreditamos que a produção de CH_4 foi mais elevada neste último sistema.

5.5. VARIABILIDADE ESPACIAL DOS FLUXOS TOTAIS EXTRAPOLADOS PELAS ÁREAS OBTIDAS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE IMAGEM DE SATÉLITE E INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS ABIÓTICAS NA MAGNITUDE DOS FLUXOS TOTAIS DE CH_4 E CO_2

Em relação aos fluxos totais de CH_4 , observamos que na abordagem entre regiões, todos os tratamentos apresentaram valores positivos, demonstrando que o balanço final de CH_4 , ao considerar a soma de todas as vias, foi de emissão como havíamos imaginado. Como já demonstrado nos fluxos via macrófitas e ebulitivo (os mais representativos), as regiões litorâneas foram os principais sítios emissores, no entanto, nossos resultados apontaram apenas a região litorânea da lagoa Jurubatiba como um tratamento significativamente diferente das regiões limnéticas de ambos os sistemas, enquanto que a região litorânea da lagoa Comprida, apesar de ter apresentado uma tendência a emissões mais elevadas,

margeou a mediana das regiões limnéticas e foi caracterizada com um tratamento indiferente das duas populações distintas já citadas. Possivelmente este quadro ocorreu em virtude da região litorânea da lagoa Comprida ter apresentado, no geral, menor fluxo ebulitivo em relação ao fluxo via macrófitas, uma característica que o diferiu de outros lagos rasos onde a maior parte da emissão deste gás ocorre através de bolhas (onde estas se desprendem em larga escala em sistemas rasos de até 5m de profundidade pelo efeito da pressão hidrostática que dificulta a formação de bolhas acima desta profundidade (Bastviken et al., 2004; Joyce & Jewell, 2003; Keller & Stallard, 1994)). No entanto, nem nos períodos mais críticos de inundação observamos profundidade mais elevada que esta anteriormente citada. Além disso o fluxo via macrófitas (o mais representativo para as emissões de CH₄ na lagoa Comprida) apresentou resultados muito discrepantes, sendo os mais baixos com maior frequência, o que trouxe a mediana para a base do gráfico.

Acreditamos que a lagoa Comprida, apesar de ter apresentado reduzida profundidade e conteúdo de carbono orgânico mais elevado que a Jurubatiba (características que já justificamos serem importantes reguladoras da formação e liberação de CH₄), também demonstrou baixas emissões de CH₄ para a atmosfera, principalmente por ser um sistema que apresentou pH ácido (entre 4,1 e 4,4 no presente estudo) e conteúdo de carbono orgânico no sedimento muito refratário.

Já foi observado por (Dunfield et al., 1993; Ye et al., 2012) que o pH ácido apresenta inibição significativa sobre a mineralização anaeróbica de carbono em turfeiras e áreas alagáveis no Canadá e nos Estados Unidos. Estes autores observaram um efeito direto sobre a produção de CH₄ em diferentes rotas de produção (hidrogenotrófica e acetoclástica) e indireto sobre a fermentação, e ainda destacaram que o efeito direto é mais elevado quando o sistema apresenta altas concentrações de substâncias húmicas, como a lagoa Comprida.

Foi destacado por (Esteves, 2011) que a lagoa Comprida já foi colonizada por plantas terrestres no passado. A lagoa era um fragmento da mata de restinga (Formação de Ericaceae e *Clusia*) ou mesmo da floresta que ainda apresenta resíduos dentro e fora dos limites do PARNA Jurubatiba atualmente (Caris & Kurtz, 2014). Durante a coleta de sedimento neste sistema foram encontrados pequenos fragmentos de troncos de árvores terrestres ou adaptadas à condição de encharcados. Com os movimentos de regressão e transgressão do mar nos períodos do pleistoceno e holoceno, a barra de areia bloqueou a saída de água para o mar e ao longo do tempo o aporte de água do lençol freático junto com o acúmulo de água

de chuva transformaram o local em uma lagoa (Esteves, 2011). Além disso, as elevadas concentrações de COD que atenuam fortemente a incidência solar não permitem o estabelecimento de uma densa comunidade fitoplanctônica, e poucas macrófitas colonizam o sistema (baixo acúmulo de carbono autóctone), sendo encontradas principalmente nos “braços” rasos do sistema. Portanto, acreditamos que o carbono acumulado nesta lagoa seja originado principalmente da restinga adjacente, como já referenciado anteriormente, através da percolação do solo arenoso (COD pouco biodegradável) e da vegetação terrestre que já colonizou esta localidade, mesmo considerando uma deposição de carbono da comunidade aquática atual. Este carbono inicialmente pode ter até suportado elevadas taxas de decomposição e respiração como descrito por (Abril et al., 2005) nas fases iniciais de um reservatório, no entanto, por ter sido um processo mais gradativo e por ter ocorrido a muitos anos atrás, os compostos mais refratários permaneceram ainda nas camadas de subsuperfície do sedimento, sendo estes de difícil utilização no metabolismo de microorganismos decompositores anaeróbicos, o que conseqüentemente age sobre uma taxa menor de produção de CH₄.

Já na lagoa Jurubatiba apesar dos dados também apresentarem uma ampla distribuição, os fluxos ebulitivos, substancialmente mais elevados e com maior participação no total emitido em relação a Comprida, certamente elevaram a mediana do compartimento litorâneo, somados ao fato destes fluxos ainda estarem extrapolados pela área litorânea, mais ampla na lagoa Jurubatiba. No geral, a lagoa Jurubatiba apresentou um comportamento mais semelhante quanto a contribuição dos fluxos em comparação à outros lagos rasos temperados estudados por (Bastviken et al., 2004), apesar de ter demonstrado estreita relação entre as variáveis (COD e P-total e área do lago) que regularam os fluxos totais nestes sistemas. Em contrapartida, apresentaram forte relação com algumas das variáveis que regularam os fluxos em lagos tropicais (C total no sedimento e presença de macrófitas nas margens) (Bastviken et al., 2010).

No primeiro trabalho os autores apontaram influencia principalmente do aporte de COD alóctone, enquanto nossos resultados, de acordo com as variáveis selecionadas pelo critério de Akaike, apresentaram-se mais condizentes ao resultado encontrado no segundo trabalho, e apontaram forte influência do aporte de carbono autóctone oriundo das macrófitas aquáticas (COT-SED mais elevado e profundidade reduzida em regiões litorâneas). Além disso, a análise também destacou variáveis mais elevadas nas regiões litorâneas em dois

extremos do sistema (COD mais elevado na barra devido a maior decomposição inicial de macrófitas e condutividade pouco mais elevada no fundo, devido a lavagem exercida pelo Rio Cabiúnas tanto no seu curso quanto no canal de entrada na porção do fundo da Jurubatiba). Já os fluxos totais de CH₄ na lagoa Comprida, apesar do baixo coeficiente de determinação, foram também regulados pela baixa profundidade e maior acúmulo de COT-SED das regiões litorâneas, no entanto, estes não foram vinculados a elevados fluxos ebulitivos e sim por estas regiões apresentarem o fluxo via macrófitas, onde foi a rota principal de passagem de CH₄ para atmosfera.

A alta variabilidade espacial nos fluxos totais de CH₄ em virtude da ocorrência de estações, geralmente colonizados por macrófitas emersas com elevadas emissões por bolhas, significativamente superiores às outras estações, geralmente com ausência destes vegetais, no mesmo sistema já foi observada por Bastviken et al (2010) em lagos tropicais no Pantanal. De acordo com os autores esta espacialidade intralagunar ocorre devido as consequências dos processos de formação, oxidação e liberação de bolhas. Como observamos forte influência das variáveis limnológicas e atmosféricas em nossas estimativas de fluxos, sendo estas já descritas pela literatura como candidatas a forte efeito sobre os processos descritos anteriormente (por exemplo profundidade por Keller & Stallard (1994); pressão atmosférica por Mattson & Likens (1990); conteúdo orgânico do sedimento por Bastviken et al (2010); COD por Bastviken et al (2004), nossos resultados encontram-se de acordo com o observado por outros autores, no entanto, com valores totais mais baixos que sistemas amazônicos (Bartlett et al., 1990; Belger et al., 2011; Devol et al., 1988) e pantaneiros (Bastviken et al., 2010; Marani & Alvalá, 2007). Sendo assim, mesmo com o elevado aporte de matéria orgânica nestas lagoas, principalmente devido ao efeito das chuvas sobre a comunidade de macrófitas, estas não se enquadram como grandes emissoras de CH₄ para a atmosfera de acordo com os resultados de outros sistemas tropicais.

Nossas estimativas extrapoladas pelas áreas totais de cada sistema em 2012 (Comprida= 0,235km² e Jurubatiba= 0,827km²) considerando os dois compartimentos estudados na abordagem regional (Comprida= 2,15 kg CH₄.d⁻¹ e Jurubatiba= 18,35 kg CH₄.d⁻¹) apresentaram-se cerca de 14 e 6 vezes menores, nas lagoas Comprida e Jurubatiba respectivamente, que as estimativas encontradas por (Bastviken et al., 2010) em lagos tropicais no Pantanal, por m². No entanto, estes autores extrapolaram seus dados para uma área de 38.880km² pelo elevado número de amostragens em lagos com características

diferentes, proporcionando uma extrapolação maior dos dados, que eleva esta comparação para valores na ordem de 2.000.000 e 300.000 vezes menores que os fluxos encontrados no Pantanal. Contudo, nosso objetivo não foi extrapolar nossos dados para regiões mais amplas (como lagoas húmicas do estado do Rio de Janeiro ou das restingas do Brasil), sendo assim a partir das emissões por m² foi possível observar que as lagoas costeiras são fontes importantes de CH₄ para a atmosfera, no entanto, numa escala local ou até “regional”, principalmente após a forte inundação das regiões colonizadas por plantas aquáticas emersas.

Em relação aos fluxos totais de CO₂, nossos resultados indicaram ausência de variabilidade espacial intralagunar e apontaram diferenças significativas entre as regiões limnéticas da lagoa Comprida e Jurubatiba, possivelmente pelo aporte de carbono orgânico e inorgânico autóctone e alóctone ter sido mais elevado na Jurubatiba, o que impulsionou os processos de degradação de carbono nas regiões pelágicas e bentônicas. Como os fluxos difusivos responderam por quase a totalidade nestes ambientes, estes tratamentos (regiões limnéticas de ambas as lagoas) são os retratos do que já foi discutido a respeito dos fluxos difusivos de CO₂ impulsionado pela área limnética da lagoa Jurubatiba (3,75 vezes maior), que anteriormente apresentavam apenas uma tendência de fluxos mais elevados, agora nesta abordagem foram significativamente diferentes.

Apesar de semelhantes estatisticamente, os tratamentos litorâneos de ambas as lagoas apresentaram distribuição de dados distintas, e foram um reflexo dos fluxos via macrófitas que haviam apresentado perfil autotrófico (próximos da neutralidade), no entanto, neste caso, foram impulsionados pelos elevados fluxos difusivos nestes compartimentos, culminando em perfis heterotróficos (Mediana Comprida Lit= 2,96 kg CO₂.d⁻¹; mediana Jurubatiba Lit= 96,31 kg CO₂.d⁻¹). A região litorânea da lagoa Comprida apresentou mediana que tange o balanço neutro e o tratamento da Jurubatiba, apesar de ter apresentado os valores mais elevados de sequestro, exibiu perfil de fonte de CO₂ para a atmosfera, neste caso ainda extrapolado pela área. Novamente destacamos que estes resultados demonstraram o oposto do que era esperado, principalmente quanto aos efluxos via macrófitas. Contudo, vinculamos este resultado ao estado de senescência apresentados pelas macrófitas, as quais poderiam ser importantes consumidoras de CO₂ atmosférico.

Diante disso, nossos fluxos totais de CO₂ se encaixam ao perfil heterotrófico já observado por (Marotta et al., 2009) ao considerar apenas as regiões limnéticas, que destacam os lagos tropicais, no geral, como ecossistemas fonte de carbono para a atmosfera

devido as elevadas temperaturas nos trópicos e o intenso metabolismo do COD alóctone que suportam a frequente supersaturação de CO₂ independente do período do ano.

Apesar de apresentarem semelhanças quanto ao perfil heterotrófico apresentado, (Kosten et al., 2010; Marotta et al., 2009) apontam a temperatura como um forte fator regulador na elevação do pCO₂ entre lagos tropicais estudados numa abordagem latitudinal. Intralagunariamente esta variável não foi selecionada pela nossa análise do critério de Akaike devido, possivelmente, a pequena variação da temperatura da água entre estações no mesmo sistema.

Na lagoa Comprida, as variáveis com maior poder de explicação selecionadas pelo critério de Akaike foram tão semelhantes intralagunariamente (Menos que 2% de diferença entre as médias e com amplitudes também semelhantes) nas abordagens regionais e continentais que a seleção de modelos pode ter explicado somente o acaso. Contudo, ainda pode não ter explicado a regulação da variabilidade espacial dos fluxos totais pela ausência de um modelo regulador, dentre aqueles que trabalhamos, diante da homogeneidade apresentada entre todos os fluxos (três vias) de CO₂ neste ecossistema.

Na lagoa Jurubatiba, apesar do R² baixo, a clo-*a* (inversamente relacionada) reduzida nas porções da barra onde houve maior aporte de COD e COT-SED (diretamente relacionados) devido a lixiviação de plantas aquáticas, parece demonstrar que a produção de carbono autóctone ofereceu maior suporte aos fluxos totais de CO₂ e que o carbono alóctone com elevado aporte nas estações do fundo (Rio Cabiúnas) e do centro (canal Campos-Macaé) foram menos eficientes para impulsionar os fluxos deste gás. No entanto, é importante destacar que os estandes de macrófitas aquáticas que apresentaram maiores influxos de CO₂ (sequestro) sofreram menor grau de impacto em seu metabolismo em um gradiente barra-continente. Sendo assim, poderíamos pensar que a produtividade primária da comunidade pelágica poderia oferecer maior suporte ao consumo de CO₂ na água nestas porções. Contudo, nossos dados de fluxo difusivo não demonstraram esta condição diante dos valores medianos mais elevados encontrados na porção do fundo, ou seja, maior emissão de CO₂ pela água. Ao considerar o fluxo via macrófitas, detectamos que devido a menor instabilidade dos estandes localizados no fundo (mediana corresponde a sequestro de CO₂) estes estariam reduzindo o balanço final de emissão, e assim os fluxos foram relacionados (inversamente) com a clo-*a*, porém com pouco sentido ecológico e fraqueza estatística, diante do horário em que as

amostragens foram realizadas onde a comunidade fitoplanctônica deveria estar, como indica os modelos, reduzindo a elevada emissão de CO₂ e não contribuindo com a mesma.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimativas totais geradas no presente trabalho são extrapolações baseadas em dados de estações amostrais onde procuramos obter o retrato da heterogeneidade exibida pelos ambientes estudados. Assim, procuramos abranger as regiões limnéticas e litorâneas em um gradiente continental para estimar o balanço de carbono entre as duas abordagens consideradas mais importantes quanto a exibição de mecanismos e processos que regulam o metabolismo aquático nestas lagoas costeiras. Apesar da falta de exibição de um gradiente de salinidade, a abordagem continental mostrou em alguns fluxos forte influência sobre a variabilidade espacial, demonstrando que a presença do oceano (separado por uma faixa de areia) em um dos extremos da lagoa e de um rio (no caso da lagoa Jurubatiba) no outro em conjunto com as modificações realizadas por estes sistemas ao longo do processo de gênese e transformação das lagoas estudadas, é muito maior do que apenas um gradiente de salinidade. Isso pôde ser observado nos nossos resultados pela variação espacial na suscetibilidade aos ventos, profundidade, COT-SED, distribuição de plantas aquáticas, entre outras variáveis abióticas e bióticas e inferido de acordo com a literatura e com observações de campo através da granulometria, batimetria, aporte de carbono inorgânico, entre outros. No entanto, os sistemas podem ser mais heterogêneos ao considerar outros habitats (menos representativos), e ainda mais ao considerar a variabilidade interanual. Como nossos dados retrataram um período específico de reestruturação de um ambiente (exibido pela comunidade que acreditamos ser uma das maiores responsáveis direta e indiretamente pelo balanço ou pelos processos que regem este balanço nestes ambientes rasos) após um evento climático extremo, que como já proposto por (Coops et al., 2003) dependendo da escala do distúrbio geralmente é um processo de reestruturação gradativo e tardio, nossos valores podem superestimar ou subestimar os fluxos em períodos de estabilidade ecossistêmica. Porém, acreditamos que são robustos quanto a magnitude do balanço e que são expressivos em retratos do ambiente em ciclos aperiódicos após fortes eventos de precipitação, que ocorrem na região como o verão dos anos de 2008 e 2012 e que diante de cenários de mudanças climáticas previstas para estas regiões, podem ser ou não mais frequentes (Greve et al., 2014).

Diante disso, estimamos que os fluxos totais, ou seja, a soma dos balanços dos transportes difusivos, ebulitivos e via macrófitas aquáticas emersas (quando aplicáveis) correspondam aos valores representativos do período estudado (2012-2013) e também das estimativas de 2008 que retratam possivelmente uma resposta semelhante do ecossistema, talvez em um grau ainda mais alto, por conta da retração ainda maior da região litorânea. Apesar disso, nestas duas estimativas ainda não estudamos o potencial de emissão de regiões que nos períodos anteriores eram amplos estandes de plantas aquáticas emersas e com o aumento do nível da água aparentavam ser limnéticas para a classificação sugerida até o momento, ou seja, uma área aberta que apresentava elevada deposição de macrófitas aquáticas emersas mortas no sedimento, que dentre as variáveis estudadas foi uma das principais reguladoras da magnitude de emissão de CH_4 , e que apresentou-se, parte do ano, como uma área limnética tradicional. Com os dados referentes a estação M4 da lagoa Jurubatiba conseguimos ver este comportamento, em uma estação com reduzida colonização de plantas aquáticas (extrema fragmentação), poucos vegetais que pudessem intermediar a emissão de CH_4 e o balanço de CO_2 , no entanto, a coluna d'água (aberta) emitia CH_4 , principalmente por bolhas, na mesma magnitude das regiões litorâneas de fato, configurando-se num possível terceiro habitat quanto à este fluxo.

É importante destacar que acreditamos que nosso período de amostragem seja um extremo em relação ao natural do ecossistema baseado em relatos de cerca de 35 anos de estudos limnológicos e de dados meteorológicos das recentes estações meteorológicas instaladas próximas das lagoas da região. No entanto, mais estudos abrangendo o aporte de carbono orgânico numa elevada escala temporal certamente iriam possibilitar inferir se este aporte de carbono para a atmosfera vem ocorrendo em ciclos mais frequentes.

Já em relação as estimativas de 2011, com o aumento das áreas colonizadas por macrófitas devido a diminuição da profundidade, nossas extrapolações estariam muito aquém do retrato do ambiente, principalmente quanto ao fluxo destes vegetais. Possivelmente o estresse causado pela interrupção das trocas gasosas e conseqüentemente as elevadas taxas de mortalidade não iriam ocorrer em escala generalizada, sendo assim, acreditamos que estes vegetais teriam maior participação nos fluxos de CH_4 via aerênquima e substancialmente no sequestro de carbono atmosférico (influxo de CO_2) para manutenção do seu metabolismo. Ou seja, acreditamos que as taxas de sequestro amostradas no nosso trabalho não são condizentes com o sequestro realizado nestas condições, principalmente quando esta

comunidade já está bem estabelecida e as taxas de sequestro apresentam-se exponencialmente mais elevadas como o que foi observado por (Belarmino, 2013).

Mesmo com a menor pressão hidrostática, estes vegetais iriam proporcionar maior oxigenação no sedimento e possivelmente as taxas de emissões por bolhas não seriam tão elevadas. Além disso, o próprio vento poderia exercer maior influência sobre uma coluna d'água menos espessa, oxigenando ainda mais o sedimento ou despreendendo mais bolhas e assim possivelmente influenciando no balanço de CH₄.

No entanto, destacamos que no período do verão amostrado por (Gripp, 2011) onde as regiões litorâneas da lagoa Jurubatiba ocupavam cerca de 60% da área total, segundo o autor, o que corresponde a nossa classificação de 2011 (a qual acreditamos ser um reflexo de elevada estiagem), este sistema emitiu ainda mais CH₄ através de bolhas. Este autor apresentou valores médios de 226,6 (±172) mg CH₄.m⁻².d⁻¹ (cerca de cinco vezes mais elevados que a mediana apresentada em nosso estudo) nos estandes destes vegetais, o que também corresponde aos valores próximos das nossas estimativas restritas aos meses próximos do verão (novembro de 2012 e abril de 2013) nas estações da porção da barra da Jurubatiba. Diante disso, acreditamos que outros fatores (climatológicos e limnológicos) exibidos em um período de estiagem também podem impulsionar a emissão de CH₄ por bolhas, dentre estes, a própria dinâmica de aporte de carbono orgânico vinculada aos estágios sucessionais naturais, como a morte e rebrotamento, numa escala menos extrema, no entanto, frequente. Somado à isso, a excreção em larga escala destes vegetais também poderia promover condição para que estes ambientes se tornassem favoráveis a produção e emissão de CH₄.

Em relação ao CO₂, o COD originado da restinga seria possivelmente menos carregado para as lagoas, resultado que já foi observado por (Farjalla et al., 2002; Marotta et al., 2008) nas lagoas húmicas da região em períodos de estiagem, sendo assim, menor riqueza em compostos orgânicos para a respiração bentônica e pelágica. Outro fator importante seria a ocorrência de extensos estandes de macrófitas aquáticas submersas do gênero *Potamogeton sp.*, como já foi observado por Figueiredo-Barros (comunicação pessoal) em períodos de intensa estiagem no monitoramento limnológico das lagoas da região, sendo este quadro um possível impulsionador da produtividade primária destas lagoas. No geral, estes e outros fatores possivelmente iriam reduzir as emissões de CO₂ por difusão em alguns compartimentos, podendo até estabelecer um perfil mais autotrófico durante o dia nos ecossistemas estudados. Apesar disso, a decomposição aeróbica à partir da excreção das

macrófitas aquáticas, a incidência solar mais forte e menos interrompida por nuvens num período de estiagem mais extremo agindo diretamente sobre as moléculas do COD seriam condições para a elevação da produção de CO₂, sendo assim, a realização de amostragens neste período distinto seria o ideal para contribuir com estimativas mais robustas quanto aos processos que exercem maior influência sobre o metabolismo aquático. Como já demonstrado por (Laque, 2011) ao estudar a dinâmica do pCO₂ nas lagoas costeiras da região norte fluminense, estes ambientes apesar de apresentarem maior variabilidade num aspecto espacial, também exibem variabilidade temporal quanto a magnitude da saturação de CO₂, o que possivelmente pode regular os fluxos para atmosfera ao longo do tempo.

Portanto, estes, dentre muitos outros fatores poderiam mudar drasticamente o que observamos durante o período de coleta do presente estudo, sendo assim, acreditamos que as estimativas, principalmente para o período de 2011, devem ser consideradas com atenção pois poderiam ser inadequadas ao superestimar ou subestimar as emissões de carbono nestes sistemas.

Neste contexto, destacamos a importância da utilização das imagens de satélite referentes às coberturas do período de coleta e de regimes pluviométricos distintos. Na literatura atual (Abril et al., 2014; Bastviken et al., 2010; Belger et al., 2011) entre outros, este recurso é amplamente utilizado neste âmbito do saber, pois possibilita estimar o grau de influência de habitats ou sistemas monitorados desde uma pequena escala mais detalhada (geralmente local) até uma escala mais ampla (regional e até global) dependendo da área e questão que se deseja trabalhar.

No presente trabalho, as informações combinadas entre os dados meteorológicos do INMET e da classificação gerada através da parceria com a EMBRAPA Monitoramento por Satélite nos subsidiou ampla informação quanto a dinâmica de inundação destes ecossistemas aquáticos e das respostas da importante comunidade de macrófitas aquáticas emersas na ciclagem de carbono frente as modificações no nível da coluna d'água. Sem estas imagens não seria possível fazer uma extrapolação adequada dos dados para a área total e principalmente delinear as áreas ocupadas por dois compartimentos distintos quanto ao balanço destes gases. Além disso, foi um suporte fundamental para observar as mudanças nos estandes de macrófitas emersas diante do regime de chuvas e nos permitiu ainda recomendar um estudo mais amplo em que se pudesse obter o retrato de períodos de forte estiagem para a dinâmica da colonização destes vegetais e suas possíveis respostas sobre a ciclagem de carbono.

Em relação a metodologia empregada sugerimos a importância de reduzir a amostragem por difusão na coluna d'água e ampliar a utilização de funis invertidos para os fluxos de CH₄ devido sua capacidade de amostrar com maior eficácia os fluxos ebulitivos diante da grande expressividade destes fluxos em regiões limnéticas e litorâneas, além de junto com as macrófitas corresponderem a mais de 90% do balanço final de CH₄ nas lagoas estudadas. Como já foi demonstrados por (Belger et al., 2011) estes amostradores conseguem captar a emissão por bolhas diante da eventualidade do desprendimento das mesmas, onde os autores demonstraram que as câmaras flutuantes utilizadas com periodicidade semelhantes as nossas, só captaram 7% dos fluxos estimados por bolhas após aplicar a correção do tempo de amostragem. No entanto, as câmaras flutuantes já foram utilizadas em alguns estudos na bacia amazônica como os trabalhos de (Devol & Richey, 1990; Rosenqvist et al., 2002) para estimativas do fluxo ebulitivo e possivelmente não foram capazes de captar a expressividade das bolhas e os fluxos podem ter sido consequentemente subestimados. Além disso, apontamos a necessidade de espalhar amplamente estes funis no sistema, ao invés de apenas centralizar as amostragens em pontos de coleta distintos, com o objetivo de captar a variabilidade espacial dos micro habitats (como áreas abertas que foram litorâneas, outros estandes de macrófitas menos expressivos, entre outros) e alcançar maior número de réplicas que não se caracterizem como subamostragens, apesar de sua importância na robustez dos dados.

Ainda sobre a metodologia, destacamos a importância das amostragens diurnas e noturnas, que apesar de não termos observado variabilidade quanto aos fluxos de CH₄ ao longo do período amostrado, observamos elevada variação quanto aos fluxos de CO₂ ao longo do dia. Sendo assim, para uma compilação de dados diários (conforme sugerimos em nossos resultados) seria mais adequado obter não só a variação existente em períodos de maior e menor incidência luminosa (como foi amostrado), mas também obter a resposta da prevalência da respiração sobre a fotossíntese durante cerca de 10 à 12 horas do período noturno.

7. CONCLUSÕES

Os fluxos via macrófitas foram àqueles que mais contribuíram com as emissões de CH₄ na lagoa Comprida e os fluxos ebulitivos foram àqueles que mais contribuíram com as emissões de CH₄ na lagoa Jurubatiba, sendo em conjunto, responsáveis por mais de 90% do total de CH₄ emitido em ambos os sistemas.

A difusão de CO₂ através da coluna d'água foi responsável por mais de 99% da emissão total deste gás em ambas as lagoas estudadas.

A fixação de CO₂ via macrófitas aquáticas foi expressiva, porém numa escala reduzida em relação ao que era esperado, no balanço final de carbono.

A região litorânea de ambas as lagoas (cerca de 45% e 42% das áreas totais das lagoas Comprida e Jurubatiba, respectivamente, considerando o ano de 2012) impulsionaram significativamente a emissão final ao exibir um perfil heterotrófico demonstrado através dos elevados valores de emissão de CO₂. Portanto, lagoas costeiras rasas com ampla colonização de macrófitas aquáticas emersas podem agir como fontes de carbono em períodos de ampla senescência destes vegetais.

Observamos que a lagoa Jurubatiba apresentou uma tendência em emitir mais carbono para a atmosfera em relação à lagoa Comprida, não só pela sua área mais ampla, mas também ao considerar as estimativas por m².

Estimamos que mesmo considerando o elevado aporte de carbono alóctone parcialmente mineralizado e transportado para a atmosfera através das lagoas, que inicialmente não foi produzido nas mesmas. A matéria orgânica autóctone, oriunda das macrófitas aquáticas após o extremo evento de cheia das lagoas, foi a principal fonte de carbono para as elevadas emissões, principalmente em regiões litorâneas.

Foi observado efeito direto e indireto do regime de precipitação e da pressão atmosférica sobre a magnitude dos fluxos de CH₄ e CO₂ nas duas lagoas estudadas, como a possível regulação do desprendimento de bolhas do sedimento e do estágio sucessional das macrófitas aquáticas.

Apesar das macrófitas aquáticas emersas alcançarem níveis de sequestro elevados (suficientes até para cobrir a própria emissão desta comunidade somada às emissões de CO₂ por difusão e por bolhas em todo o sistema) em compartimentos em que estes vegetais apresentaram-se com metabolismo estável (menor interrupção de trocas gasosas e ausência de desprendimento do sedimento) como as estimativas referentes aos estandes da porção do

fundo das lagoas. Ainda assim, não seriam suficientes para cobrir as elevadas taxas de respiração e decomposição de vegetais em processo de senescência e as emissões de CH₄ no âmbito do balanço de carbono, menos ainda, em potencial de aquecimento global. Portanto, os ecossistemas foram considerados fontes de carbono para a atmosfera.

REFERÊNCIAS

- Abril, G., Guérin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C., Gosse, P., et al., 2005. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochem. Cycles* 19, 1–16.
- Abril, G., Martinez, J.-M., Artigas, L.F., Moreira-Turcq, P., Benedetti, M.F., Vidal, L.O., et al., 2014. Amazon River carbon dioxide outgassing fuelled by wetlands. *Nature* 505, 395–8.
- Alcaide, R.L.M., & Forti, M.C., 2012. Manual De Procedimentos Do Analisador De Carbono Total Toc-Vcpn, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos.
- Algesten, G., Sobek, S., Bergström, A.-K., Agren, A., Tranvik, L.J., & Jansson, M., 2003. Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone. *Glob. Chang. Biol.* 10, 141–147.
- Alvalá, P.C., Kirchhoff, V.W.J.H., & Pavão, H.G., 1999. Metano Na Atmosfera. *Biotechnol. Ciência Desenvol.* 2, 39–43.
- Amado, A.M., 2008. Foto-Degradação Da Matéria Orgânica Dissolvida Em Lagoas Costeiras Tropicais E Suas Interações Com A Degradação Bacteriana. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia. Tese de Doutorado. p.169.
- Amado, A.M., Farjalla, V.F., Esteves, F.D. a, Bozelli, R.L., Roland, F., & Enrich-Prast, A., 2006. Complementary Pathways Of Dissolved Organic Carbon Removal Pathways In Clear-Water Amazonian Ecosystems: Photochemical Degradation And Bacterial Uptake. *FEMS Microbiol. Ecol.* 56, 8–17.
- Andersson, E., & Brunberg, A.K., 2006. Net autotrophy in an oligotrophic lake rich in dissolved organic carbon and with high benthic primary production. *Aquat. Microb. Ecol.* 43, 1–10.
- Armstrong, W., & Drew, M.C., 2002. Root Growth And Metabolism Under Oxygen Deficiency. *Plant Roots Hidden Half* 729–761.
- Ballester, M.V.R., & Santos, J.E. Dos, 2001. Biogenic gases in tropical floodplain river. *Brazilian Arch. Biol. Technol.* 44, 141–147.
- Barros, N., Cole, J.J., Tranvik, L.J., Prairie, Y.T., Bastviken, D., Huszar, V.L.M., del Giorgio, P., & Roland, F., 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nat. Geosci.* 4, 593–596.
- Bartlett, K.B., Bartlett, D.S., Harriss, R.C., & Sebacher, D.I., 1987. Methane emissions along a salt marsh salinity gradient. *Biogeochemistry* 4, 183–202.
- Bartlett, K.B., Crill, P., Bonassi, J.A., Richey, J.E., & Harriss, R.C., 1990. Methane flux from the Amazon River floodplain: Emissions during rising water. *J. Geophys. Res.* 95, 16773–16788.
- Bartlett, K.B., & Harriss, R.C., 1993. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere* 26, 261–320.

- Bastviken, D., Cole, J.J., Pace, M., & Tranvik, L.J., 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochem. Cycles* 18, n/a–n/a.
- Bastviken, D., Cole, J.J., Pace, M.L., & Van de Bogert, M.C., 2008. Fates Of Methane From Different Lake Habitats: Connecting Whole-Lake Budgets And CH₄ Emissions. *J. Geophys. Res.* 113, 1–13.
- Bastviken, D., Santoro, A.L., Marotta, H., Pinho, L.Q., Calheiros, D.F., Crill, P., & Enrich-Prast, A., 2010. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environ. Sci. Technol.* 44, 5450–5.
- Bazhin, N.M., 2004. Influence of plants on the methane emission from sediments. *Chemosphere* 54, 209–215.
- Belarmino, M.G., 2013. O Sequestro De Carbono Por Rametes De *Typha Domingensis* Pers. (Typhaceae) No Contexto De Adaptação E Mitigação Das Mudanças Climáticas. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Sócio-ambiental de Macaé - UFRJ. Dissertação de Mestrado. p.74.
- Belger, L., 2007. Fatores Que Influem Na Emissão De CO₂ e CH₄ Em Áreas Alagáveis Interfluviais Do Médio Rio Negro. Universidade Federal do Amazonas. Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia. Tese de Doutorado. p.93.
- Belger, L., Forsberg, B.R., & Melack, J.M., 2011. Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River basin, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 171–183.
- Belshe, E.F., Schuur, E. a G., & Bolker, B.M., 2013. Tundra ecosystems observed to be CO₂ sources due to differential amplification of the carbon cycle. *Ecol. Lett.* 16, 1307–15.
- Bergström, I., Mäkelä, S., Kankaala, P., & Kortelainen, P., 2007. Methane efflux from littoral vegetation stands of southern boreal lakes: An upscaled regional estimate. *Atmos. Environ.* 41, 339–351.
- Bianchini Jr, I., & Cunha-Santino, M., 2008. As rotas de liberação do carbono dos detritos de macrófitas aquáticas. *Oecologia Bras.* 12, 20–29.
- Bini, L.M., 2004. Análises Multivariadas e Limnologia, in: Bicudo, C.E. de M., & Bicudo, D. de C. (Eds.), *Amostragem Em Limnologia*. RiMa, São Carlos-SP, p. 371.
- Bonneville, M.-C., Strachan, I.B., Humphreys, E.R., & Roulet, N.T., 2008. Net ecosystem CO₂ exchange in a temperate cattail marsh in relation to biophysical properties. *Agric. For. Meteorol.* 148, 69–81.
- Bove, C.P., & Paz, J., 2009. Guia de campo das plantas aquáticas do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, Rio de Janeiro, Brasil, 1st ed. Museu Nacional/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Bridgham, S.D., Megonigal, J.P., Keller, J.K., Bliss, N.B., & Trettin, C., 2006. The Carbon Balance of North American Wetlands. *Wetlands* 26, 889–916.
- Brix, H., Sorrel, B.K., & Orr, P.T., 1992. Internal Pressurization And Convective Gas Flow In Some Emergent Freshwater Macrophytes. *Limnol. Oceanogr.* 37, 1420–1433.

- Brix, H., Sorrell, B.K., & Lorenzen, B., 2001. Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? *Aquat. Bot.* 69, 313–324.
- Burnham, K.P., & Anderson, D.R., 2004. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociol. Methods Res.* 33, 261–304.
- Butman, D., & Raymond, P. a., 2011. Significant efflux of carbon dioxide from streams and rivers in the United States. *Nat. Geosci.* 4, 839–842.
- Caliman, A., Carneiro, L.S., Santangelo, J.M., Guariento, R.D., Pires, A.P.F., Suhett, A.L., et al., 2010. Temporal coherence among tropical coastal lagoons: a search for patterns and mechanisms. *Brazilian J. Biol.* 70, 803–814.
- Caris, E., & Kurtz, B., 2014. Vegetation cover and land use of a protected coastal area and its surroundings, southeast Brazil. *Rodriguésia* 64, 747–755.
- Carmichael, M.J., Bernhardt, E.S., Bräuer, S.L., & Smith, W.K., 2014. The Role Of Vegetation In Methane Flux To The Atmosphere: Should Vegetation Be Included As A Distinct Category In The Global Methane Budget? *Biogeochemistry* 119, 1–24.
- 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, 1–19.
- Chanton, J.P., Martens, C.S., & Kelley, C. a., 1989. Gas transport from methane-saturated, tidal freshwater and wetland sediments. *Limnol. Oceanogr.* 34, 807–819.
- Chanton, J.P., Whiting, G.J., Happell, J.D., & Gerard, G., 1993. Contrasting rates and diurnal patterns of methane emission from emergent aquatic macrophytes. *Aquat. Bot.* 46, 111–128.
- Cole, J., Caraco, N., Kling, G., & Kratz, T., 1994. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. *Science* (80-.). 265, 1568–1570.
- Cole, J.J., Pace, M.L., Carpenter, S.R., & Kitchell, J.F., 2000. Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations. *Limnol. Oceanogr.* 45, 1718–1730.
- Cole, J.J., Prairie, Y.T., Caraco, N.F., McDowell, W.H., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., et al., 2007. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems* 10, 172–185.
- Coops, H., Beklioglu, M., & Crisman, T.L., 2003. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems – workshop conclusions. *Hydrobiologia* 506-509, 23–27.
- Costa, M.P.F., Niemann, O., Novo, E., & Ahern, F., 2002. Biophysical properties and mapping of aquatic vegetation during the hydrological cycle of the Amazon floodplain using JERS-1 and Radarsat. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1401–1426.
- Deshmukh, C., Serça, D., Delon, C., Tardif, R., Demarty, M., Jarnot, C., et al., 2014. Physical controls on CH₄ emissions from a newly flooded subtropical freshwater hydroelectric reservoir: Nam Theun 2. *Biogeosciences Discuss.* 11, 3271–3317.

- Devol, A., & Richey, J., 1990. Seasonal dynamics in methane emissions from the Amazon River floodplain to the troposphere. *J. Geophys. Res.* 95, 16417–16426.
- Devol, A., Richey, J., Clark, W., Kin, S., & Martinelli, L., 1988. Methane emissions to the troposphere from the Amazon floodplain. *J. Geophys. Res.* 93, 1583–1592.
- Ding, W., Cai, Z., Tsuruta, H., & Li, X., 2003. Key factors affecting spatial variation of methane emissions from freshwater marshes. *Chemosphere* 51, 167–173.
- Downing, J.A., Prairie, Y.T., Cole, J.J., Duarte, C.M., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., et al., 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnol. Oceanogr.* 51, 2388–2397.
- Duan, X.N., Wang, X.K., Mu, Y.J., & Ouyang, Z.Y., 2005. Seasonal and diurnal variations in methane emissions from Wuliangsu Lake in arid regions of China. *Atmos. Environ.* 39, 4479–4487.
- Duc, N.T., Crill, P., & Bastviken, D., 2010. Implications Of Temperature And Sediment Characteristics On Methane Formation And Oxidation In Lake Sediments. *Biogeochemistry* 100, 185–196.
- Dunfield, P., Knowles, R., Dumont, R., & Moore, T., 1993. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH. *Soil Biol. Biochem.* 25, 321–326.
- Engle, D., & Melack, J.M., 2000a. Methane emissions from an Amazon floodplain lake: Enhanced release during episodic mixing and during falling water. *Biogeochemistry* 51, 71–90.
- Engle, D., & Melack, J.M., 2000b. Methane Emissions From An Amazon Floodplain Lake: Enhanced Release During Episodic Mixing And During Falling Water. *Biogeochemistry* 51, 71–90.
- Enrich-Prast, A., Bozelli, R.L., Esteves, F.A., & Meirelles, F.P., 2004. Lagoas Costeiras da Restinga de Jurubatiba: Descrição de suas variáveis limnológicas, in: Rocha, C.F.D., Esteves, F.D.A., & Scarano, F.R. (Eds.), *Pesquisas de Longa Duração Na Restinga de Jurubatiba: Ecologia, História Natural E Conservação*. RiMa, São Carlos-SP, p. 475.
- Enriquez, S., Duarte, C., & Sand-Jensen, K., 1993. Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C: N: P content. *Oecologia* 94, 457–471.
- Esteves, F.D.A., 2011. *Fundamentos de Limnologia*, 3rd ed. Interciência, Rio de Janeiro.
- Faria, B.M., & Esteves, F.D.A., 2001. Dissolved Organic Carbon In Two Brazilian Coastal Lagoons : Sources And Utilization For Heterotrophic Bacteria. *Oecologia Bras.* IX, 57–64.
- Farjalla, V.F., Amado, A.M., Suhett, A.L., & Meirelles-Pereira, F., 2009. DOC removal paradigms in highly humic aquatic ecosystems. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 16, 531–8.
- Farjalla, V.F., Enrich-Prast, A., Esteves, F.A., & Cimleris, A.C.P., 2006. Bacterial growth and DOC consumption in a tropical coastal lagoon. *Braz. J. Biol.* 66, 383–392.
- Farjalla, V.F., Faria, B.M., & Esteves, F.A., 2002. The relationship between DOC and planktonic bacteria in tropical coastal lagoons. *Arch. Fur Hydrobiol.* 156, 97–119.

- Farjalla, V.F., Faria, B.M., Esteves, F.D.A., & Bozelli, R.L., 2001. Bacterial Density And Biomass, And Relations With Abiotic Factors, In 14 Coastal Lagoons Of Rio De Janeiro State. *Oecologia Bras.* IX, 65–76.
- Fechner-Levy, E.J., & Hemond, H.F., 1996. Trapped methane volume and potential effects on methane ebullition in a northern peatland. *Limnol. Oceanogr.* 41, 1375–1383.
- Felix, R.W., 2012. Estrutura e Distribuição da Comunidade de Macroinvertebrados Bentônicos em Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Laboratório de Ciências Ambientais - UENF & Nucleo em Ecologia e Desenvolvimento Sócio-ambiental de Macaé - UFRJ. Monografia. p.57.
- Fenchel, T., King, G.M., & Blackburn, T.H., 1998. Bacterial biogeochemistry: the ecophysiology of mineral cycling, *Bacterial biogeochemistry*.
- Fendinger, N.J., Adams, D.D., & Glotfelty, D.E., 1992. The role of gas ebullition in the transport of organic contaminants from sediments. *Sci. Total Environ.* 112, 189–201.
- Ferreira, C.L., 1988. A importância da região colonizada por macrófitas aquáticas na mitigação da degradação sanitária da lagoa imboassica, in: Esteves, F.D.A. (Ed.), *Ecologia Das Lagoas Costeiras Do Parque Nacional Da Restinga de Jurubatiba E Do Município de Macaé (RJ)*. NUPEM/UFRJ, Macaé, pp. 391–399.
- FIDERJ, 1977. Estudos para o planejamento ambiental. Rio de Janeiro.
- Figueiredo-Barros, M.P., 2008. Efeito Da Variabilidade Espaço-Temporal E Bioturbação Por Invertebrados Bentônicos Na Concentração E Emissão De Metano (Ch₄) Em Ecossistemas Aquáticos Continentais. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia. Tese de Doutorado. p.171.
- Findlay, S., 2003. Bacterial Response to Variation in Dissolved Organic Matter. *Aquat. Ecosyst.* 363–379.
- Fisher, C.F., Arruda, M.B., & Nunes, M.F.S.Q. da C., 2005. Plano De Manejo Do Parque Nacional Da Restinga De Jurubatiba. Rio de Janeiro.
- Fonseca, A.L. dos S., 2005. Metanogênese Em Uma Lagoa Costeira Tropical Colonizada Por Macrófitas Aquáticas E Sua Regulação Pela Disponibilidade De Acetato E Sulfato. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia. Dissertação de Mestrado. p.96.
- Fonseca, A.L. dos S., Minello, M., Marinho, C.C., & Esteves, F.D.A., 2004. Methane Concentration In Water Column And In Pore Water Of A Coastal Lagoon (Cabiúnas Lagoon, Macaé, Rj, Brazil). *Brazilian Arch. Biol. Technol.* 47, 301–308.
- Fonseca, A.L.D.S., Marinho, C.C., & Esteves, F.D.A., 2013. Dynamics Of Dissolved Organic Carbon From Aerobic And Anaerobic Decomposition Of *Typha Domingensis* Pers . And *Eleocharis Interstincta* (Vahl) Roem . & Schult . In A Tropical Coastal Lagoon. *Acta Limnol. Bras.* 25, 279–290.
- Fonte, E.S., Amado, A.M., Meirelles-Pereira, F., Esteves, F. a, Rosado, A.S., & Farjalla, V.F., 2013. The combination of different carbon sources enhances bacterial growth efficiency in aquatic ecosystems. *Microb. Ecol.* 66, 871–878.

- Froehner, S., & Martins, F., 2008. Avaliação da composição química de sedimentos do rio Barigüi na região metropolitana de Curitiba. *Quim. Nova* 31, 2020–2026.
- Furtado, A.L. dos S., Casper, P., & Esteves, F.D.A., 2002. Methanogenesis in an Impacted and Two Dystrophic Coastal Lagoons (Macaé, Brazil). *Brazilian Arch. Biol. Technol.* 45, 195–202.
- Gary, M.K., 1990. Dynamics and controls of methane oxidation in a Danish wetland sediment. *FEMS Microbiol. Ecol.* 74, 309–323.
- Golterman, H.L., Clymo, R.S., & Ohnstad, M.A.M., 1978. *Methods for physical and chemical analysis of fresh waters*, 2nd ed. Oxford: Blackwell Scientific, Lippincott, Philadelphia.
- Greve, P., Orłowsky, B., Mueller, B., Sheffield, J., Reichstein, M., & Seneviratne, S.I., 2014. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nat. Geosci.* 7.
- Gripp, A.D.R., 2011. *Variação Diária Da Emissão De Metano Por Uma Lagoa Costeira Tropical Durante O Verão: Avaliação Do Potencial De Emissão Pelos Fluxos Ebuliente, Difusivo E Via Macrófitas Aquáticas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia. Dissertação de Mestrado. p.91.
- Gripp, A.D.R., Marinho, C.C., Sanches, Lúcia F., Petruzzella, A., & Esteves, F.D.A., 2013. The role played by aquatic macrophytes regarding CO₂ balance in a tropical coastal lagoon (Cabiúnas Lagoon, Macaé, RJ). *Acta Limnol. Bras.* 25, 291–301.
- Grünfeld, S., & Brix, H., 1999. Methanogenesis and methane emissions: Effects of water table, substrate type and presence of *Phragmites australis*. *Aquat. Bot.* 64, 63–75.
- Henriques, R.P.B., Araújo, D.S.D., Esteves, F.A., & Franco, A.C., 1988. Análise preliminar das comunidades de macrófitas aquáticas da lagoa Cabiúnas, Rio de Janeiro, Brasil. *Acta Limnol. Bras.* 2, 783–802.
- Hess, L.L., Melack, J.M., Novo, E.M.L.M., Barbosa, C.C.F., & Gastil, M., 2003. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sens. Environ.* 87, 404–428.
- Houghton, J., 2005. Global warming. *Reports Prog. Phys.* 68, 1343–1403.
- 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, 609–621.
- Huttunen, J.T., Lappalainen, K.M., Saarijärvi, E., Väisänen, T., & Martikainen, P.J., 2001. A novel sediment gas sampler and a subsurface gas collector used for measurement of the ebullition of methane and carbon dioxide from a eutrophied lake. *Sci. Total Environ.* 266, 153–158.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge.

- Jakubauskas, M.E., & Legates, D.R., 2000. Harmonic Analysis Of Time-Series Avhrr Ndvi Data For Characterizing Us Great Plains Land Use/Land Cover. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* XXXIII, 384–389.
- Joyce, J., & Jewell, P.W., 2003. Physical Controls On Methane Ebullition From Reservoirs And Lakes. *Environ. Eng. Geosci.* IX, 167–178.
- Kankaala, P., & Bergström, I., 2004. Emission and oxidation of methane in *Equisetum fluviatile* stands growing on organic sediment and sand bottoms. *Biogeochemistry* 67, 21–37.
- Keller, M., & Stallard, R.F., 1994. Methane Emission By Bubbling From Gatun Lake, Panama. *J. Geophys. Res.* 99, 8307–8319.
- King, G.M., 1992. Ecological Aspects of Methane Oxidation, a Key Determinant of Global Methane Dynamics, in: Marshall, K.C. (Ed.), *Advances in Microbial Ecology*. Springer US, pp. 431–468.
- Knoppers, B., 1994. Aquatic Primary Production In Coastal Lagoons, in: Knoppers, B. (Ed.), *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Oceanography Series, pp. 243–286.
- Kosten, S., Roland, F., Da Motta Marques, D.M.L., Van Nes, E.H., Mazzeo, N., Sternberg, L.D.S.L., Scheffer, M., & Cole, J.J., 2010. Climate Dependent CO₂ Emissions From Lakes. *Global Biogeochem. Cycles* 24, 1–7.
- Laanbroek, H.J., 2010. Methane emission from natural wetlands: interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes. A mini-review. *Ann. Bot.* 105, 141–53.
- Landis, J.R., & Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33, 159–174.
- Laque, T., 2011. *Saturação De CO₂ E Seus Fatores Reguladores Em Lagoas Costeiras Tropicais*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia. Tese de Doutorado. p.172.
- Lewis, W.M., Hamilton, S.K., Lasi, M.A., Rodríguez, M., & Saunders, J.F., 2000. Ecological Determinism on the Orinoco Floodplain. *Bioscience* 50, 681.
- Li, N.N., Fane, A.G., Winston Ho, W.S., & Matsuura, T., 2008. *Advanced Membrane Technology and Applications*. Wiley.
- Libes, S., 2011. *Introduction to Marine Biogeochemistry*, 2nd ed. Academic Press.
- Liblik, L.K., Moore, T.R., Bubier, J.L., & Robinson, S.D., 1997. Methane emissions from wetlands in the zone of discontinuous permafrost: Fort Simpson, Northwest Territories, Canada. *Global Biogeochem. Cycles* 11, 485.
- Liira, J., Feldmann, T., Mäemets, H., & Peterson, U., 2010. Two decades of macrophyte expansion on the shores of a large shallow northern temperate lake—A retrospective series of satellite images. *Aquat. Bot.* 93, 207–215.
- Marani, L., & Alvalá, P.C., 2007. Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil. *Atmos. Environ.* 41, 1627–1633.

- Marinho, C.C., 2004. 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. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia. Dissertação de Mestrado. p.59.
- Marinho, C.C., Meirelles-Pereira, F., Gripp, A.D.R., Guimarães, C.D.C., Esteves, F.D.A., & Bozelli, R.L., 2010. Aquatic macrophytes drive sediment stoichiometry and the suspended particulate organic carbon composition of a tropical coastal lagoon. *Acta Limnol. Bras.* 22, 208–217.
- Marotta, H., Duarte, C.M., Sobek, S., & Enrich-Prast, A., 2009. Large Co₂ disequilibria In Tropical Lakes. *Global Biogeochem. Cycles* 23, 1–4.
- Marotta, H., Pinho, L., & Enrich-prast, A., 2008. Relação Positiva Entre Pluviosidade, Carbono Orgânico Dissolvido E A Supersaturação De Co₂ Em Uma Lagoa Costeira Tropical. *Oecologia Bras.* 12, 92–99.
- Mattson, M.D., & Likens, G.E., 1990. Air pressure and methane fluxes. *Nature* 347, 718–719.
- Mazerolle, M.J., 2014. Making sense out of Akaike ' s Information Criterion (AIC): its use and interpretation in model selection and inference from ecological data. *Sociol. Methods Res.* 1–12.
- McMichael, A.J., Woodruff, R.E., & Hales, S., 2006. Climate change and human health: Present and future risks. *Lancet* 367, 859–869.
- Melack, J.M., Hess, L., Gastil, M., Forsberg, B.R., Hamilton, S.K., Lima, I.B.T., & Novo, E.M.L.M., 2004. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. *Glob. Chang. Biol.* 10, 530–544.
- Minello, M., 2004. Metanogênese Sob A Variação De Salinidade Em Lagoas Costeiras Do Norte Fluminense: Implicações Nas Condições Osmóticas E Na Competição Por Substratos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia. Dissertação de Mestrado. p.66.
- Moran, M.A., & Zepp, R.G., 1997. Role of photoreactions in the formation of biologically labile compounds from dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1307–1316.
- Muehe, D., 2003. Beach morphodynamic research in Brazil: Evolution and applicability. *J. Coast. Res.* 32–42.
- Murase, J., Sakai, Y., Kametani, A., & Sugimoto, A., 2005. Dynamics of methane in mesotrophic Lake Biwa, Japan, in: *Forest Ecosystems and Environments: Scaling Up from Shoot Module to Watershed.* pp. 143–151.
- Natchimuthu, S., Panneer Selvam, B., & Bastviken, D., 2014. Influence of weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond. *Biogeochemistry* 119, 403–413.
- Nusch, E.A., & Palme, G., 1975. Biologische methoden für die praxis der gewässeruntersuchung. Bestimmung des Chlorophyll a und phaeopigmentgehaltes in oberflächenwasser. *GWF-Wasser/Abwasser* 116, 562565.
- Panosso, R.F., Attayde, J.L., & Dieter, M., 1998. Morfometria das lagoas Imboassica, Cabiúnas, Comprida e Carapebus: implicações para seu funcionamento e manejo, in: Esteves, F.D.A. (Ed.),

- Ecologia Das Lagoas Costeiras Do Parque Nacional Da Restinga de Jurubatiba E Do Município de Macaé (RJ). NUPEM/UFRJ, Macaé, pp. 91–108.
- Parashar, D.C., Mitra, A.P., Gupta, P.K., Rai, J., Sharma, R.C., Singh, N., et al., 1996. Methane budget from paddy fields in India. *Chemosphere* 33, 737–757.
- Petruzzella, A., Marinho, C.C., Minello, M., & Esteves, F.D.A., 2013. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments. *Acta Limnol. Bras.* 25, 341–351.
- Poindexter, C.M., & Variano, E.A., 2013. Gas exchange in wetlands with emergent vegetation: The effects of wind and thermal convection at the air-water interface. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 118, 1297–1306.
- Pomeroy, L.R., Sheldon, J.E., Sheldon Jr., W.M., & Perters, F., 1995. Limits to growth and respiration of bacterioplankton in the Gulf of Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 117, 259–268.
- Raymond, P.A., Bauer, J.E., & Cole, J.J., 2000. Atmospheric CO₂ evasion, dissolved inorganic carbon production, and net heterotrophy in the York River estuary. *Limnol. Oceanogr.* 45, 1707–1717.
- Roland, F., 1998. Produção fitoplanctônica em diferentes classes de tamanho nas lagoas Imboassica e Cabiúnas, in: Esteves, F.D.A. (Ed.), *Ecologia Das Lagoas Costeiras Do Parque Nacional Da Restinga de Jurubatiba E Do Município de Macaé (RJ)*. NUPEM/UFRJ, Macaé, pp. 159–175.
- Roland, F., Cesar, D., & Marinho, M., 2005. *Lições de Limnologia*. Rima, São Carlos-SP.
- Rosenqvist, Å., Forsberg, B.R., Pimentel, T., Rauste, Y.A., & Richey, J.E., 2002. The use of spaceborne radar data to model inundation patterns and trace gas emissions in the central Amazon floodplain. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1303–1328.
- Rossi, D.F., 2013. Efeito Do Biorrevolvimento Por *Heleobia Australis* (D'orbigny, 1835) (Gastropoda) e *Laeonereis Culveri* (Webster, 1880) (Polychaeta) Sobre Os Fluxos De Carbono Inorgânico Nas Interfaces Sedimento-Água-Atmosfera. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Sócio-ambiental de Macaé - UFRJ. Dissertação de Mestrado. p.47.
- Schlesinger, W.H., & Melack, J.M., 1981. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus A*.
- Sebacher, D.I., Harriss, R.C., & Bartlett, K.B., 1985. Methane emission to the atmosphere through aquatic plants. *J. Environ. Qual.* 14, 40–46.
- Sobek, S., Söderbäck, B., Karlsson, S., Andersson, E., & Brunberg, A.K., 2006. A carbon budget of a small humic lake: an example of the importance of lakes for organic matter cycling in boreal catchments. *Ambio* 35, 469–75.
- Sobek, S., Tranvik, L.J., & Cole, J.J., 2005. Temperature Independence Of Carbon Dioxide Supersaturation In Global Lakes. *Global Biogeochem. Cycles* 19, 1–10.
- Sorrell, B. k., Mendelssohn, I.A., Mckee, K.L., & Woods, R.A., 2000. Ecophysiology Of Wetland Plant Roots: A Modelling Comparison Of Aeration In Relation To Species Distribution. *Ann. Bot.* 86, 675–685.

- Sorrell, B.K., & Boon, P.I., 1994. Convective Gas Flow In *Eleocharis Sphacelata* R. Br.: Methane Transport And Release From Wetlands. *Aquat. Bot.* 47, 197–212.
- Stoeva, M.K., Aris-Brosou, S., Chételat, J., Hintelmann, H., Pelletier, P., & Poulain, A.J., 2014. Microbial Community Structure In Lake And Wetland Sediments From A High Arctic Polar Desert Revealed By Targeted Transcriptomics. *PLoS One* 9, 1–12.
- Striegl, R., Kortelainen, P., Chanton, J., & KP, 2001. Carbon dioxide partial pressure and ^{13}C content of north temperate and boreal lakes at spring ice melt. *Limnol. Oceanogr.* 46, 941–945.
- Suhett, A.L., Amado, A.M., Enrich-prast, A., Esteves, F.D.A., & Farjalla, V.F., 2007. Seasonal changes of dissolved organic carbon photo-oxidation rates in a tropical humic lagoon : the role of rainfall as a major regulator. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 64, 1266–1272.
- Taiz, L., & Zeiger, E., 2006. *Plant Physiology*, Annals of Botany.
- Ten Caten, A., Dalmolin, R.S.D., & Pedron, F. de A., 2010. Generalized Linear Models And Multivariate Analysis applied To Predict Soil Spatial Distribution In South Brazil., in: *World Congress of Soil Science, Soil Solutions For a Changing World*. pp. 24–27.
- UNESCO/IHA, 2010. *Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs*. London.
- Van Der Nat, F., & Middelburg, J.J., 1998. Effects of two common macrophytes on methane dynamics in freshwater sediments. *Biogeochemistry* 43, 79–104.
- Varadharajan, C., & Hemond, H.F., 2012. Time-series analysis of high-resolution ebullition fluxes from a stratified, freshwater lake. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 117, n/a–n/a.
- Webster, J.R., & Benfield, E.F., 1986. Vascular Plant Breakdown in Freshwater Ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 17, 567–594.
- Wetzel, R.G., 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*, Journal of Phycology.
- Whalen, S.C., 2005. Biogeochemistry of Methane Exchange between Natural Wetlands and the Atmosphere. *Environ. Eng. Sci.* 22, 73–94.
- Wik, M., Crill, P.M., Varner, R.K., & Bastviken, D., 2013. Multiyear Measurements Of Ebullitive Methane Flux From Three Subarctic Lakes. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 118, 1307–1321.
- Yavitt, B.J.B., & Knapp, A.K., 1995. Methane Emission To The Atmosphere Through Emergent Cattail (*Typha latifolia* L.) Plants. *Tellus* 47B, 521–534.
- Ye, R., Jin, Q., Bohannon, B., Keller, J.K., McAllister, S. a., & Bridgham, S.D., 2012. pH controls over anaerobic carbon mineralization, the efficiency of methane production, and methanogenic pathways in peatlands across an ombrotrophic–minerotrophic gradient. *Soil Biol. Biochem.* 54, 36–47.
- Zhuang, Q., Melack, J.M., Zimov, S., Walter, K.M., Butenhoff, C.L., & Aslam K Khalil, M., 2009. Global methane emissions from wetlands, rice paddies, and lakes. *Eos (Washington. DC)*. 90, 37–38.

ANEXOS

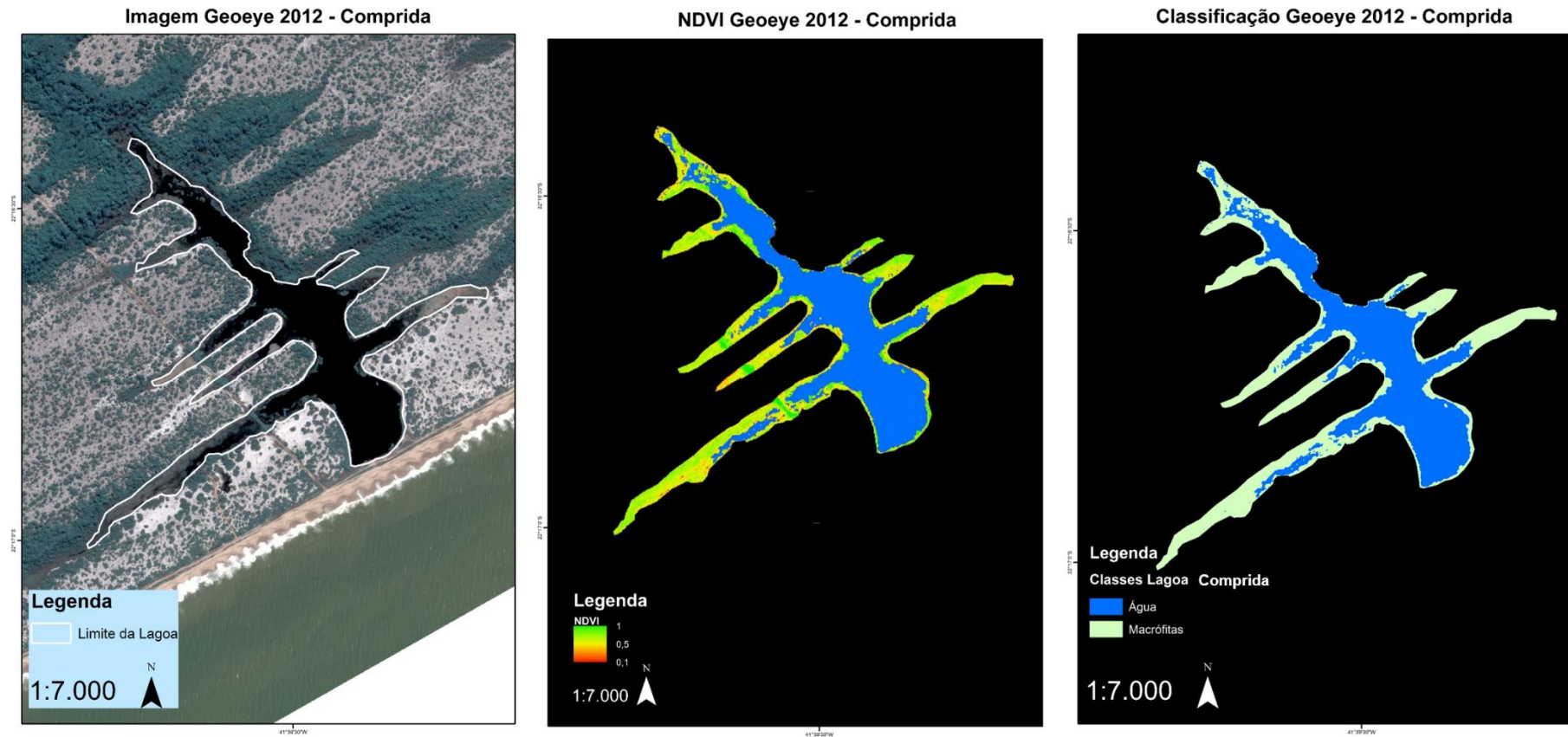


Figura 24. Sequência da análise de imagem de satélite para se obter a classificação de áreas ocupadas somente por água e áreas ocupadas por macrófitas para a realização das estimativas de emissões baseadas em regiões e áreas totais das lagoas. Imagem adquirida (à esquerda) da lagoa costeira Comprida referente à cobertura realizada em setembro de 2012 pelo satélite GeoEye-1, aplicação do indicador gráfico NDVI (imagem central) e geração da classificação (produto final-imagem à direita).

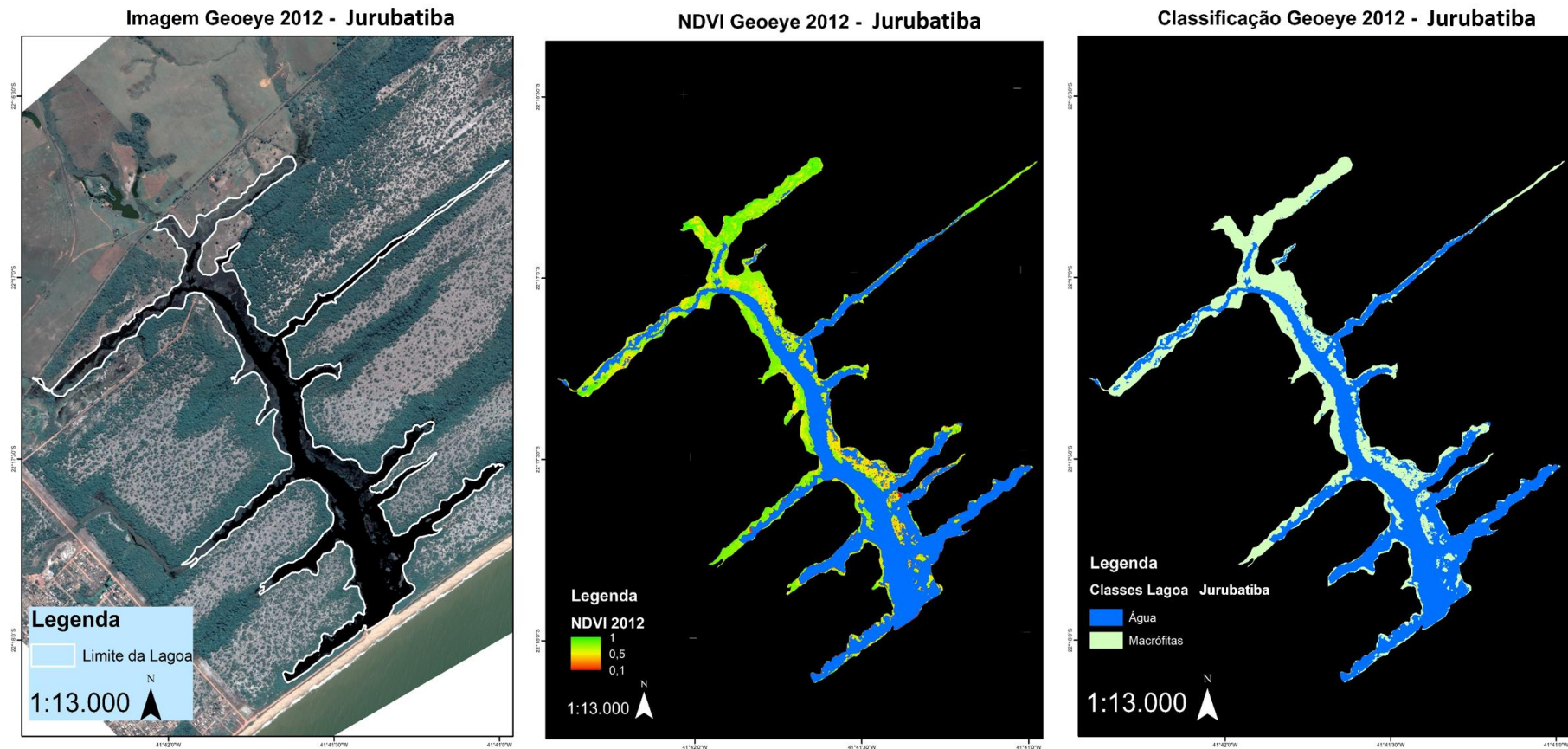


Figura 25. Sequência da análise de imagem de satélite para se obter a classificação de áreas ocupadas somente por água e áreas ocupadas por macrófitas para a realização das estimativas de emissões baseadas em regiões e áreas totais das lagoas. Imagem adquirida (à esquerda) da lagoa costeira Jurubatiba referente à cobertura realizada em setembro de 2012 pelo satélite GeoEye-1, aplicação do indicador gráfico NDVI (imagem central) e geração da classificação (produto final-imagem à direita).

Tabela 5. Resultados das correlações das variáveis abióticas — temperatura do ar, velocidade máxima do vento, profundidade do disco de Secchi, profundidade, condutividade elétrica da água superficial, condutividade elétrica da água no fundo, OD da superfície, OD do fundo, temperatura da água superficial, temperatura da água no fundo, pH, COD, COT-SED, N total, P total e Clo-a — realizadas previamente à geração da PCA-1.

	Temperatura do ar	Velocidade do vento (max)	Secchi	Profundidade	Condutividade SUP	Condutividade FUN	OD SUP	OD FUN	Temperatura da água SUP	Temperatura da água FUN	pH	COD	COT	N total	P total	Clo-a
Temperatura do ar	1,0000	-0,1247	0,1442	-0,0240	0,1913	0,2084	-0,2722	-0,3756	0,3605	0,2319	0,1070	-0,1629	0,0906	-0,4280	-0,0707	-0,1540
Velocidade do vento (max)	-0,1247	1,0000	0,3158	0,3870	0,3257	0,3150	0,2490	0,3038	-0,1820	-0,2853	0,2254	-0,1931	-0,3248	0,0562	-0,3459	-0,0478
Secchi	0,1442	0,3158	1,0000	0,4336	0,7784	0,7756	-0,2449	-0,1976	-0,0563	0,8439	-0,8004	-0,5020	-0,4235	-0,5202	-0,2790	
Profundidade	-0,0240	0,3870	0,4336	1,0000	0,3359	0,2571	-0,1622	-0,1296	-0,2603	-0,3185	0,4233	-0,4396	-0,6349	0,0784	-0,2984	-0,4526
Condutividade SUP	0,1913	0,3257	0,7784	0,3359	1,0000	0,9630	-0,4527	-0,3631	0,0938	0,0619	0,8374	-0,8264	-0,4164	-0,4728	-0,3528	-0,1743
Condutividade FUN	0,2084	0,3150	0,7756	0,2571	0,9630	1,0000	-0,3912	-0,3324	0,1522	0,1448	0,7703	-0,7454	-0,3073	-0,5117	-0,3837	-0,1552
OD SUP	-0,2722	0,2490	-0,2449	-0,1622	-0,4527	-0,3912	1,0000	0,8421	-0,2498	-0,2123	-0,4349	0,5437	0,1799	0,3210	-0,0993	0,0621
OD FUN	-0,3756	0,3038	-0,1976	-0,1296	-0,3631	-0,3324	0,8421	1,0000	-0,4105	-0,3088	-0,3196	0,4044	0,0664	0,3256	-0,1510	0,0504
Temperatura da água SUP	0,3605	-0,1820	-0,0563	-0,2603	0,0938	0,1522	-0,2498	-0,4105	1,0000	0,9073	-0,0244	0,0706	0,2071	-0,4957	0,1813	0,0951
Temperatura da água FUN	0,2319	-0,2853	-0,0531	-0,3185	0,0619	0,1448	-0,2123	-0,3088	0,9073	1,0000	-0,0392	0,1145	0,2472	-0,4657	0,2106	0,1548
pH	0,1070	0,2254	0,8439	0,4233	0,8374	0,7703	-0,4349	-0,3196	-0,0244	-0,0392	1,0000	-0,9581	-0,5392	-0,3972	-0,4171	-0,3131
COD	-0,1629	-0,1931	-0,8004	-0,4396	-0,8264	-0,7454	0,5437	0,4044	0,0706	0,1145	-0,9581	1,0000	0,5210	0,4672	0,3959	0,2683
COT	0,0906	-0,3248	-0,5020	-0,6349	-0,4164	-0,3073	0,1799	0,0664	0,2071	0,2472	-0,5392	0,5210	1,0000	0,0261	0,3626	0,4122
N total	-0,4280	0,0562	-0,4235	0,0784	-0,4728	-0,5117	0,3210	0,3256	-0,4957	-0,4657	-0,3972	0,4672	0,0261	1,0000	0,1796	-0,1402
P total	-0,0707	-0,3459	-0,5202	-0,2984	-0,3528	-0,3837	-0,0993	-0,1510	0,1813	0,2106	-0,4171	0,3959	0,3626	0,1796	1,0000	0,1824
Clo-a	-0,1540	-0,0478	-0,2790	-0,4526	-0,1743	-0,1552	0,0621	0,0504	0,0951	0,1548	-0,3131	0,2683	0,4122	-0,1402	0,1824	1,0000

Tabela 6. Resultados das correlações das variáveis meteorológicas — precipitação, velocidade média do vento, velocidade máxima da rajada de vento, direção do vento, pressão atmosférica média, pressão atmosférica mínima, pressão atmosférica máxima, temperatura média do ar, temperatura máxima do ar, umidade relativa e radiação — realizadas previamente à geração da PCA-2.

	Precipitação	Vento Veloc.Méd.	Vento Rajada.Máx.	Vento Direção	Pressão ATM Méd.	Pressão ATM Mín.	Pressão ATM Máx.	Temp. Ar Méd.	Temp. Ar Máx.	Umidade Relativa	Radiação
Precipitação	1,0000	0,0034	0,0598	0,0698	-0,4848	-0,4920	-0,4818	0,2562	0,2706	0,3551	-0,4545
Vento Veloc.Méd.	0,0034	1,0000	0,9925	-0,5369	-0,1761	-0,1822	-0,1697	-0,0343	-0,0387	-0,4737	0,3040
Vento Rajada.Máx.	0,0598	0,9925	1,0000	-0,5267	-0,2107	-0,2174	-0,2044	-0,0146	-0,0188	-0,4376	0,2783
Vento Direção	0,0698	-0,5369	-0,5267	1,0000	0,3536	0,3498	0,3433	-0,4379	-0,4286	0,3865	-0,2522
Pressão ATM Méd.	-0,4848	-0,1761	-0,2107	0,3536	1,0000	0,9998	0,9998	-0,7818	-0,7883	-0,2509	0,0148
Pressão ATM Mín.	-0,4920	-0,1822	-0,2174	0,3498	0,9998	1,0000	0,9997	-0,7771	-0,7835	-0,2512	0,0208
Pressão ATM Máx.	-0,4818	-0,1697	-0,2044	0,3433	0,9998	0,9997	1,0000	-0,7796	-0,7860	-0,2555	0,0170
Temp. Ar Méd.	0,2562	-0,0343	-0,0146	-0,4379	-0,7818	-0,7771	-0,7796	1,0000	0,9959	-0,0374	0,0377
Temp. Ar Máx.	0,2706	-0,0387	-0,0188	-0,4286	-0,7883	-0,7835	-0,7860	0,9959	1,0000	-0,0437	0,0739
Umidade Relativa	0,3551	-0,4737	-0,4376	0,3865	-0,2509	-0,2512	-0,2555	-0,0374	-0,0437	1,0000	-0,4500
Radiação	-0,4545	0,3040	0,2783	-0,2522	0,0148	0,0208	0,0170	0,0377	0,0739	-0,4500	1,0000

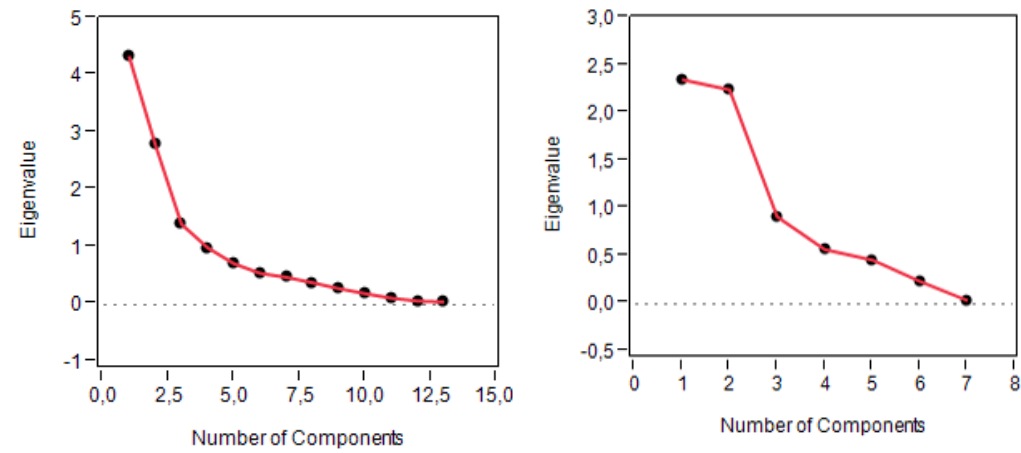


Figura 26. Modelo Scree Plot (à esquerda) para avaliação e interpretação dos componentes principais gerados na aplicação da PCA-1 para variáveis abióticas e modelo Scree Plot (à direita) para avaliação e interpretação dos componentes principais gerados na aplicação da PCA-2 para variáveis meteorológicas.

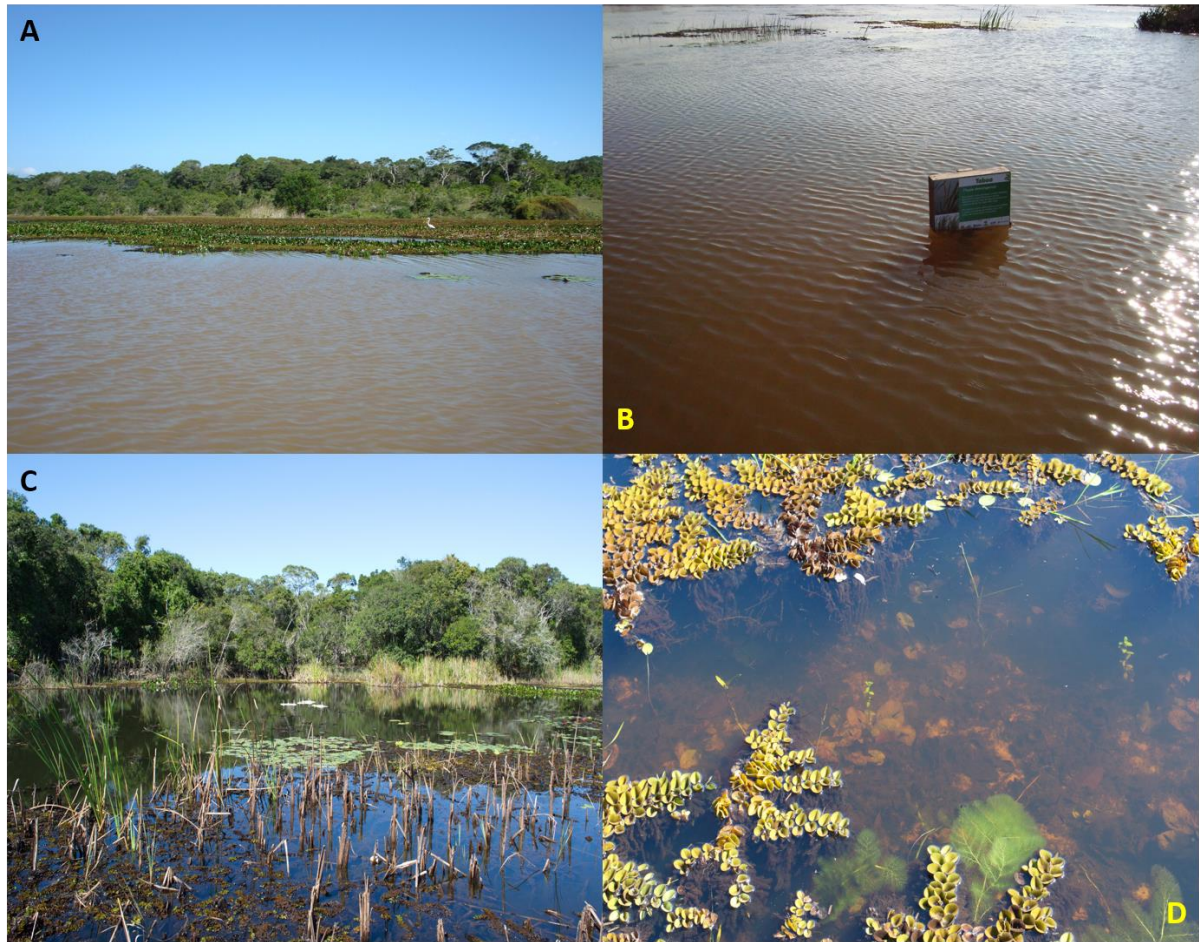


Figura 27. Coloração da água na Lagoa Jurubatiba nas campanhas realizadas em junho de 2012 (A e B) e em abril de 2013 (C e D). Fotos: Arquivo pessoal.

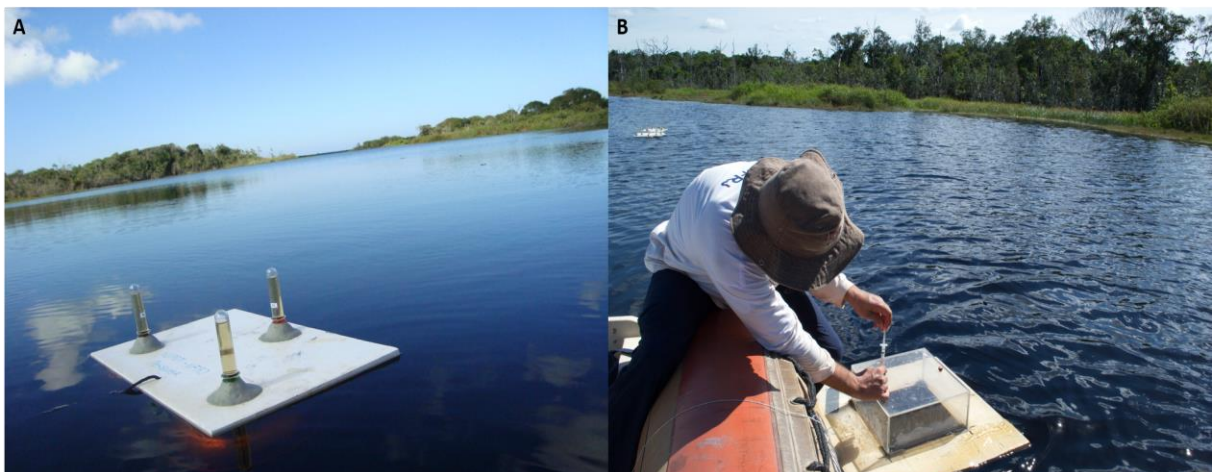


Figura 28. Coloração da água na Lagoa Comprida nas campanhas realizadas em junho de 2012 (A) e em abril de 2013 (B). Fotos: Arquivo pessoal.