



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA**

**SAÚL EDGARDO MARTÍNEZ CASTELLÓN**

**ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM ÁREAS  
DE MANGUEZAIS DO MUNICÍPIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS - PA**

**BELÉM-PARÁ**

**2019**

SAÚL EDGARDO MARTÍNEZ CASTELLÓN

ESTIMATIVA DO FLUXO DE METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM ÁREAS  
DE MANGUEZAIS DO MUNICÍPIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS - PA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmica Socioambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Cattanio. UFPA

Coorientadores: Prof. Dr. José Francisco Berredo. MPEG

Prof. Dr. Marcelo Rollnic. UFPA

BELÉM – PARÁ

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M385e Martínez Castellón, Saúl Edgardo  
Estimativa do fluxo de metano e dióxido de carbono em áreas de manguezais do município de São Caetano de Odivelas - PA / Saúl Edgardo Martínez Castellón. — 2019.  
118 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Henrique Cattanio  
Coorientador(a): Prof. Dr. José Francisco Berredo  
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Ecologia do Manguezal - Amazônia. 2. Física de Solo. 3. Química da Água. 4. Gases de Efeito Estufa. 5. Amazônia I. Título.

CDD 577.69809811

---

SAÚL EDGARDO MARTÍNEZ CASTELLÓN

**ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM ÁREAS  
DE MANGUEZAIS DO MUNICÍPIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS – PA**

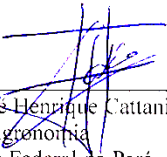
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

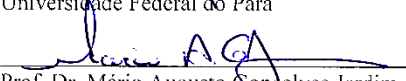
Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

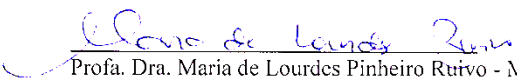
Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente.

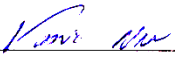
Data de aprovação: 03 / 12 / 2019

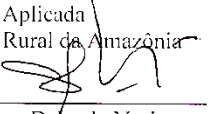
Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Henrique Cattanio - Orientador  
Doutor em Agronomia  
Universidade Federal do Pará

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mário Augusto Gonçalves Jardim – Membro Interno  
Doutor em Ciências Biológicas  
Museu Paraense Emílio Goeldi

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo - Membro Interno  
Doutora em Agronomia  
Museu Paraense Emílio Goeldi

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Vania Nêu - Membro Externo  
Doutora em Ecologia Aplicada  
Universidade Federal Rural da Amazônia

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Esteban Delgado Noriega - Membro Externo  
Doutor em Oceanografia  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Programa de alianças para Educação e a Capacitação entre a Organização dos Estados Americanos e o Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (PAEC-OEA-GCUB).

Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, e Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA).

Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). Especialmente na Área Ciências da Terra pelas valiosas contribuições logísticas no laboratório de análises de solos.

Ao professor Dr. José Henrique Cattanio, pela orientação neste trabalho durante os quatro anos de estudo.

Ao Professor Dr. José Francisco Berredo, pela Coorientação e apoio logístico no laboratório de análises de solo do Museu Paraense Emílio Goeldi.

Ao Professor Dr. Marcelo Rollnic, pela Coorientação e apoio logístico no laboratório de oceanografia.

À Professora Dra. Iracilda Sampaio, Diretora acadêmica de relações internacionais da UFPA.

Aos Professores da banca examinadora: Professores Doutores, Vânia Neu, Maria de Lourdes Ruivo, Mário Jardim e Carlos Esteban Noriega.

Ao Professor Paulo Sarmiento pelas contribuições no laboratório de análises de solos.

À MSc. Maridalva Ribeiro e Lucivaldo da Silva, pela colaboração nos trabalhos de campo.

À minha esposa Marta Sandoval e filhos Ninoska, Paola e Saúl Alberto.

Aos meus Pais: Daysi Castellón e Saúl Martínez, QEDG.

Irmãos: Carlos, Issela e Ninoska Martínez Castellón.

## RESUMO

Os manguezais são considerados ecossistemas tanto ambientais e como socioeconomicamente produtivos, dado pela contribuição na mitigação das mudanças climáticas, como a captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> na biomassa aérea e subterrânea. As áreas de mangue são importantes contribuidores dos gases de efeito de estufa (GEE). Este estudo investiga os fluxos de Metano (FCH<sub>4</sub>) e de Dióxido de Carbono (FCO<sub>2</sub>) em floresta de mangue nas interfaces solo-atmosfera (Ilha da Macaca), e água-atmosfera (Estuário Mojuim). As medições incluíram uma escala temporal (período seco: julho a dezembro 2017 e chuvoso: janeiro a junho 2018) e espacial (topografia alta: 2,5 m e baixa: 2,0 m), e em diferentes ambientes aquáticos. Os fluxos foram medidos através do método de câmaras dinâmicas associadas a um analisador de gás infravermelho. Adicionalmente, foram registrados parâmetros: A) ambientais, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, B) físicos e químicos da água, como a temperatura, oxigênio dissolvido e pH; C) físicos e químicos do solo, como a temperatura, umidade, matéria orgânica, pH, carbono e nitrogênio total, relação C/N, carbono orgânico, carbono microbiano, nitrogênio microbiano. O FCH<sub>4</sub> médio no solo variou de 0,1874 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> a 0,0711 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> entre época seca e chuvosa respectivamente. O FCO<sub>2</sub> médios no solo variou de 6,3607, a 7,0542g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> entre época chuvosa e seca respectivamente. Os FCH<sub>4</sub> variaram de 0,2360 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> a 0,0271 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para a topografia baixa e alta, respectivamente. Os FCO<sub>2</sub> variaram de 5,4383 a 7,079 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para topografia baixa e alta, respectivamente. Com isto os fluxos foram maiores para CO<sub>2</sub> na época seca e FCH<sub>4</sub> foram menores na estação chuvosa. Os fluxos de FCH<sub>4</sub> no ecossistema aquático variaram entre época seca e chuvosa de 0,039 a 0,050 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> respectivamente. O FCO<sub>2</sub> entre época seca e chuvosa variou de 10,474g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> a 28,985, g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente. Os FCO<sub>2</sub> mostraram diferenças significativas (p < 0,05) entre a época seca e chuvosa, podendo estar influenciado pela entrada de água salubre na maré enchente e a entrada de água doce do rio Mojuim na vazante. Neste estudo foi observado que os maiores fluxos de FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> ocorrem na época chuvosa, e variação mínima do FCO<sub>2</sub> no solo.

Palavras-chave: Amazônia. Estuário de macromaré. Física de Solo. Química da Água. Fluxos de Gases do Efeito Estufa.

## ABSTRACT

Mangroves are considered environmentally and socioeconomically productive ecosystems because of their contribution to mitigating climate change, capturing and storing CO<sub>2</sub> in the aerial and underground biomass, and a large fraction of carbon is escaped from soil and water into the atmosphere. The mangrove areas are important contributors to greenhouse gases (GHG). The study highlights the monthly measurements of fluxes methane (FCH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (FCO<sub>2</sub>) flows in mangrove forest at the soil-atmosphere interface (Macaca Island), and water-atmosphere interface (Mojuim Estuary). The measurements included the temporal (dry period: July to December 2017 and rainy: January to June 2018) and spatial, (high topography: 2.5 m and low: 2.0 m) scale. Flows are measured by the dynamic chamber method associated with an infrared gas analyser. Additionally, parameters were recorded. A) environmental, air temperature, relative humidity, wind speed. B) physical and chemical water, water temperature, dissolved oxygen and pH. C) soil physical and chemical, soil temperature, soil moisture, organic matter, pH, organic total carbon, total nitrogen, and C/N ratio, microbial carbon, microbial nitrogen. The FCH<sub>4</sub> in the soil varied in means of 0.1874 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and 0.0711 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> between dry and rainy season. The FCO<sub>2</sub> varied in means of 6.3607 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, and 7.0542 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> between dry and rainy season. The FCH<sub>4</sub> ranged from 0.2360 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> to 0.0271 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> between low and high topography. The FCO<sub>2</sub> ranged from 5.4383 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, and 7.079 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> between low and high topography. This could be related to the lower amount of organic matter, oxidized environment and good soil aeration in the high topography favoring FCH<sub>4</sub> anoxia. The FCH<sub>4</sub> in the estuary varied between season dry and rainy from 0.039 to 0.050 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. The FCO<sub>2</sub> varied between season dry and rainy from 10.474 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> to 28.985 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. The FCO<sub>2</sub> present difference (p < 0.05) between the dry and rainy season, and may be influenced by the salubrious sea water in the tide and fresh water from the Mojuim River into the ebb. In this study it was observed that the highest FCH<sub>4</sub> and FCO<sub>2</sub> occur in the rainy season, and minimal variation of FCO<sub>2</sub> in the soil.

Key words: Amazon. Macro Tidal Estuary Mangrove. Soil Physics. Water Chemistry. Greenhouse gases.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO 1

Figura 1- Distribuição global dos manguezais apresentados pela linha vermelha.....21

Figura 2- Mapa de localização da Costa de Manguezal de Macromaré da Amazônia (CMMA).....23

### CAPITULO 2

Figura 1- Localização da área de estudo e locais de coleta de amostras (S1 e S2) em ecossistema de solo em área de mangue, em São Caetano de Odivelas Pará.....30

Figura 2- Precipitação média (mm) e nível médio das marés (m) mensal dos anos de 2017 (julho a dezembro) e 2018 (janeiro a junho) no município de São Caetano de Odivelas (PA).....33

Figura 3- Fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) por hora nos dois locais amostrados (S1 e S2) em relação ao nível da maré, na época seca, em uma floresta de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). As barras mostram o erro padrão.....39

Figura 4- - Fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) do solo nas duas estações do ano em relação ao nível da maré, em uma floresta de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). As barras mostram o erro padrão .....40

### CAPÍTULO 03

Figura 1- Mapa dos locais de amostragem dos fluxos, Estuário Mojuim (R1), latitude - 0,731971° e longitude -47,98869°, Canal de Maré (C1) latitude -0,76038° e longitude -47,988967°.....52

Figura 2- Precipitação média (mm) altura das marés (m) (2A). Temperatura do ar (Tar; °C) em R1 (estuário Mojuim) e C1 (Canal de maré), (2B) Tar dos anos 2017-2018 na área de estudo em São Caetano de Odivelas (PA).....53

Figura 3- Variação dos fluxos de FCH<sub>4</sub> (3A), e fluxos de dióxido de carbono FCO<sub>2</sub> (3B), R1 (Estuário Mojuim) e C1 (Canal de maré) no período seco, em maré vazante e enchente. As barras representam as médias e erro padrão por hora, a linha continua preta representa o nível da maré.....58



Figura 4- Análises de componentes principais (ACP) mostram a relação das variáveis, ambientais, físicas e químicas da água e os fluxos. Os círculos indicam as variáveis da primeira componente, fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), potencial de hidrogênio (pH), oxigênio dissolvido (OD), Temperatura da água (Tag), e negativamente condutividade (CE). A dimensão 2 está representada pelo retângulo: fluxo de metano CH<sub>4</sub> (FCH<sub>4</sub>), oxirredução (ORP) e salinidade (Sal).....60

Figura 5- Fluxo de metano FCH<sub>4</sub> (A) e fluxos de dióxido de carbono FCO<sub>2</sub> (B) da sazonalidade do Estuário Mojuim (R1) no período seco e chuvoso, as colunas apresentam os fluxos por hora, as barras mostram o erro padrão.....61

Figura 6- Análises de componentes principais (ACP) da sazonalidade, mostram a relação das variáveis, ambientais, físicas e químicas da água e fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. E oval indicam as variáveis da primeira componente: salinidade (Sal), condutividade elétrica (CE), temperatura da água (Tag), Turbidez (Tur) e oxigênio dissolvido (OD). A segunda componente representada pelo retângulo: oxirredução (ORP), fluxo de metano CH<sub>4</sub> (FCH<sub>4</sub>), e o potencial de hidrogênio (pH), as épocas climáticas secas representadas pelos pontos de cor cinza e chuvosa de cor preta.....62

#### **CAPÍTULO 04**

Figura 1- Localização da área de estudo e locais de amostragens (A1, B1, A2, B2) em ecossistema de mangue com topografia alta e baixa, no município de São Caetano de Odivelas (PA).....73

Figura 2- Fluxos de metano (FCH<sub>4</sub>) g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e fluxos de dióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, por épocas climáticas (seca e chuvosa) (Figura 2A), (Figura 2B) apresenta a topografia alta e baixa. As barras mostram as médias anuais e erro padrão. Letras maiúsculas diferentes apresentam a significância entre época seca e chuvosa, Topografia alta e baixa.....82

Figura 3- Análise de componentes principais (ACP) das variáveis do solo. (3A) indica as principais variáveis. Os círculos indicam as variáveis localizadas na primeira componente. Os triângulos indicam as variáveis da segunda componente, e os quadrados as variáveis na terceira componente. (3B), indicam a análise de componentes principais (ACP) associada com a topografia do solo (gráfico biplot). FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; Tar: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; Ts: temperatura do solo Cm: carbono microbiano; Nm: nitrogênio microbiano; pH; Eh; potencial redox; Sal: Salinidade; Cot: carbono total; Not: nitrogênio total; C:N; carbono nitrogênio; MO: matéria orgânica; Us: úmidade de solo.....85

## CAPÍTULO 5

- Figura 1- Localização da área de estudo e locais de amostragens: canal alto (Ca), canal baixo (Cb), rio alto (Ra), rio baixo (Rb), furo alto (Fa), furo baixo (Fb) em ecossistema aquático estuário Amazônico.....97
- Figura 2- Normal climatológica no município de Soure (1981-2017), precipitação anual e altura máxima da maré, dos anos de 2017-2018, no município de São Caetano de Odivelas (PA).....101
- Figura 3- Fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) no rio, furo e canal, durante a época seca e chuvosa, no estuário amazônico.....102
- Figura 4- Fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) do rio, furo e canal, durante ao longo de um ano hidrológico no estuário amazônico. As barras indicam o erro padrão.....103
- Figura 5. Variação mensal dos parâmetros ambientais: a temperatura da água (Tag °C; A), pH (B), potencial redox (ORP mV; C), condutividade elétrica da água (CE mS cm<sup>-1</sup>; D), sólidos totais dissolvidos (STD, g L<sup>-1</sup>; E) e velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>; F). Linhas contínuas representam os parâmetros temperatura do ar (Tar °C; A), oxigênio dissolvido D (OD mg L<sup>-1</sup>; B), turbidez (Tur NTU; C), salinidade (PPT; D),  $\sigma_t$  (E), e RU (%; F); linhas tracejadas, em locais de rio, furo e canal, no estuário amazônico.....106

Figura 6. Regressão linear na época chuvosa entre o fluxo de CO<sub>2</sub> (mmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e o pH no rio e canal (A), ORP no furo (B), e no canal com salinidade (C), σ<sub>t</sub> (D), temperatura da água (E), e TDS (F).....107

Figura 7. Análise de componentes principais (ACP) das variáveis da água. (5A) indica as principais variáveis. A figura irregular indica as variáveis localizadas na primeira componente. Os círculos indicam as variáveis da segunda componente, e os triângulos as variáveis na terceira componente. FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>; FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; Tag: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; pH: potencial de hidrogênio; CE: condutividade elétrica; Sal: Salinidade. (5B), indica a análise de componentes principais (ACP) associada com a zonas na água (gráfico biplot). FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; Ta: temperatura da água; pH; ORP: Oxi-redução; CE; condutividade elétrica; Tur: turbidez; OD: Oxigênio dissolvido; STD: Sólidos totais; Sal: Salinidade; Den: densidade; Vv: velocidade do vento; Ta: temperatura do ar e Ur: umidade relativa.....109

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

Tabela 1- Áreas de manguezal estimadas pela região em km<sup>2</sup> em relação à área total mundial.....21

Tabela 2 - Países com as maiores áreas de Manguezal em km<sup>2</sup> e porcentagens em relação ao total estimado no mundo.....22

### CAPÍTULO 2

Tabela 1- Variação local e sazonal horária e total para os fluxos de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Media±Erro, n=8) em área de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). Letras minúsculas e maiúsculas diferentes representam significância entre as médias de distribuição normal (LSD, p < 0,05), e entre as médias de distribuição não normal (Kruskal-Wallis, p < 0,05), quando analisado os tempos de coleta e entre locais no período seco, respectivamente. onde n.d. significa não determinado. Letras X e Y representam significância entre as médias de distribuição normal (LSD, p < 0,05), e entre as médias de distribuição não normal (Kruskal-Wallis, p < 0,05), quando analisado os dois períodos sazonais em S1.....36

Tabela 2 - Variação sazonal e local para características físicas e orgânicas do solo (Media ± Erro padrão, n=4) em área de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). Letras minúsculas expressam a variação local, e as maiúsculas à variação sazonal, sendo que quando diferentes mostram a variação significativa entre as médias (LSD, p < 0,05).....38

### CAPÍTULO 3

- Tabela 1 - Variação espacial dos parâmetros físico-químicos da água do Estuário Mojuim (R1), Canal de Maré (C1), sendo temperatura do ar (Tar), temperatura da água (Tag), potencial de hidrogênio (pH), potencial de oxirredução (ORP), oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), turbidez e salinidade. Período seco e chuvoso, para características físicas e químicas da água (Media ± Erro padrão, R1 n =13 e C1 n = 8). Letras minúsculas expressam a variação local, e as maiúsculas à variação sazonal, letras iguais não diferem significativamente entre as médias, usando Teste Kruskal-Wallis não paramétrico, com nível de significância de ( $p < 0,05$ ) .....56
- Tabela 2 - Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados da água. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2, F3 e F4). FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>; Ta: temperatura do ar; Tag: temperatura da água; pH: potencial de hidrogênio; ORP: Óxido redução; OD: Oxigênio dissolvido; CE: condutividade elétrica; Tur: turbineis e Sal: Salinidade.....60
- Tabela 3 - Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados da água. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2 e F3). FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. Tar: temperatura do ar, Tag: temperatura da água; pH; ORP: Óxido redução; OD: Oxigênio dissolvido; CE.; condutividade elétrica; Tur: turbidez e Sal: Salinidade.....62
- Tabla 4 - Variação espacial e horária do Estuário Mojuim (R1), Canal de Maré (C1). Sazonal para os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Média ± erro padrão, n = 7, em (R1) e (C1) n = 6, onde n.d. significa não determinado. Letras diferentes representam significância entre as médias (LSD,  $p < 0,05$ ), quando analisado a maré de vazante e maré de enchente (sombreado), letra maiúscula, e entre locais (rio e canal), no período seco. Letras X e Y representam significância entre as médias de distribuição normal ( $p < 0,05$ ), quando analisado os dois períodos sazonais em R1.....63

## CAPÍTULO 4

- Tabla 1 - Variação mensal, espacial (Media  $\pm$  erro padrão, n=8) e sazonal (Media  $\pm$  erro padrão, n=48 para A1, e B2 com n=40) dos fluxos de metano (FCH<sub>4</sub>) g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e fluxos dióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) em g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> dos sítios estudados, onde n.d. significa não determinado. Sendo que as letras minúsculas diferentes representam significância (p < 0,05) entre as médias de cada sítio mensal (colunas), e as letras maiúsculas representam as diferenças significativas (p < 0,05) entre os sítios (linhas).....78
- Tabla 2 - Médias mensais, sazonal e pelo gradiente topográfico alto (A1, A2), e baixo (B1, B2) dos fluxos de metano (FCH<sub>4</sub>) g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e de dióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Médias  $\pm$  erro padrão, n = 48). Médias com letra maiúscula em comum não diferem significativas entre gradiente, (p > 0,05) .....80
- Tabla 3 - Variação espacial e sazonal das variáveis de solo e ambientais [(Media, n=48 em Ts, n=16 outras variáveis de solo, ambientais seca n=40 e chuvosa n=48)] dos sítios estudados, Letras minúsculas diferentes representam significância entre as médias de distribuição normal (LSD, p < 0,05) entre sítios, e letras maiúsculas entre cada sítio e época climática. As letras (X, Y) as médias totais por época climática. As variáveis ambientais Tar: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; Ts: temperatura do solo Cm: carbono microbiano; Nm: nitrogênio microbiano; pH; Sal: Salinidade; Cot: carbono total; Not: nitrogênio total; C:N; carbono nitrogênio; MO: matéria orgânica; Us: umidade de solo.....83
- Tabla 4 - Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados de solo. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2, F3, F4 e F5) na PCA. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. Tar: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; Ts: temperatura do solo Cm: carbono microbiano; Nm: nitrogênio microbiano; pH: potencial de hidrogênio; Eh: potencial redox; Sal: Salinidade; Ct: carbono total; Nt: nitrogênio total; C:N; carbono nitrogênio; MO: matéria orgânica; Us: umidade de solo.....86

Tabla 5 - Emissões CH<sub>4</sub> (%) expressadas como carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq) e a contribuição das Giga toneladas por hectare por ano por cada sitio.....87

Tabela 6 - Emissões de CH<sub>4</sub> (μmol m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) e CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) em florestas de mangue durante os períodos de emersão. ....87

## **CAPÍTULO 5**

Tabela 1 - Fluxo de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>-eq\* do rio, furo e canal na estação seca, chuvosa e média anual, no estuário amazônico em São Caetano de Odivelas (PA).....104

Tabela 2 - Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados da água. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2, F3, F4 e F5) na PCA. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. Tag: temperatura da água; pH; ORP: Óxido redução; CE.; condutividade elétrica; Tur: turbidez; OD: Oxigênio dissolvido; STD: Sólidos totais; Sal: Salinidade; Den: densidade; Vv: velocidade do vento; Ta: temperatura do ar e Ur: umidade relativa.....109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

CO<sub>2</sub>.eq: Dióxido de Carbono Equivalente.

FCH<sub>4</sub>: Fluxo de Metano.

FCO<sub>2</sub>: Fluxo de Dióxido de Carbono.

Cm: Carbono Microbiano.

Nm: Nitrogênio Microbiano.

MO: Material Orgânico.

Cot: Carbono Total.

Not: Nitrogênio Total.

Ts: Temperatura do Solo.

pH: Potenciais de hidrogênio.

Eh: Potencial de Oxido Redução.

Tar: Temperatura do ar.

Vv: Velocidade do Vento

Ur: Umidade Relativa.

OD: Oxigênio Dissolvido.

ORP: Potencial Óxido Redução.

Tur: Turbidez.

CE: Condutividade Elétrica.

Sal: salinidade.

ppm: partes por milhão.

ppb: partes por bilhão.

µg: Microgramas.

mg: Miligramas.



## SUMÁRIO

<b>CAPITULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1 Gases de efeito estufa.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 Ecossistemas de manguezal.....</b>	<b>20</b>
<b>1.3 Caracterização da floresta de manguezal.....</b>	<b>21</b>
<b>1.4 Estuários.....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 Problema da pesquisa.....</b>	<b>23</b>
<b>1.6 Objetivo geral.....</b>	<b>24</b>
1.6.1 Objetivos específicos.....	24
<b>1.7 Hipóteses.....</b>	<b>24</b>
<b>1.8 Estrutura da tese.....</b>	<b>25</b>
<b>CAPITULO 2 FLUXOS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> EM FLORESTA DE MANGUE NO ESTUÁRIO AMAZÔNICO E CORRELAÇÃO COM FATORES AMBIENTAIS E DE SOLO EM SÃO CAETANO DE ODIVELAS, PARÁ.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 Introdução Geral.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2 Material e métodos.....</b>	<b>29</b>
2.2.1 Área de estudo.....	29
2.2.2 Desenho experimental.....	30
2.2.3 Cálculo dos fluxos de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> .....	32
2.2.4 Conversão a carbono equivalente.....	32
2.2.5 Análise dos dados.....	32
<b>2.3 Resultados e discussão.....</b>	<b>33</b>
2.3.1 Composição florística.....	34
2.3.2 Fluxos de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> no mês seco.....	34
2.3.3 Fluxos de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> no mês chuvoso.....	40
2.3.4 Comparação entre as duas estações.....	41
<b>2.4 Conclusão.....</b>	<b>42</b>
<b>CAPITULO 3 FLUXOS TEMPORAIS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> NA INTERFACE ÁGUA ATMOSFERA NO ESTUÁRIO MOJUM EM SÃO CAETANO DE ODIVELAS-PA.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>51</b>
<b>3.2 Material e métodos.....</b>	<b>51</b>
3.2.1 Área de estudo.....	51

3.2.2	Dados climatológicos.....	52
3.2.3	Procedimentos amostrais e analíticos.....	53
3.2.4	Cálculo dos fluxos.....	54
3.2.5	Conversões de carbono equivalente.....	54
3.2.6	Análises estatísticas.....	55
<b>3.3</b>	<b>Resultados e discussões.....</b>	<b>55</b>
3.3.1	Fluxos de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> no período seco em relação as marés.....	57
3.3.2	Conversão dos fluxos de CH <sub>4</sub> a emissões de carbono equivalente.....	64
<b>3.4</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPITULO 4 VARIAÇÃO ESPACIAL E SAZONAL DOS FLUXOS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> DO SOLO EM UM ECOSISTEMA DE MANGUE NA ILHA MACACA NO ESTUÁRIO AMAZÔNICO.....</b>		
		<b>69</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2</b>	<b>Material e métodos.....</b>	<b>73</b>
4.2.1	Área de estudo.....	73
4.2.2	Desenho experimental das áreas de amostragem.....	74
4.2.3	Coleta de dados dos fluxos de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> .....	75
4.2.4	Cálculo dos fluxos de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> .....	75
4.2.5	Conversão em carbono equivalente.....	76
4.2.6	Análise dos dados.....	76
<b>4.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>76</b>
4.3.1	Composição florística.....	76
4.3.2	Fluxos dos gases de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> da época seca.....	77
4.3.3	Fluxos dos gases de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> da época chuvosa.....	79
4.3.4	Fluxos de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> na sazonalidade.....	81
4.3.5	Emissões dos fluxos de metano a CO <sub>2</sub> equivalente.....	86
<b>4.4</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>88</b>
<b>CAPITULO 5 VARIAÇÃO ESPACIAL E SAZONAL DOS FLUXOS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> COM VARIÁVEIS FÍSICO QUÍMICAS DA ÁGUA, EM UM ESTUÁRIO AMAZÔNICO.....</b>		
		<b>94</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>96</b>
<b>5.2</b>	<b>Material e métodos.....</b>	<b>97</b>
5.2.1	Área de estudo.....	97

5.2.2	Dados climatológicos.....	98
5.2.3	Desenho experimental e analítico.....	98
5.2.4	Estimativa dos fluxos de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> .....	100
5.2.5	Conversão dos fluxos de CH <sub>4</sub> a carbono equivalente.....	100
5.2.6	Análises estatística.....	100
<b>5.3</b>	<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>101</b>
5.3.1	Sazonalidade dos fluxos dos gases de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> .....	101
5.3.2	Fluxo mensal de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> .....	103
5.3.3	Correlação entre os fluxos e as propriedades físico-químicas da água.....	105
<b>5.4</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>110</b>
<b>CAPITULO 6 DISCUSSÃO GERAL.....</b>		<b>115</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultados chave.....</b>	<b>115</b>
<b>6.2</b>	<b>Prioridades para pesquisas futuras.....</b>	<b>115</b>
<b>6.3</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>116</b>

## **CAPITULO 1 INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1 Gases de efeito estufa**

Os gases do efeito estufa (GEE) são compostos gasosos que absorvem radiação infravermelha aprisionando calor na atmosfera, sendo o principal deles o vapor de água (H<sub>2</sub>O), entretanto atualmente os principais intensificadores do efeito estufa são os compostos de carbonos na forma de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Considerando ao CH<sub>4</sub> o segundo gás mais importante, com forçamento radiativo 23 vezes maior que o CO<sub>2</sub> com perspectiva de um período de 100 anos (IPCC, 2001).

Registros obtidos desde a revolução industrial indicam que a concentração de gases de efeito estufa está aumentando devido às atividades antropogênicas, tais como queima de combustíveis fósseis, desflorestamento e pela produção industrial de cimento, (IPCC, 2007). Especificamente para o aumento de CH<sub>4</sub> na atmosfera são identificados os processos biológicos de tratamento de efluentes, aterros sanitários, atividades agrícolas, pecuária, extração de petróleo, produção de arroz e a queima de biomassa. Desde o início da revolução industrial o CO<sub>2</sub> na atmosfera passou de uma concentração de 280 para 365 ppm, com aumento de 30% em apenas 100 anos (MARINHO *et al.*, 2012).

### **1.2 Ecossistemas de manguezal**

Desde a década de 1970, os manguezais foram considerados ecossistemas ambiental e socioeconomicamente produtivos, pela contribuição na mitigação nas mudanças climáticas, capturam e armazenam CO<sub>2</sub> na biomassa aérea e subterrânea (ALONGI, 2002). Muitos países localizados em zonas tropicais costeiras, estão sofrendo variações na redução dos mangues devido ao clima, e maior proporção pelas atividades humanas, através da indústria pesqueira, maricultura, agricultura, exploração de madeira, urbanização e atividades turísticas (ICMBio, 2018; SPALDING; KAINUMA; COLLINS, 2010). Estas atividades modificam a cadeia alimentar nos ecossistemas de mangue, e alteram as condições de vida das populações que obtém bens e serviços para a sustentabilidade familiar. Conhecer o valor dos manguezais torna-se imprescindível, principalmente na Amazônia, considerada a principal floresta tropical do mundo no contexto de mudanças climáticas e armazenamento de GEE.

Os manguezais estuarinos das regiões tropicais e subtropicais são reconhecidos como um dos principais contribuintes marinhos no balanço da emissão e absorção dos GEE para atmosfera (ALLEN *et al.*, 2011; CHEN; TAM ;YE, 2012). Colaborando com até 15% (26,1 Tg C) do carbono orgânico total enterrado em ambientes marinhos anualmente (BREITHAUPT *et al.*, 2012). A produtividade primária nestes ecossistemas é estimada em  $218 \pm 72$  Tg C ano<sup>-1</sup> (BOUILLON *et al.*, 2008).

### 1.3 Caracterização da floresta de manguezal

O ecossistema de mangue representa 8% de toda a linha costeira do planeta e um quarto da linha costeira na zona tropical (Figura 1), estando distribuído em 112 países com aproximadamente 181.000 km<sup>2</sup> de superfície total (SAHOO; DHAL, 2009; SPALDING, BLASCO; FIELD, 1997), (Figura 1, Tabela 1).

Figura 1- Distribuição global de manguezais apresentados pela linha vermelha.



Fonte: (SPALDING; FIELD, 1998).

Tabela 1 - Áreas de Manguezal estimadas pela região em km<sup>2</sup> em relação à área total mundial.

Regiões	UICN		FISHER; SPALDING		SPALDING <i>et al.</i>	
	(1993)		(1993)		(1997)	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Sul e sudeste de Ásia	51.766	30,70	76.226	38,30	75.173	41,50
Oceania	16.980	10,00	15.145	7,60	18.789	10,40
América	67.446	40,00	51.286	25,80	49.096	27,10
África oriental	27.110	16,00	49.500	24,90	27.995	15,05
África Ocidental e Oriente médias	5.508	3,30	6.661	3,30	10.024	5,50
Área total	168.810		198.818		181.077	

Fonte: (SPALDING; FIELD, 1998)

O Brasil é o segundo país com a maior área de mangue do mundo com aproximadamente 13.000 km<sup>2</sup>, (Tabela 2). A maior faixa de manguezal contínua do planeta se encontra no nordeste do Pará, na costa norte da Amazônia brasileira, com 7.591,09 km<sup>2</sup> equivalente a 56% dos manguezais do Brasil.

Tabela 2 - Países com as maiores áreas de Manguezal (km<sup>2</sup>) e porcentagens em relação ao total estimado no mundo.

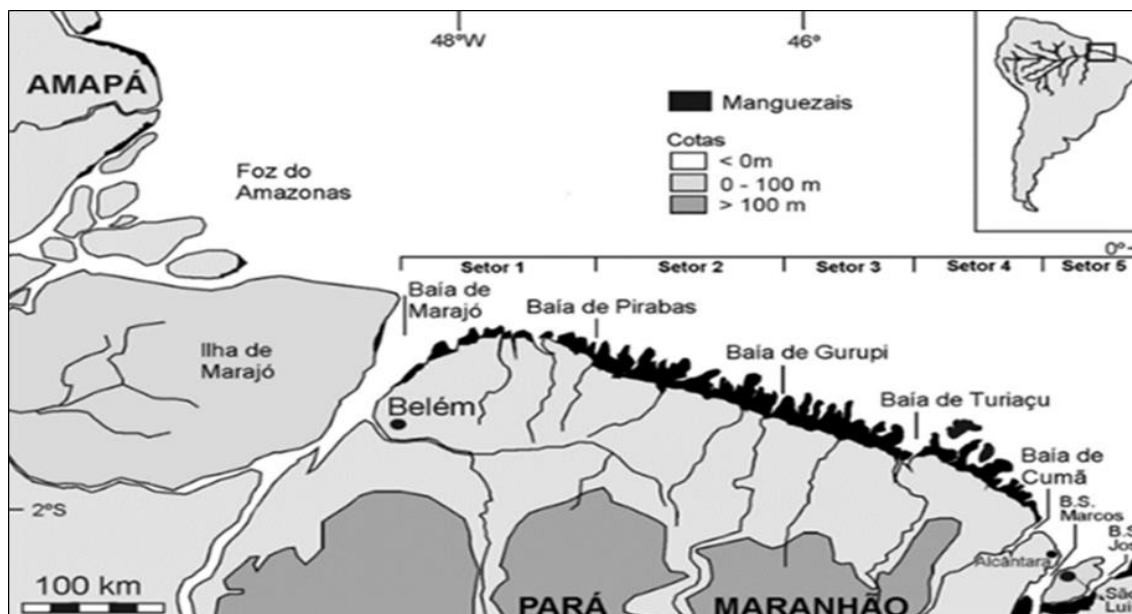
Países	Área de manguezal em (km <sup>2</sup> )	%
Indonésia	42.550	23,50
Brasil	13.400	8,50
Austrália	11.500	6,40
Nigéria	10.515	5,80
Cuba	7.848	4,30
Papua e Nova Guiné	5.399	2,90
México	5.315	2,90

Fonte: (SPALDING; FIELD, 1998).

A costa do estado de Pará possui 2.176,31 km<sup>2</sup>, enquanto que, o estado de Maranhão possui uma extensão de 5.414,31 km<sup>2</sup> de área de mangue (SOUZA FILHO, 2005), denominada Costa dos Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA) (Figura 2). Esta zona apresenta os manguezais mais exuberantes quando comparado com outras áreas de mangue do país, isto se deve às descargas de água doce fornecidas pelos rios, condições oceanográficas, meteorológicas e marés que oscilam entre 4 e 8 m de altura, precipitações anuais acumuladas de 2000 mm e as temperaturas que variam entre 24 a 32 °C (KJERFVE *et al.*, 2002).

Dentro do *habitat* de mangue os táxons são especializados e segregados em relação à altura das marés, salinidade da água, tipo e aeração do solo. A maior diversidade ocorre no oceano atlântico nas costas de América do sul, acompanhada de abundância e especialização ecológica (RICKLEFS; LATHAM, 1993). Considerando as características ambientais da Amazônia brasileira, como complexo hidrológico, regime de macromaré, clima quente e úmido é de esperar que uma maior variabilidade estrutural dos bosques de mangue em comparação aos que ocorrem ao longo da costa brasileira (ICMBio, 2018).

Figura 2- Mapa de localização da Costa de Manguezal de Macromaré da Amazônia (CMMA)



Fonte: (SOUZA FILHO, 2005).

#### 1.4 Estuários

Estuários são ecossistemas de corpos de água costeira semifechados com ligação livre com o oceano, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é diluída pela água doce das drenagens continentais, com muita importância dentro do ciclo biogeoquímico do carbono. Nas áreas de estuário continentais, os manguezais abrangem condições geomórficas e climáticas diversas, ocupando um total estimado de 83.000 a 138.000 km<sup>2</sup> das áreas, com a maior porcentagem encontrada entre 5° N e 5° S de latitude (GIRI *et al.*, 2011).

#### 1.5 Problema da pesquisa

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2001), reporta tendências dos aumentos nas concentrações de GEE desde o início da era Pré-industrial. O CH<sub>4</sub> variou de 272 até 1,833 ppb e CO<sub>2</sub> de 278 até 398 ppm (OWMAG, 2015). O efeito estufa é um fenômeno natural que permite a existência de vida na Terra, já que sem ele o calor escaparia da atmosfera, causando esfriamento e deixando o planeta inabitável para os humanos, animais e vegetais. Este fenômeno está sendo intensificado pelas ações humanas, a queima de combustíveis fósseis, atividades industriais pecuária e queima de floresta com emissões para a atmosfera dos gases como CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> resultando em uma maior retenção de calor e consequentemente o aquecimento global.

A maioria dos estudos sugere que as emissões de CH<sub>4</sub> têm seu foco em zonas alagadas e corpos de águas continentais, onde ocorrem os maiores fluxos (GIANI *et al.*, 1996), e em sistemas agrícolas como as plantações de arroz (MORENO-MAY *et al.*, 2010). O interesse de pesquisar as emissões dos gases de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> nas interfaces solo-atmosfera e água-atmosfera em ecossistema de manguezal é importante porque os cálculos globais destes gases ainda não são bem conhecidos (ALLEN *et al.*, 2007). Sendo este um tema de interesse a nível mundial e nacional, e pelo papel importante que desempenham nas contribuições das mudanças climáticas do planeta, é necessária maior informação sobre a precisão das magnitudes para serem incluídos nos inventários globais dos GEE.

## 1.6 Objetivo geral

Avaliar os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> do solo e da água em área de manguezal no estuário amazônico, (Ilha da Macaca e Estuário Mojuim), em São Caetano de Odivelas, Pará.

### 1.6.1 Objetivos específicos

- Investigar a Sazonalidade dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no solo de uma floresta de mangue no estuário do rio Mojuim e sua correlação com fatores ambientais.
- Medir a variabilidade dos fluxos temporais CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na interface água-atmosfera no estuário do rio Mojuim.
- Investigar a variação espacial e sazonal dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no solo em gradiente topográfico, em ecossistema de mangue na Ilha Macaca no Estuário Amazônico Brasileiro.
- Estimar os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> espacial e sazonal do estuário Mojuim e sua correlação com variáveis físico-químicas da água.

## 1.7 Hipóteses

H1: Existe diferença significativa nos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> do solo quando analisado em diferentes horas do dia, sendo mais perceptíveis na estação seca em comparação a estação chuvosa.

H2: Os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> provenientes da superfície aquática analisados em diferentes horas do dia apresentam variabilidade horária e sazonal.



H3: Os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> do solo variam diferentemente em relação à topografia durante o ano e apresentam sazonalidade durante o ano.

H4: O estuário do rio Mojuim é fonte de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> da água para a atmosfera e não existe variação espacial entre os diferentes ambientes aquáticos.

## 1.8 Estrutura da tese

A tese está apresentada em formato de artigo, dividida em capítulos: **Primeiro capítulo:** Tópicos temáticos da tese, objetivos (geral e específicos) e hipóteses. **Segundo capítulo:** apresenta os resultados dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> em floresta de mangue em duas campanhas diárias e sazonais, e sua correlação com variáveis ambientais e edáficos. **Terceiro capítulo:** trata-se da estimativa dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> feitos em duas campanhas diárias e sua variabilidade espacial e temporal na interface água-atmosfera do estuário Mojuim, medidos nas épocas seca do ano 2017 e chuvosa de 2018. **Quarto capítulo:** variações dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na floresta de manguezal sazonal e espacial, e variáveis físicas e químicas do solo. **Quinto capítulo:** apresenta os resultados dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> obtidos durante um ano mensal em seis pontos do estuário Mojuim em duas épocas climáticas e correlação com variáveis físico-químicas da água. **O sexto capítulo:** apresenta a discussão geral e conclusão da pesquisa.

## **CAPITULO 2 FLUXOS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> EM FLORESTA DE MANGUE NO ESTUÁRIO AMAZÔNICO E CORRELAÇÃO COM FATORES AMBIENTAIS E DE SOLO EM SÃO CAETANO DE ODIVELAS, PARÁ**

### **Resumo**

Os manguezais são considerados importantes por reter as mudanças climáticas por serem sumidouros de carbono, mas pouco se sabe sobre como a variação topográfica, o movimento das marés e como a sazonalidade influencia no fluxo de gases do solo em áreas tropicais. Um estudo preliminar foi realizado para quantificar a influência da sazonalidade e da topografia nas emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> do solo de um manguezal localizado em uma ilha na costa amazônica. Utilizou-se a metodologia de câmara fechada dinâmica, as medidas foram realizadas em diferentes momentos do dia durante a época seca e na época chuvosa. Na época seca, foram realizadas medições simultâneas em topografia baixa 2,0 m (S1) e alta 2,5 m (S2) acima do nível médio das marés. As emissões foram em média 8,384 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e 0,145 g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. O fluxo médio de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> no solo foi maior nas áreas S1, do que nas S2, sendo que o CH<sub>4</sub> foi consumido da atmosfera apenas em S2. O fluxo do solo dos dois gases não se correlacionou com o movimento das marés, nem com fatores microclimáticos. O carbono e nitrogênio orgânico total foram essenciais para o fluxo de CO<sub>2</sub>, e nenhum das variáveis influenciou o fluxo de CH<sub>4</sub>. No estuário da Amazônia, é possível comparar o fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> do solo da área de mangue analisada em diferentes momentos do dia, porque, o movimento das marés não interferiu nos fluxos. No entanto, a variação topográfica deve ser considerada para maior precisão nos resultados.

Palavras chave: Fluxo de CO<sub>2</sub>; Fluxo CH<sub>4</sub>; Sazonalidade; Nível das marés; Variação da topografia; Estuário amazônico

**Abstract**

Mangroves are considered important because they retain climate change because they are carbon sinks, but little is known about how topographic variation, tidal movement and how seasonality influence the flow of soil gases in tropical areas. A preliminary study was conducted to quantify the influence of seasonality and topography on soil CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from a mangrove swamp located on an island off the Amazon coast. Dynamic closed chamber methodology was used, measurements were taken at different times of the day during the dry and rainy seasons. In the dry season, simultaneous measurements were taken at low 2.0 m (S1) and high 2.5 m (S2) topography above the average tidal level. Emissions were on average  $8.384 \pm 0.630$  g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and  $0.145 \pm 0.068$  g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. The average fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the soil was higher in areas S1 than in S2, and CH<sub>4</sub> was consumed from the atmosphere in S2. The soil flow of the two gases did not correlate with tidal movement or microclimatic factors. Total organic carbon and nitrogen were essential for CO<sub>2</sub> efflux, none of variables influenced CH<sub>4</sub> flux. In the Amazon estuary, it is possible to compare the fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from the soil of the mangrove area analyzed at different times of the day, because tidal movement did not interfere with the fluxes. However, topographic variation should be considered for greater accuracy in the results.

**Key Words:** CO<sub>2</sub> fluxes; CH<sub>4</sub> flux; Seasonality; Tidal level; Topography variation; Amazon estuary.

## 2.1 Introdução Geral

Os estuários são ecossistemas dinâmicos que conectam os compartimentos terrestre, fluvial, oceânico e atmosférico dentro do ciclo biogeoquímico do carbono. Nas áreas estuarinas, os manguezais abrangem condições geomórficas e climáticas diversas, e uma superfície estimado de 83.000 a 138.000 km<sup>2</sup> das áreas com influência de marés. A maior porcentagem de manguezais é encontrada entre 5° N e 5° S de latitude (GIRI *et al.*, 2011).

Os manguezais estuarinos nas regiões tropicais e subtropicais são reconhecidos como um dos principais contribuintes marinhos para a emissão de GEE na atmosfera (ALLEN *et al.*, 2011; CHEN, TAM; YE, 2012). Colaboram com até 15% (26,1 Tg C) do carbono orgânico total enterrado em ambientes marinhos anualmente (BREITHAUPT *et al.*, 2012). A produtividade primária é estimada em  $218 \pm 72$  Tg C ano<sup>-1</sup> (BOUILLON *et al.*, 2008). Um acúmulo de compostos fenólicos inibe a atividade microbiana, (FRIESEN; DUNN; FREEMAN, 2018), atuando como um grande repositório de matéria orgânica com 1,023 Mg C ha<sup>-1</sup>, sendo 49–98% deste total se encontra no solo (DONATO *et al.*, 2011), os quais são oligotróficos (ALLEN *et al.*, 2011), constituindo-se como um importante sumidouro de CO<sub>2</sub> atmosférico, denominado “carbono azul” (WANG *et al.*, 2016).

Recentemente, vários estudos focaram nas emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> na interface solo-ar em maré baixa (BULMER; LUNDQUIST; SCHWENDENMANN, 2015; CHANDA *et al.*, 2014a; CHEN, TAM; YE, 2010; HAYES *et al.*, 2016; LEOPOLD *et al.*, 2013; LIVESLEY; ANDRUSIAK, 2012; WANG *et al.*, 2016), e entre água-ar em canal de maré (BORGES; ABRIL, 2011; BOUILLON *et al.*, 2008; CALL *et al.*, 2015; MAHER *et al.*, 2015).

Entretanto, poucos estudos focaram nas emissões de GEE do solo para atmosfera, em diferentes gradientes topográficos, dentro de uma floresta de mangue em relação ao movimento da maré. Apesar do crescente interesse em quantificar as várias vias de carbono dos manguezais (BOUILLON *et al.*, 2008; DONATO *et al.*, 2011; JACOTOT; MARCHAND ; ALLENBACH, 2018), grandes incertezas permanecem nos balanços nos fluxos de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. As emissões de CO<sub>2</sub> dos estuários mostram alta variabilidade temporal e espacial de 0,094 a 0,6 Pg C ano<sup>-1</sup> (CHEN-TUNG ; BORGES, 2009; LARUELLE *et al.*, 2010; REGNIER *et al.*, 2013). A estimativa global revisada para a emissão de CO<sub>2</sub> do estuário em latitude de 0 a 23,5° S foi de  $2,3 \pm 0,7$  g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (ROSENRETER *et al.*, 2018).

De acordo com RoyChowdhury *et al.* (2018) em solos anóxico de mangue, quando o oxigênio livre, óxidos metálicos, nitratos e sulfatos são exauridos pode ocorrer o processo de metanogênese. No entanto, evidências mostram que microrganismos redutores de sulfato e metanogênicos podem coexistir em solos de mangue indicando que as emissões de metano podem estar subestimadas (CHAUHAN *et al.*, 2015; LYIMO *et al.*, 2009). As emissões globais de CH<sub>4</sub> dos estuários têm incertezas ainda maiores que o CO<sub>2</sub>, variando em uma ordem de magnitude de 0,8 a 6,6 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup> (BORGES; ABRIL, 2011; MIDDELBURG *et al.*, 2002; UPSTILL-GODDARD *et al.*, 2000), e a emissão inclui a interface sedimento-atmosfera de áreas entre marés. Essa variação nas emissões de CH<sub>4</sub> em área de mangue é de 0,7 10<sup>5</sup> a 10,5 10<sup>5</sup> g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (BARNES *et al.*, 2006; DALAL *et al.*, 2008). Aqui estudamos o fluxo de CO<sub>2</sub> e o fluxo de CH<sub>4</sub> do solo associado à topografia e ao movimento das marés no manguezal da Amazônia, sem perturbações antrópica, durante o verão (denominado de estação seca) e inverno (denominado de chuvosa).

## 2.2 Material e métodos

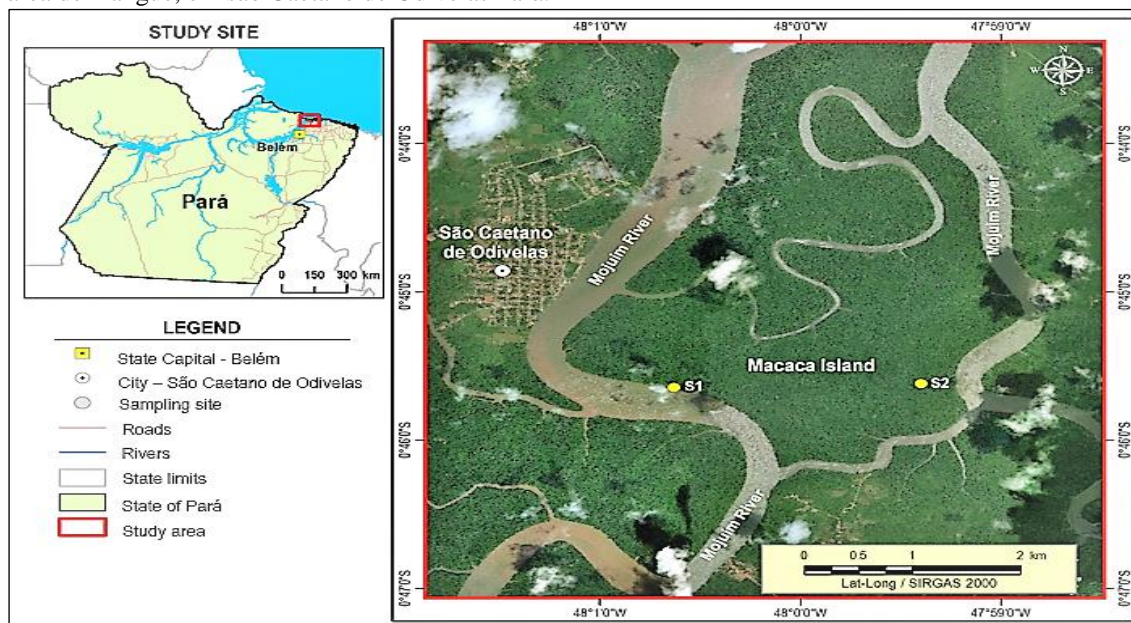
### 2.2.1 Área de estudo

As áreas de estudo estão localizadas na reserva extrativista Marinha Mocapajuba (Ilha Macaca), no município de São Caetano de Odivelas (PA) (Figura 1). O clima da região é tropical úmido, tipo *Am* segundo a classificação Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007) com dois períodos sazonais: estação chuvosa (janeiro a junho) e estação seca (julho a dezembro). A temperatura varia de 24 °C a 32 °C, com uma precipitação média anual de 2.732 mm (MARTORANO; PEREIRA, 1993).

A Ilha da Macaca mede aproximadamente 14,2 km<sup>2</sup> e faz parte da maior faixa de manguezal contínua do planeta, com 7.591 km<sup>2</sup> de área, equivalente a 56,6% dos manguezais do Brasil, o estado do Pará com 2.176,78 km<sup>2</sup> de área coberta por bosque de manguezal. A ilha é influenciada pelo ciclo das marés semi-diurnas devido à sua localização. (SOUZA FILHO, 2005).

A espécie mais abundante encontrada no ecossistema de mangue na ilha estudada é com *Rhizophora mangle* L. (família *Rhizophoraceae*). A biomassa aérea foi estimada com equações alométricas, utilizando-se medidas de diâmetro na altura do peito (DAP) ≥ 5,0 cm, em quatro delineamentos radiais agrupados (KAUFFMAN; COLE, 2010), nos dois locais estudados (S1 e S2). (MATTEUCCI; COLMA, 2002).

Figura 1- Localização da área de estudo e locais de coleta de amostras (S1 e S2) em ecossistema de solo em área de mangue, em São Caetano de Odivelas, Pará.



Fonte: Autor.

### 2.2.2 Desenho experimental

Os fluxos de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  foram avaliados em duas alturas topográficas acima do nível do mar, sendo 2,0 m para S1 (latitude  $-0,760763^\circ$  e longitude  $-48,010509^\circ$ ) e 2,5 m para S2 (latitude  $-0,760414^\circ$  e longitude  $-47,989905^\circ$ ). As medições foram realizadas na época seca (novembro 2017) e chuvoso (março 2018). Para as medições simultâneas, realizadas em S1 e S2, foram traçadas uma circunferência de 20,00 m de diâmetro, cobrindo 314,20  $\text{m}^2$ , sendo distribuídas 8 câmaras, e uma separação de 7,90 m, e as medidas foram feitas utilizando a técnica de câmara com circulação fechada (DAVIDSON; TRUMBORE, 1995; VERCHOT *et al.*, 2000), ligada a um analisador com infravermelho automatizado (*ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer, Los Gato Research* modelo 915-0011-1000).

O equipamento foi calibrado usando as amostras padrões de gás  $\text{CH}_4$  (0,94 e 3,15 ppm) e  $\text{CO}_2$  (0,395 e 1.510 ppm) o qual mediu a concentração dos gases a uma frequência de 1 Hz. A precisão garantida pelo fabricante é de 2 ppb (5 s) 300 ppb (5 s) para  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . As câmaras utilizadas foram fabricadas de forma cilíndrica e material de *Polyvinyl Cloreto* (PVC) com diâmetro de 19,2 cm e 12,0 cm de altura. Cada câmara foi fechada na parte superior com uma tampa de 20,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura. A tampa possui três furos pela parte superior para a circulação do gás entre a câmara e o aparelho, e um terceiro para manter a pressão atmosférica de dentro da câmara idêntica do exterior.

Foram mensurados *in situ* variáveis ambientais, como temperatura do ar (Tar, °C), umidade relativa do ar (Ur, %), velocidade do vento (Vv, m s<sup>-1</sup>) com um termo-higroanemômetro portátil (modelo AK821) à 2,0 m acima da superfície do solo, e a temperatura do solo (Ts, °C) com um termômetro portátil digital (modelo TP101). As variáveis físico-químicas de solo (n = 8) foram realizadas a 0,15 m de profundidade, potencial de hidrogênio (pH) e o potencial redox (Eh), com um equipamento (Methrom 744). O pH foi registrado com eletrodo de vidro calibrado com soluções padrões de pH (4,0 e 7,0), e Eh foi usado um eletrodo de platina corrigido (+244 mV) (EMBRAPA, 2017).

Carbono total (Cot) e Nitrogênio total (Not) foram calculados através de volumetria (oxirredução) pelo método Walkley-Black. Foram utilizados 0,2 g de solo e 10 ml de dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), com titulação posterior com ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), respectivamente (EMBRAPA, 2017; SILVA, 2018).

O Carbono microbiano (Cm) e Nitrogênio microbiano (Nm) foi determinada pelo método de Irradiação-extração do solo pela técnica de micro-ondas (EMBRAPA, 2017; ISLAM; WEIL, 1998; SILVA, 2018; SPARLING; WEST, 1988; TEDESCO, VOLKWEISS; BOHNEN, 1985). O Cm foi determinado por oxidação de dicromato (KALEMBAS; JENKINSON, 1973; VANCE, BROOKES; JENKINSON, 1987). O Nm foi analisado seguindo o método descrito por (BROOKES *et al.*, 1985), trocando a fumigação por irradiação, que utiliza a diferença entre a quantidade de N no solo irradiado e não irradiado dividido pela constante k (k = 0,45) (VANCE, BROOKES; JENKINSON, 1987). Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas do Museu Paraense Emílio Goeldi (LAQGoeldi), em Belém (PA).

As medições em S1 e S2 no período seco aconteceram simultaneamente nos horários de 10h00min, 11h00min, 12h00min, 13h00min, 14h00min e 15h00min, omitindo os dados de S2 no período chuvoso, devido à quebra de um dos aparelhos. Cada anel foi distribuído aleatoriamente e enterrado a uma profundidade de aproximadamente 5,0 cm e repousou por 30 minutos até a estabilização, e fechado por 4 minutos. O registro das concentrações foi a cada 2 segundos em tempo real, sendo os dados coletados em baixa-mar e totalizando 192 medições durante a campanha.

### 2.2.3 Cálculo dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>

Os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) foram integrados em função do tempo e calculados usando a seguinte equação (1):

$$F = PVM\mu \left( \frac{dc/dt}{ATR} \right) \quad \text{Equação. 1}$$

Onde F= fluxo g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, P = a pressão atmosférica (atm), V = volume da câmara em litros (3,47 L), M = massa molar do CH<sub>4</sub> (16 g mol<sup>-1</sup>), ou CO<sub>2</sub> (44 g mol<sup>-1</sup>), μ = o fator de conversão das unidades (0,0864 L S / μL<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), A = área coberta pela câmara, T = a temperatura da câmara em kelvin (K) e R = a constante do gás (0,08205 L atm / K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>), dc/dt, se cálculo por regressão linear ( $\gamma = \beta_0 + \beta_1 \times$ ) (ABICHOU *et al.*, 2006; FRANKIGNOULLE, 1988; MCEWING; FISHER; ZONA, 2015), foram considerados como fluxo somente, os pontos que representaram um aumento linear  $R^2 \geq 0,3$ , enquanto que, um aumento linear  $R^2 < 0,3$  foi considerado como zero (SUNDQVIST *et al.*, 2014).

### 2.2.4 Conversão a carbono equivalente

Os fluxos de CH<sub>4</sub> foram convertidos a emissões de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>-eq), considerando seu potencial de aquecimento global 23 vezes maior que o de CO<sub>2</sub> para um período de 100 anos (STOCKER, *et al.*, 2013), pela seguinte equação (2):

$$CO_{2\text{-eq}} = FCO_2 + (FCH_4 * 23) \quad \text{Eq 2}$$

Onde F são os fluxos de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, e 23, é o potencial de esquecimento global do CH<sub>4</sub> em relação ao CO<sub>2</sub> em um período de 100 anos.

### 2.2.5 Análise dos dados

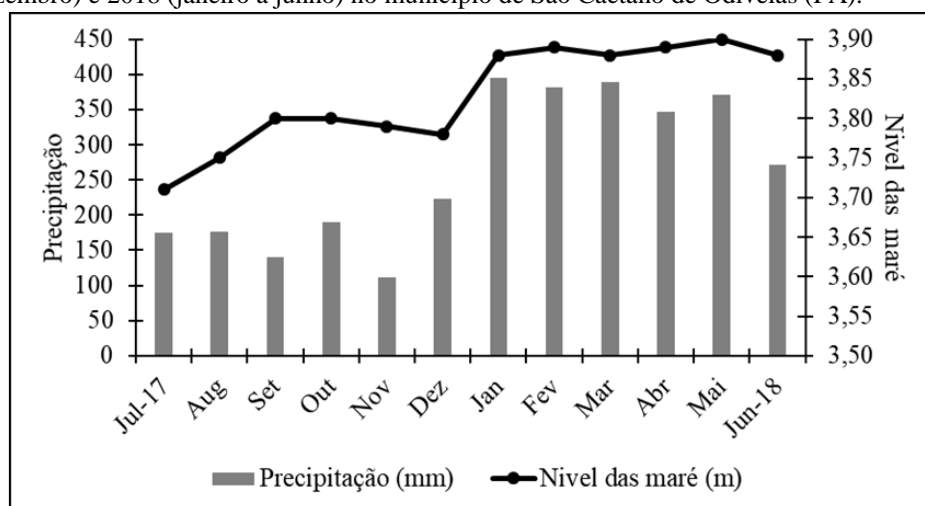
O teste t de Student foi utilizado para testar as diferenças significativas (p < 0,05) nas emissões entre os diferentes tempos de amostragem, bem como entre os dois períodos sazonais quando as distribuições foram normais, sendo que para análise dos dados não paramétricos foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis. Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software* estatístico livre Infostat ®.



### 2.3 Resultados e discussão

Durante o período de estudo percebe-se uma sazonalidade anual (Figura 2), com uma precipitação total de 3.171,5. Nos meses secos de julho a dezembro de 2018, foi observando-se 1.016,5 mm, e o mês mais seco foi novembro com 111,1 mm. O período chuvoso de janeiro a junho ano 2018, com 2.155,0 mm, o janeiro com a maior precipitação de 395,0 mm. A temperatura variou de 24 °C mínima e 32°C máxima, estas variáveis não foram significativas de suas médias históricas a qual apresentou uma de precipitação 2.732 mm (1981 a 2018) (Test t;  $\alpha < 0,05$ ). Dados climatológicos da série foram obtidos na Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automatizada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Soure (00°43'40" S, 48°30'56" W), a uma distância de 71,5 km noroeste da área de estudo. As marés apresentaram sazonalidade anual, às mais baixas no período seco em julho com 3,71 m, acima do nível médio das marés, e as mais elevadas no período chuvoso em maio (3,90 m). A diferença da precipitação entre o período seco e chuvoso foi de 1.138,5 mm, e (0,10 m) entre as marés no mesmo período, sendo que nos dias de amostragem (13 de novembro de 2017), da estação seca a precipitação foi de (0,0 mm), sendo que no dia 28 de março, na estação chuvosa, ocorreu uma precipitação de (1,3 mm) (Figura 2). (BRASIL, 2018a).

Figura 2- Precipitação média (mm) e nível médio das marés (m) mensal dos anos de 2017 (julho a dezembro) e 2018 (janeiro a junho) no município de São Caetano de Odivelas (PA).



Fonte: Autor.

### 2.3.1 Composição florística

As áreas S1 e S2 apresentaram estrutura e composição florística semelhantes em, área basal média para os locais S1 e S2 foi de  $6,04 \pm 0,94$  e  $7,79 \pm 1,89 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , e uma biomassa total de  $55,00 \pm 12,30$  e  $66,55 \pm 20,30 \text{ Mg ha}^{-1}$ , e não diferiram significativamente ( $p > 0,05$ ) respectivamente. A estimativa foi calculada por equações alométricas. Apenas duas espécies foram encontradas nos sítios S1 e S2, *Rhizophora mangle* L. e *Avicennia germinans* (L.) Stearn, com um índice de valor importante de 74,13% e 25,87% em S1 e 61,97% e 32,36% em S2 para cada espécie, respectivamente. *R. mangle* teve uma abundância relativa média de 85,87%, com uma dominância média relativa de 64,71% na área de estudo. As florestas de mangue no estuário da Amazônia fazem parte do maior cinturão contínuo de manguezais, com 7.600 km<sup>2</sup> (Souza Filho, 2005). A floresta dominada por *R. mangle* (cobertura de 62,00%) também encontradas em Soure, Salinópolis e Maracanã no estado do Pará (DE CARVALHO; JARDIM, 2017).

### 2.3.2 Fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no mês seco

O fluxo médio de CH<sub>4</sub> do solo para a atmosfera na época seca, variou em S1 de  $0,104 \pm 0,030 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  a  $-0,0005 \pm 0,0001 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em S2 (Tabela 1). Encontrada diferença estatística entre S1 e S2 (Dunn: 7,4156;  $p < 0,05$ ). No local mais baixo (S1) o fluxo médio de CH<sub>4</sub> foi maior do que no local mais alto (S2), onde se observou um consumo de CH<sub>4</sub> atmosférico (Tabela 1). O fluxo de CH<sub>4</sub>, dentro dos tempos analisados, não variou estatisticamente entre S1 e S2 ( $p > 0,05$ ), entretanto, os resultados mostram uma significativa diferença entre S1 e S2 dos tempos analisados ( $p < 0,05$ ).

As emissões de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera no período seco, variaram de  $10,866 \pm 1,385 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em S1, sendo que em S2 variou de  $7,650 \pm 0,498 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabela 1). A análise estatística dos dados mostrou uma diferença entre S1 e S2 (LSD teste: 2,185;  $p = 0,031$ ), sendo que no local mais baixo (S1) o fluxo médio de CO<sub>2</sub> foi significativamente maior do que o local mais alto (S2). O fluxo de CO<sub>2</sub> dentro dos tempos analisados não variou estatisticamente nos dois locais ( $p > 0,05$ ) e entre os locais ( $p > 0,05$ ), em cada tempo de análise (Tabela 1). Apesar de encontrarmos uma variação significativa entre os locais, quando se analisa os fluxos médios de CO<sub>2</sub>, estes são os mesmos nos locais baixos e altos, em cada horário analisado (Tabela 1)

Quando se iniciou a amostragem dos gases no período seco (10h00min) a maré estava vazando (Tabela 1), e ao concluir a maré estava enchendo, a amostragem dos gases abrangeu toda a movimentação da maré com exceção dos momentos de cheia. A água não chegou a cobrir o solo durante a época seca. Admitindo-se as 12h00min o ponto de inflexão da maré no período seco (Tabela 1), sendo das 05h28min até 12h17min a maré está vazando, o fluxo de  $\text{CO}_2$  foi em média maior na maré enchente com  $12,218 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em S1; e  $8,173 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em S2, em comparação quando a maré está vazando foi  $9,940 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em S1; e  $6,866 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em S2. O mesmo acontece para o fluxo de  $\text{CH}_4$  em S1, sendo que em S2 não foi observado, por ser de topografia mais alta, tendo consumo de  $\text{CH}_4$  atmosférico (Tabela 1).

Tabela 1- Variação local e sazonal horária e total para os fluxos de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> em g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Media±EP, n=8) em área de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). Letras minúsculas e maiúsculas diferentes representam significância entre as médias de distribuição normal (LSD, p < 0,05), e entre as médias de distribuição não normal (Kruskal-Wallis, p < 0,05), quando analisado os tempos de coleta e entre locais no período seco, respectivamente. Onde n.d. significa não determinado. Letras X e Y representam significância entre as médias de distribuição normal (LSD, p < 0,05), e entre as médias de distribuição não normal (Kruskal-Wallis, p < 0,05) quando analisado os dois períodos sazonais em S1.

Tempo Horas	Seco				Chuvoso	
	S1		S2		S1	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
10:00	0,143±0,070 <sup>aAX</sup>	9,010±2,407 <sup>aAX</sup>	-0,0005±0,0002 <sup>aB</sup>	7,484±1,014 <sup>aA</sup>	0,088±0,154 <sup>aX</sup>	4,202±1,441 <sup>bX</sup>
11:00	0,068±0,021 <sup>aAX</sup>	10,869±3,591 <sup>aAX</sup>	-0,0010±0,0004 <sup>aB</sup>	6,875±0,895 <sup>aA</sup>	0,948±0,914 <sup>aX</sup>	6,628±2,251 <sup>bX</sup>
12:00	0,043±0,014 <sup>aAX</sup>	8,664±2,969 <sup>aAX</sup>	-0,0004±0,0001 <sup>aB</sup>	7,648±1,064 <sup>aA</sup>	-0,309±0,343 <sup>aX</sup>	2,158±0,524 <sup>bY</sup>
13:00	0,183±0,106 <sup>aAX</sup>	12,409±3,457 <sup>aAX</sup>	-0,0006±0,0003 <sup>aB</sup>	9,398±1,512 <sup>aA</sup>	0,987±0,461 <sup>aX</sup>	4,464±1,259 <sup>bY</sup>
14:00	0,044±0,019 <sup>aAX</sup>	15,418±5,198 <sup>aAX</sup>	-0,0003±0,0001 <sup>aB</sup>	7,094±1,473 <sup>aA</sup>	0,037±0,017 <sup>aX</sup>	13,975±3,596 <sup>aX</sup>
15:00	0,141±0,126 <sup>aA</sup>	10,541±2,093 <sup>aA</sup>	-0,0002±0,0001 <sup>aA</sup>	8,028±1,038 <sup>aA</sup>	n.d.	n.d.
Médio	0,104±0,030 <sup>aX</sup>	10,866±1,385 <sup>aX</sup>	-0,0005±0,0001 <sup>B</sup>	7,650±0,498 <sup>B</sup>	0,350±0,223 <sup>X</sup>	6,286±1,104 <sup>Y</sup>

Fonte: Autor.

A condição hidrológica do solo é determinada pela topografia, que regula a respiração de microrganismos (aeróbicos ou anaeróbicos), e é um fator decisivo que controla o fluxo de carbono do solo (DAI *et al.*, 2012; DAVIDSON *et al.*, 2000; VERCHOT *et al.*, 2000). A distribuição de água no solo é crucial na determinação do nível de anoxia do solo que determina a intensidade da atividade de bactérias metanogênicas e/ou metanotróficas (DALAL *et al.*, 2008; KETTUNEN *et al.*, 1999).

O estudo mostrou que a pequena variação topográfica na área de mangue foi essencial para uma variação do fluxo de CO<sub>2</sub> e para indicar um consumo ou produção de CH<sub>4</sub>. Áreas seca com níveis mais baixos de água subterrânea geralmente apresentam menores emissões de CH<sub>4</sub> devido à metanogênese reduzida e aumento da zona oxidativa e, portanto, aumentam a taxa de oxidação do CH<sub>4</sub> (INUBUSHI *et al.*, 2005; ROSLEV; KING, 1996).

Entre as variáveis do solo, apenas pH, Cm e Nm não diferiram estatisticamente ( $p > 0,05$ ) entre os dois locais (Tabela 2). O Eh, respondeu à diferença de umidade do solo, com potencial reduzido (anóxico) em S1, onde o solo estava mais úmido (Tabela 2). A anoxia do solo em S1 também parece explicar a maior concentração de Cot, Not, razão C:N e MO em comparação com S2. O fator de oxidação confirmou a atividade metanotróficas e o menor fluxo de CO<sub>2</sub> registrado em S2. Os solos secos podem estar associados a baixas concentrações de CO<sub>2</sub>, pois apresentam alta difusividade, permitindo um rápido fluxo de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (DALAL *et al.*, 2008; RISK; KELLM; BELTRAMI, 2008). Estudos indicam que a celulose e a lignina podem ser facilmente degradadas em condições aeróbicas. No entanto, eles são degradados lentamente quando prevalecem as condições anaeróbicas (HAWKINS; FREEMAN, 1994) e podem permanecer estocados nos primeiros 1,5 m dos sedimentos até 50 anos (DITTMAR; LARA, 2001).

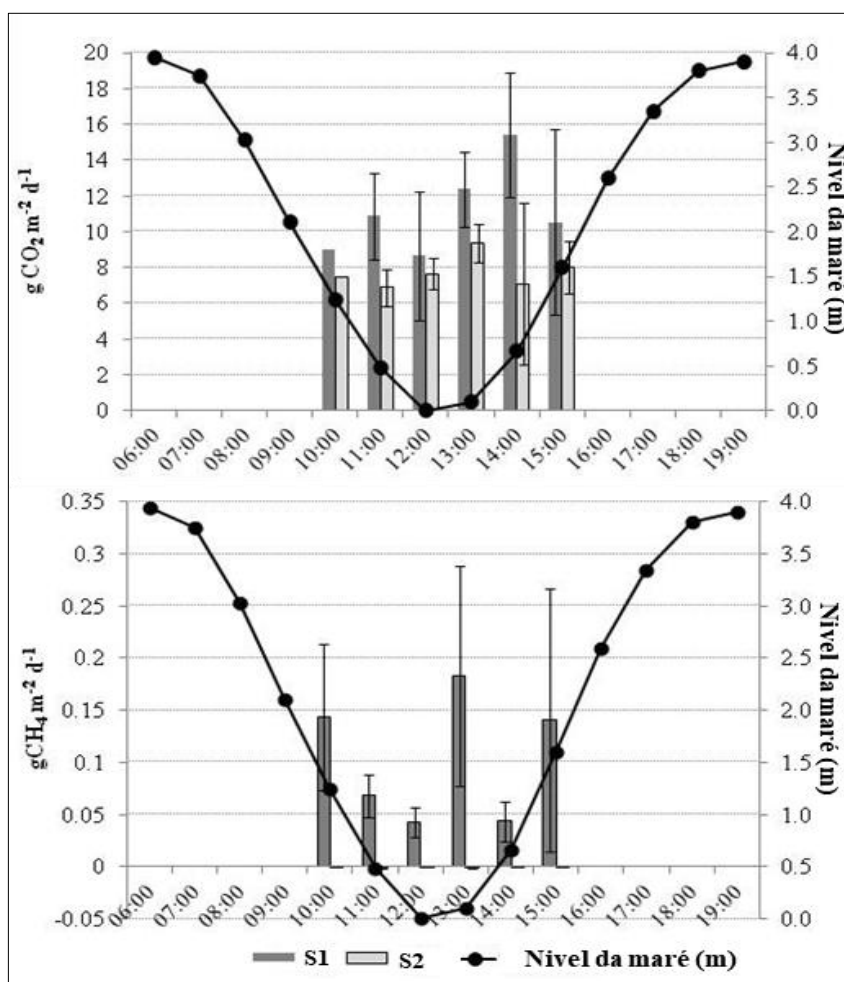
Tabela 2- Variação sazonal e local para características físicas e orgânicas do solo (Media  $\pm$  Ep, n=4) em área de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). Letras minúsculas expressam a variação local, e as maiúsculas à variação sazonal, sendo que quando diferentes mostram a variação significativa entre as médias (LSD,  $p < 0,05$ ).

Época/ zona			Carbono orgânico		Nitrogênio orgânico				
			Total	Microbial	Total	Microbial			
<b>Seco</b>	pH	Eh (mV)	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	C:N	MO (g kg <sup>-1</sup> )	Umidade (%)
S1	5,60 $\pm$ 0,35 <sup>aA</sup>	13,00 $\pm$ 54,83 <sup>bA</sup>	29,89 $\pm$ 0,47 <sup>aA</sup>	0,35 $\pm$ 0,03 <sup>aA</sup>	1,59 $\pm$ 0,07 <sup>aA</sup>	13,13 $\pm$ 3,68 <sup>aA</sup>	18,9 $\pm$ 40,73 <sup>aA</sup>	51,53 $\pm$ 0,81 <sup>aA</sup>	51,00 $\pm$ 0,60 <sup>aA</sup>
S2	5,75 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	297,50 $\pm$ 7,35 <sup>a</sup>	8,30 $\pm$ 0,51 <sup>b</sup>	0,19 $\pm$ 0,09 <sup>a</sup>	1,28 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	22,01 $\pm$ 4,75 <sup>a</sup>	6,49 $\pm$ 0,40 <sup>b</sup>	14,31 $\pm$ 0,87 <sup>b</sup>	36,10 $\pm$ 0,15 <sup>b</sup>
<b>Chuvoso</b>									
S1	4,09 $\pm$ 0,14 <sup>B</sup>	-93,75 $\pm$ 18,19 <sup>A</sup>	15,49 $\pm$ 0,05 <sup>B</sup>	0,75 $\pm$ 0,18 <sup>A</sup>	1,29 $\pm$ 0,01 <sup>B</sup>	1,70 $\pm$ 0,30 <sup>B</sup>	11,97 $\pm$ 0,10 <sup>B</sup>	26,71 $\pm$ 0,09 <sup>B</sup>	52,20 $\pm$ 0,80 <sup>A</sup>

Fonte: Autor.

O estudo começou com a diminuição do nível da água (maré vazante) e concluiu quando a maré estava fluindo (Figura 3). A amostragem de gás cobriu todo o movimento das marés, mas a água não atingiu a superfície do solo. O fluxo de gás não se alterou significativamente durante os tempos amostrados (Tabela 1). Consequentemente, não foi observada correlação com o movimento das marés. O fluxo de gás não diferiu significativamente ( $p > 0,05$ ) entre as marés vazante e enchente, nas duas topografias estudadas. Da mesma forma, os parâmetros microclimáticos não se correlacionaram significativamente ( $p > 0,05$ ) com o fluxo de  $\text{CO}_2$  ou  $\text{CH}_4$ .

Figura 3 - Fluxo de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) por hora nos dois locais amostrados (S1 e S2) em relação ao nível da maré, na época seca, em uma floresta de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). As barras mostram o erro padrão.



Fonte: Autor.

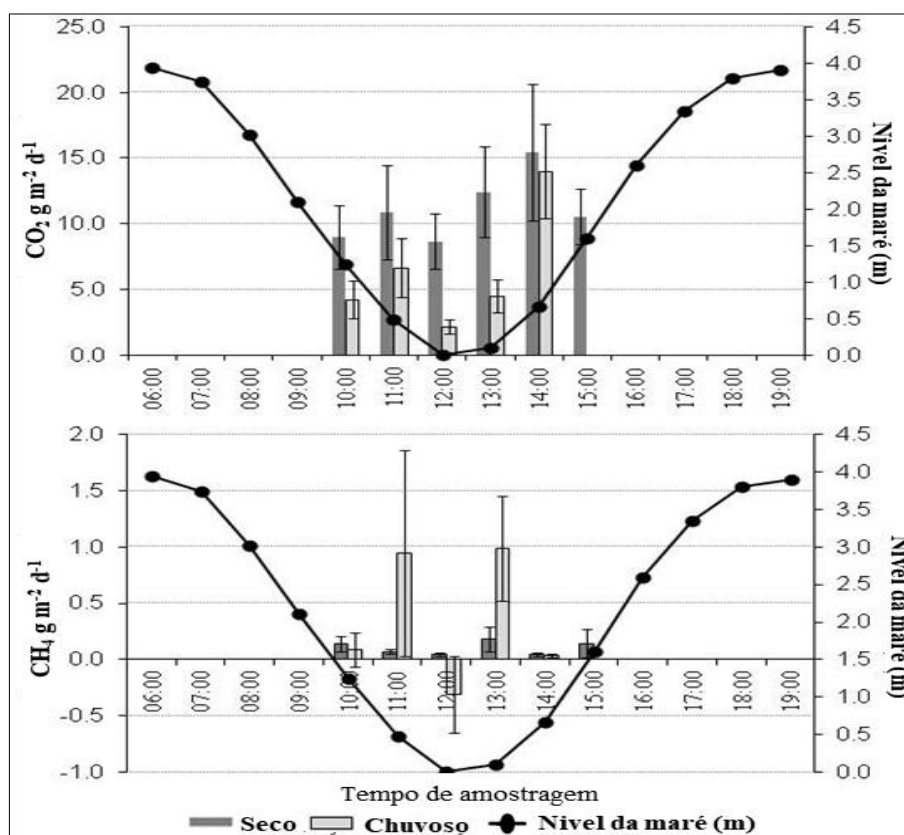
Ao contrário de outros estudos (CHEN *et al.*, 2012), a floresta de mangue na região amazônica apresentou maior fluxo de  $\text{CO}_2$  na baixa topografia (S1) do que na alta topografia (S2).

Os tempos de amostragem não afetaram o fluxo de CO<sub>2</sub> e o fluxo de CH<sub>4</sub>. Porém, diferentemente do que alguns autores mostraram (ALLEN *et al.*, 2007), os resultados na estação seca apresentam uma variação significativa entre a altura topográfica. O CH<sub>4</sub> atmosférico foi consumido e o fluxo de CO<sub>2</sub> foi menor no local mais seco (S2).

### 2.3.3 Fluxos de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> no mês chuvoso

O fluxo médio total de CO<sub>2</sub> na estação chuvosa foi de  $6,286 \pm 1,104 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabela 1, n = 40), sendo apenas às 14h00min significativamente maior ( $p < 0,05$ ) do que os outros tempos de amostragem. O fluxo de CH<sub>4</sub> não diferiu significativamente ( $p > 0,05$ ) entre os tempos de amostragem na estação chuvosa em S1 (Tabela 1). A amostragem de gás na estação chuvosa também cobriu todo o movimento das marés, e o solo não ficou inundado (Figura 4). Os menores fluxos de CO<sub>2</sub> foi de  $2,158 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e de CH<sub>4</sub>  $-0,309 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  foram registrados no tempo de inflexão das marés (Figura 4). Entretanto, os fluxos de gases não foram correlacionados ( $p > 0,05$ ) com o movimento das marés ou o microclima na estação chuvosa.

Figura 4 - Fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> ( $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) do solo nas duas estações do ano em relação ao nível da maré, em uma floresta de mangue em São Caetano de Odivelas (PA). As barras representam o erro padrão.



Fonte: Autor.



#### 2.3.4 Comparação entre as duas estações

Muito pouco se sabe sobre a variabilidade sazonal no fluxo de gases na floresta de mangue, principalmente na região amazônica. As mesmas condições de movimento das marés nas duas estações comparadas e o fluxo similar de CH<sub>4</sub> registrado indicam que a precipitação não é um fator decisivo para o fluxo de CH<sub>4</sub> nas topografias baixas. Isso foi confirmado em uma floresta tropical no norte da Tailândia, onde as diferenças nas taxas de respiração do solo entre as estações seca e chuvosa não foram significativas (Hashimoto *et al.*, 2004). Além disso, um estudo realizado em um manguezal no Quênia não mostrou um padrão claro no fluxo de CO<sub>2</sub> entre as estações, que foi moderadamente influenciado pela umidade do solo (KIRUI *et al.*, 2012). No entanto, estes dados mostram um fluxo de CO<sub>2</sub> substancialmente maior na época seca do que na chuvosa (Figura 4), sendo contrária a estudos apresentando anteriormente (KIRUI *et al.*, 2012; NÓBREGA *et al.*, 2016; ROSENTERER *et al.*, 2018).

Uma concentração mais baixa de Cot, Not e uma relação C: N reduzida (Tabela 2) em S1 do que em S2 resultaram em menor fluxo de CO<sub>2</sub> e consumo de CH<sub>4</sub> atmosférico (Tabela 1). Da mesma maneira, o fluxo de CH<sub>4</sub> aumentou na baixa topografia (S1) da estação seca para chuvosa (Tabela 1). Assim, a redução da matéria orgânica do solo influenciou negativamente o fluxo de CO<sub>2</sub> e o aumento da umidade do solo influencia positivamente o fluxo de CH<sub>4</sub>. Fatores ambientais que influenciam as emissões em diferentes escalas de tempo também podem afetar os parâmetros físicos e químicos do solo em escalas espaciais, onde condições específicas do local, como topografia, degradação do solo, declividade e composição de espécies, podem determinar o impacto nos ciclos sazonais e diários da temperatura do ar e da água (ALLEN *et al.*, 2007). Os resultados aqui apresentados mostram que as temperaturas do solo e do ar pouco variaram nas medições diárias e sazonais. Assim, não podemos afirmar que esses fatores foram importantes para o fluxo de gás em solos de mangue da Amazônia.

De acordo com outros autores, as emissões de CH<sub>4</sub> dos manguezais classificados como 'sem impacto' variam de comparativamente baixo (140 µg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) a muito alto (13 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), (ALLEN *et al.*, 2007; CHEN; TAM; YE, 2010; DUTTA *et al.*, 2013; KREUZWIESER, BUCHHOLZ; RENNENBERG, 2003; LEKPHET; NITISORAVUT; ADSAVAKULCHAI, 2005; LIVESLEY; ANDRUSIAK, 2012; NÓBREGA *et al.*, 2016).

Os resultados apresentados nesta área de mangue sem impacto (S1) mostraram um fluxo médio alto, variando de 4,3 a 14,6 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Tabela 1) na estação seca e chuvosa, respectivamente. Alguns autores relataram FCO<sub>2</sub> negativo no solo de mangue (LEOPOLD *et al.*, 2015; WANG, H. *et al.*, 2016), o que não foi o caso na floresta tropical de mangue.

Além disso, as medições dos fluxos de maré baixa não foram estritamente representativas dos fluxos gerais, nos quais raízes e tocas de caranguejo foram excluídos para evitar superestimação. No entanto, alguns estudos relataram altos valores de CH<sub>4</sub> em solos de mangue (WANG, H. *et al.*, 2016), e os fluxos de CH<sub>4</sub> apresentados neste estudo são consideravelmente mais altos do que os encontrados em solos tropicais de mangue.

Este estudo destaca a necessidade de adotar um protocolo de amostragem mais intensivo em escala local que identifique magnitude da variação sazonal e espacial de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> antes que os valores sejam superestimados nos inventários anuais.

Os resultados obtidos mostram que existe uma variação nos fluxos de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> entre os tempos de amostragem, no entanto não foram estatisticamente significativas. Encontrase a necessidade de escolher um período para amostragem dos gases de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> abrigoando um ciclo das marés de 24 horas.

## 2.4 Conclusão

Este estudo demonstrou que:

- O movimento das marés não influenciou o fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> no solo nas duas topografias e nas duas estações. Portanto, é possível comparar o influxo dos dois gases estudados quando amostrados em diferentes momentos do dia.

- A topografia é uma variação ambiental importante para o fluxo de gás nos manguezais. O CH<sub>4</sub> atmosférico foi consumido e a produção de CO<sub>2</sub> foi menor durante o período seco nas altas topografias. Assim, o fluxo dos dois gases nas duas topografias deve ser analisado para tornar o estudo mais preciso.

- C e N orgânicos totais foram fundamentais para o fluxo de CO<sub>2</sub>, mas não influenciaram o fluxo de CH<sub>4</sub>.

- Um maior fluxo de CO<sub>2</sub> foi registrado no período seco e o CH<sub>4</sub> não mostrou diferenças significativas entre as duas estações.

- Não foi encontrada correlação entre os fatores microclimáticos e o fluxo de gás nas duas estações.

### **Agradecimentos**

Ao Programa de alianças para Educação e a Capacitação da Organização dos Estados Americanos e o Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (PAEC-OEA-GCUB). À Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (UFPA-PPGCA). Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) pela oportunidade de viabilizar este trabalho. Ao técnico em laboratório Paulo Sarmiento, ao motorista Lucivaldo da Silva e a MSc. Maridalva Ribeiro pela colaboração nos trabalhos de campo.

### **Referências**

ABICHOU, T. *et al.* Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. **Waste Management**, v. 26, n. 11, p. 1305–1312, 2006.

ALLEN, D. *et al.* Seasonal variation in nitrous oxide and methane emissions from subtropical estuary and coastal mangrove sediments, Australia. **Plant biology (Stuttgart, Germany)**, v. 13, n. 1, p. 126–33, jan. 2011.

ALLEN, D. E. *et al.* Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 622–631, 2007.

BARNES, J. *et al.* Tidal dynamics and rainfall control N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a pristine mangrove creek. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 15, p. 4–9, 2006.

BORGES, A. V.; ABRIL, G. Carbon Dioxide and Methane Dynamics in Estuaries. **Treatise on Estuarine and Coastal Science**, v. 5, n. 1980, p. 119–161, 2011.

BOUILLON, S. *et al.* Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 22, n. 2, p. 1–12, 2008.

BRASIL. Marinha do Brasil. Centro de Hidrografia da Marinha. **Tábuas de maré**. Disponível em : <https://www.marinha.mil.br> 2018. Acesso em: 10 de maio 2018a

BREITHAUPT, J. L. *et al.* Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, n. 3, p. 1–11, 2012.

BROOKES, P. C. *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 17, n. 6, p. 837–842, 1985.

BULMER, R. H.; LUNDQUIST, C. J.; SCHWENDENMANN, L. Sediment properties and CO<sub>2</sub> efflux from intact and cleared temperate mangrove forests. **Biogeosciences**, v. 12, n. 20, p. 6169–6180, 2015.

CALL, M. *et al.* Spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane fluxes over semi-diurnal and spring-neap-spring timescales in a mangrove creek. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 150, p. 211–225, 2015.

CALL, M. *et al.* High pore-water derived CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from a macro-tidal mangrove creek in the Amazon region. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 247, p. 106–120, 2019.

CARVALHO, E. A. DE; JARDIM, M. A. G. Composição e estrutura florística em bosques de manguezais Paraenses, Brasil. **Ciência Floresta**, v. 27, n. 3, p. 923–930, 31 ago. 2017.

CHANDA, A. *et al.* Measuring daytime CO<sub>2</sub> fluxes from the inter-tidal mangrove soils of Indian Sundarbans. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, n. 2, p. 417–427, 2014.

CHAUHAN, R. *et al.* Factors influencing spatio-temporal variation of methane and nitrous oxide emission from a tropical mangrove of eastern coast of India. **Atmospheric Environment**, v. 107, p. 95–106, 2015.

CHEN-TUNG, A. C.; BORGES, ALBERTO V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO<sub>2</sub>. **Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 56, n. 8–10, p. 578–590, 2009.

CHEN, G. C.; TAM, N. F. Y.; YE, Y. Summer fluxes of atmospheric greenhouse gases N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from mangrove soil in South China. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 13, p. 2761–2767, 2010.

CHEN, G. C.; TAM, N. F. Y.; YE, Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 48, p. 175–181, 2012.

DAI, M. *et al.* Spatial distribution of riverine DOC inputs to the ocean: An updated global synthesis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 4, n. 2, p. 170–178, 2012.

DALAL, R. C. *et al.* Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes. **Plant and Soil**, v. 309, n. 1–2, p. 43–76, 2008.

DAVIDSON, E. A. *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazônia. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 53–69, 2000.

DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E. Gas diffusivity and production of CO<sub>2</sub> in deep soils of the eastern Amazon. **Tellus B**, v. 47, n. 5, p. 550–565, 1995.

DITTMAR, T.; LARA, R. J. Molecular evidence for lignin degradation in sulfate-reducing mangrove sediments (Amazônia, Brazil). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 65, n. 9, p. 1417–1428, 2001.

DONATO, D. C. *et al.* Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature Geoscience**, v. 4, n. 5, p. 293–297, 2011.

DUTTA, M. K. *et al.* Dynamics and exchange fluxes of methane in the estuarine mangrove environment of the Sundarbans, NE coast of India. **Atmospheric Environment**, v. 77, p. 631–639, 2013.

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY - NOAA. **PRCP\_CU\_GAUGE\_V1201**. Disponível em: <https://esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em: 10 de abril. 2018a.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de análises de solo**. 3 ed. Brasília, DF: 2017. 574p.

FRANKIGNOULLE, M. Field measurements of air- sea CO<sub>2</sub> exchange. **Limnology and Oceanography**, v. 33, n. 3, p. 313–322, 1988.

FRIESEN, S. D.; DUNN, C.; FREEMAN, C. Decomposition as a regulator of carbon accretion in mangroves: a review. **Ecological Engineering**, v. 114, p. 173–178, 2018.

GIRI, C. *et al.* Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 154–159, 2011.

HAWKINS, J. E.; FREEMAN, C. Rising sea levels-potential effects upon terrestrial greenhouse gas production. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 26, n. 3, p. 325–329, 1994.

HAYES, D. J. *et al.* Soil greenhouse gas emissions reduce the contribution of mangrove plants to the atmospheric cooling effect. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 12, p. 124019, 2016.

INUBUSHI, K. *et al.* Factors influencing methane emission from peat soils: Comparison of tropical and temperate wetlands. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 71, n. 1, p. 93–99, 2005.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998.

JACOTOT, A.; MARCHAND, C.; ALLENBACH, M. Tidal variability of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the water column within a *Rhizophora* mangrove forest (New Caledonia). **Science of the Total Environment**, v. 631–632, p. 334–340, 2018.

KALEMBAS, S. J.; JENKINSON, D. A comparative study of titrimetric and gravimetric methods for the determination of organic carbon in soil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 24, n. 9, p. 1085–1090, 1973

KAUFFMAN, J. B.; DONATO, D. C.; ADAME, M. F. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. v. 117, p. 117, 2013.

KETTUNEN, A. *et al.* Methane production and oxidation potentials in relation to water table fluctuations in two boreal mires. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, n. 12, p. 1741–1749, out. 1999.

KIRUI, B. Y. K. *et al.* Effects of species richness, identity and environmental variables on growth in planted mangroves in Kenya. **Marine Ecology Progress Series**, v. 465, n. January, p. 1–10, 2012

KREUZWIESER, J.; BUCHHOLZ, J.; RENNENBERG, H. Emission of Methane and Nitrous Oxide by Australian Mangrove Ecosystems. **Plant Biology**, v. 5, n. 4, p. 423–431, 2003.

LARUELLE, G. G. *et al.* Evaluation of sinks and sources of CO<sub>2</sub> in the global coastal ocean using a spatially-explicit typology of estuaries and continental shelves. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 15, p. 1–6, 2010.

LEKPHET, S.; NITISORAVUT, S.; ADSAVAKULCHAI, S. Estimating methane emissions form mangrove area in Ranong Province, Thailand. **Science Technology**, v. 27, n. 1, p. 153–163, 2005.

LEOPOLD, A. *et al.* Influence of mangrove zonation on CO<sub>2</sub> fluxes at the sediment-air interface (New Caledonia). **Geoderma**, v. 202–203, p. 62–70, 2013.

LEOPOLD, A. *et al.* Temporal variability of CO<sub>2</sub> fluxes at the sediment-air interface in mangroves (New Caledonia). **Science of the Total Environment**, v. 502, p. 617–626, 2015.

LIVESLEY, S. J.; ANDRUSIAK, S. M. Temperate mangrove and salt marsh sediments are a small methane and nitrous oxide source but important carbon store. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 97, p. 19–27, 2012.

LYIMO, T. J. *et al.* Diversity of methanogenic archaea in a mangrove sediment and isolation of a new Methanococcoides strain: Research Letter. **Microbiology Letters**, v. 291, n. 2, p. 247–253, 2009.

MAHER, D. T. *et al.* Methane and carbon dioxide dynamics in a subtropical estuary over a diel cycle: Insights from automated in situ radioactive and stable isotope measurements. **Marine Chemistry**, v. 168, p. 69–79, 2015.

MARTORANO, L. G.; PEREIRA, L. C. Estudos Climáticos do Estado do Pará: Classificação Climática (KÖPPEL) e deficiência Hídrica (Thornhtwhite, Mather). **BOL. DE GEOG. TEOR.**, v. 23, n. September 2017, p. 306–312, 1993.

MATTEUCCI, S. D.; COLMA, A. **Metodología para el estudio de la vegetación.** Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda”, Venezuela., 2002.

MCEWING, K. R.; FISHER, J. P.; ZONA, D. Environmental and vegetation controls on the spatial variability of CH<sub>4</sub> emission from wet-sedge and tussock tundra ecosystems in the Arctic. **Plant and Soil**, v. 388, n. 1–2, p. 37–52, 2015.

MIDDELBURG, J. J. *et al.* Methane distribution in European tidal estuaries. **Biogeochemistry**, v. 59, p. 95–119, 2002.

NÓBREGA, G. N. *et al.* Edaphic factors controlling summer (rainy season) greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) from semiarid mangrove soils (NE-Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 685–693, 2016

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 439–473, 2007.

REGNIER, P. *et al.* Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. **Nature Geoscience**, v. 6, n. 8, p. 597–607, 2013.

RISK, D.; KELLMAN, L.; BELTRAMI, H. A new method for in situ soil gas diffusivity measurement and applications in the monitoring of subsurface CO<sub>2</sub> production. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 113, n. 2, p. 1–9, 2008.

ROSENTRETER, J. A. *et al.* Factors controlling seasonal CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions in three tropical mangrove-dominated estuaries in Australia. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 215, p. 69–82, 2018.

ROYCHOWGHURY, T. *et al.* Temporal dynamics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> loss potentials in response to rapid hydrological shifts in tidal freshwater wetland soils. **Ecological Engineering**, v. 114, p. 104–114, 2018.

SILVA, S. B. E. **Análise de solo para ciências agrárias**. 2. ed. Belém-Pará, 2018. 174p

SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 427–435, dez. 2005.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and <sup>14</sup>C labelled cells. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 3, p. 337–343, 1988.

STOCKER, T.F., D. *et al.* **Climate change 2013: the physical science basis**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge; United Kingdom; New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013. v. 1, 1535p.

STRAGMANN, A.; BASHAN, Y.; GIANI, L. Methane in pristine and impaired mangrove soils and its possible effect on establishment of mangrove seedlings. **Biol Fertil Soil**, v. 44, n. July 2007, p. 511–519, 2008.

SUNDQVIST, E. *et al.* Short-term effects of thinning, clear-cutting and stump harvesting on methane exchange in a boreal forest. **Biogeosciences**, v. 11, n. 21, p. 6095–6105, 12 nov. 2014.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais. Departamento de Solos.** Universidade Federal do rio Grande do Sur, 1995. 174 p.

UPSTILL-GODDARD, R. C. *et al.* Methane in the southern North Sea: Low-salinity inputs, estuarine removal, and atmospheric flux. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 4, p. 1205–1217, 2000.

VANCE, E.; BROOKES, P.; JENKINSON, D. An extraction method for measuring soil microbial biomass c. **Soil Biol. Biochem.**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

VERCHOT, L. V *et al.* Land-use change and biogeochemical controls of methane fluxes in soils of eastern Amazônia. **Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 41–56, 2000.

WANG, H. *et al.* Temporal and spatial variations of greenhouse gas fluxes from a tidal mangrove wetland in Southeast China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 2, p. 1873–1885, jan. 2016

WANG, J. *et al.* Amazon boundary layer aerosol concentration sustained by vertical transport during rainfall. **Nature**, v. 539, n. 7629, p. 416–419, 2016.

WHALEN, S. C. Natural Wetlands and the Atmosphere. **Environmental Engineering Science**, v. 22, n. 1, p. 73–94, 2005.



### CAPITULO 3 FLUXOS TEMPORAIS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> NA INTERFACE ÁGUA ATMOSFERA NO ESTUÁRIO MOJUIM EM SÃO CAETANO DE ODIVELAS-PA.

#### Resumo

Foi realizado um estudo espacial e sazonal para medir as variações dos fluxos de Metano (FCH<sub>4</sub>) e Dióxido de Carbono (FCO<sub>2</sub>), na maré vazante e enchente, na interface água-atmosfera durante o período seco (novembro 2017) e chuvoso (março de 2018). Foram escolhidos dois pontos de amostragem, um Canal de maré (C1), e outro no Rio Mojuim (R1). Os resultados espaciais dos FCH<sub>4</sub> durante o período seco foram de 0,033 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (R1), e 0,032 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (C1) sem diferença espacial. Os FCO<sub>2</sub> variaram entre 5,160 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (R1) e 6,255 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (C1) sem diferença significativa. Quanto à sazonalidade, durante o período seco o FCH<sub>4</sub> médio em (R1) foi de 0,033 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e no período chuvoso de 0,043 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, e FCO<sub>2</sub> foi de 5,160 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e 13,280 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> com diferença sazonal significativa O FCO<sub>2</sub>. Com base em seus potenciais de aquecimento global, Os FCH<sub>4</sub>, expressados como emissões de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>-eq), mostraram que o FCH<sub>4</sub> espacialmente em Rio Mojuim (R1) representou um 25,56% e ao Canal de Maré um 24,79% das emissões de (CO<sub>2</sub>-eq) que equivalem a 12,91 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. A sazonalidade predominou na época chuvosa com 14,23% e na seca 5,92%, equivalente a 20,15 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>-eq das emissões totais de 46,18 Gg CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. As marés vazantes e enchente não tiveram influência na produção dos fluxos durante os diferentes horários do dia de na época seca, contrário à sazonalidade do CO<sub>2</sub>. As contribuições espacial e sazonal indicaram que, o estuário se comportou como fonte de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na interface água-atmosfera. Dada a variabilidade nos fluxos registrados, estudos futuros deste ecossistema estuarino devem considerar-se mais intensivos, que identifiquem uma maior magnitude na dinâmica das variações dos FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub>, para avaliar o papel do ecossistema estuarino no equilíbrio dos gases do efeito estufa (GEE), e da influência de fatores físico-químicos da água e opções possíveis de mitigação durante as maiores emissões no período chuvoso.

Palavras-chave: Metano. Dióxido de carbono. Estuário. Solo. Atmosfera. Amazônia.

## Abstract

A spatial and seasonal study was performed to measure the variations in methane (CH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) fluxes, at ebb and flood, at the water-atmosphere interface during the dry (November 2017) and rainy (March 2018). Two sampling points were chosen, one Tidal Channel (C1) and one on the Mojuim River (R1). The spatial results of FCH<sub>4</sub> during the dry period were 0.033 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (R1), and 0.032 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (C1) with significant spatial difference ( $p > 0.05$ ). The FCO<sub>2</sub> ranged from 5.160 ± 0.604 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (R1) to 6.255 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (C1) with not statistically significant difference ( $p > 0.005$ ). As for seasonality, during the dry season the average FCH<sub>4</sub> in (R1) was 0.033 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and in the rainy season 0.043 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, and for FCO<sub>2</sub> it was 5.160 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and 13.280 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> with significant seasonal difference for CO<sub>2</sub> ( $p < 0.05$ ). Based on their global warming potentials, as FCH<sub>4</sub> expressed as equivalent emissions (CO<sub>2</sub>-eq), showed that CH<sub>4</sub> spatially in Rio Mojuim (R1) represented a 25.56% and the Tidal Channel a 24.79% of the emissions of (CO<sub>2</sub>-eq) equivalent to 12.91g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Seasonality predominated in the rainy season with 14.23% and in drought 5.92%, equivalent to 20.15 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>-eq of total emissions of 46.18 Gg CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The ebb and flow of tides have no influence on the flow production during the different times of the day during the dry season, contrary to the seasonality of CO<sub>2</sub>. The spatial and seasonal contributions indicated that the estuary behaved as potential source CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> at the water-atmosphere interface. Given the variability in recorded flows, future studies of this estuarine ecosystem should be considered more intensive, identifying a greater magnitude in the dynamics of FCH<sub>4</sub> and FCO<sub>2</sub> variations, to assess the role of the estuarine ecosystem in greenhouse gas (GHG) equilibrium, and of the influence of water physicochemical factors and possible mitigation options during the highest emissions in the rainy season.

Keywords. Methane. Carbon dioxide. Estuary. Soil. Atmosphere. Amazon.

### 3.1 Introdução

A intensificação do aquecimento global é um dos temas atuais mais discutidos. A concentração de CH<sub>4</sub>, variou desde a era industrial de 1,750 a 1,819 ppb e CO<sub>2</sub> de 277 a 400 ppm. (NOAA, 2018a; QUÉRÉ *et al.*, 2015). O potencial de aquecimento global de CH<sub>4</sub> é 23 vezes maior que o de CO<sub>2</sub> para um período de 100 anos (SHINDELL *et al.*, 2009; STOCKER *et al.*, 2013). O CH<sub>4</sub> tem origem em fontes antropogênicas, numa escala de 263-428 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup> (WUEBBLES; HAYHOE, 2002), e naturais variando entre 150-237 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup> (IPCC, 2001).

Os fluxos globais de CO<sub>2</sub> emitidos pelos rios excedem de 1Pg C ano<sup>-1</sup> (RICHEY *et al.*, 2002). As estimativas globais do carbono (C) presentes nos rios são: 50% são transportados aos oceanos, 25% são oxidados nos canais e 25% armazenados como sedimentos, sendo as principais fontes para a atmosfera as partículas dissolvidas em suspensão (HOPE; BILLET; CRESSER, 1994). Ainda existem incertezas na contribuição destes gases aos fluxos globais (KHALIL; RASMUSSEN; SHEARER, 2002; WUEBBLES; HAYHOE; KATHARINE, 2002).

Os estuários desempenham um papel essencial na ciclagem do carbono originário nos continentes (DOWNING; DUARTE, 2009), principalmente o CO<sub>2</sub> (RAYMOND *et al.*, 2013) e CH<sub>4</sub> (SAWAKUCHI *et al.*, 2014). Através dos processos biológicos e físicos os estuários são fontes de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (BORGES; ABRIL, 2011; GATTUSO; FRANKIGNOULLE; WOLLAS, 1998; HOPE; BILLET; CRESSER, 1994), (BORGES, 2005; LARUELLE *et al.*, 2010). Segundo WEI-JUN (2011) as emissões de CO<sub>2</sub> dos estuários têm alta magnitude para compensar a absorção de dióxido de carbono nas plataformas continentais.

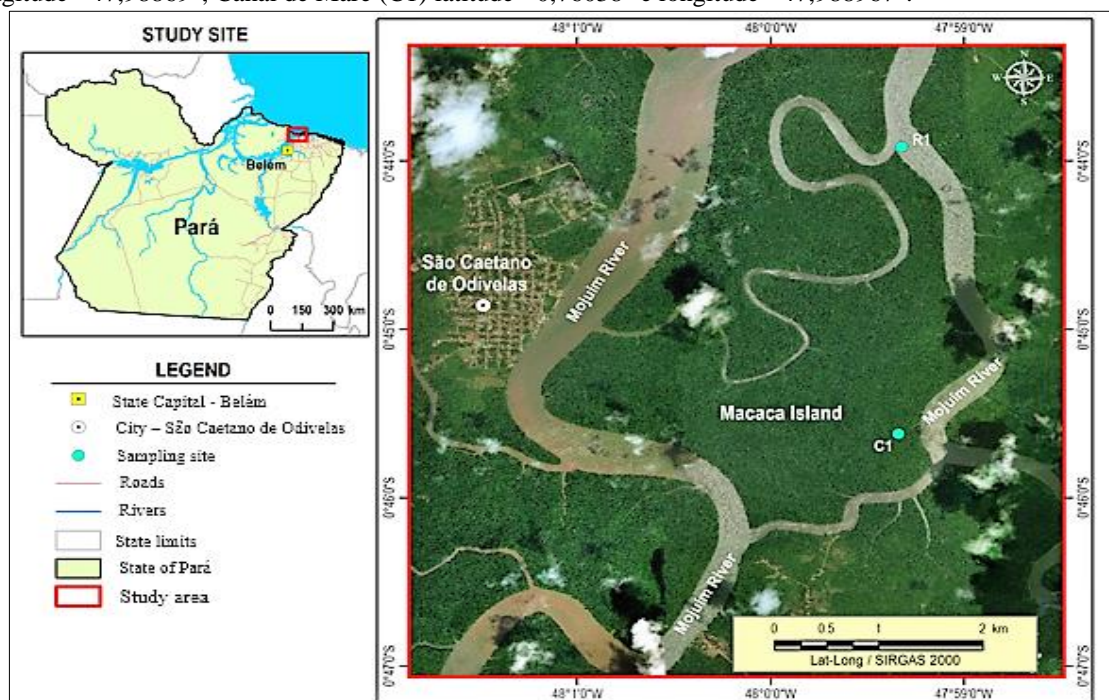
A presente pesquisa teve como objetivo quantificar os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> espacial e sazonalmente em relação à maré, na interface água-atmosfera em estuário amazônico durante o período seco e chuvoso.

### 3.2 Material e métodos

#### 3.2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no estuário Mojuim (Figura 1), dentro da Reserva Extrativista Marinha Mocapajuba (21.029,00 ha), criada em 2014, no município de São Caetano de Odivelas (PA). Este estuário faz parte da maior faixa de manguezal contínua do planeta com 7.591 km<sup>2</sup>, sendo deste total 2.177 km<sup>2</sup> estão no estado do Pará, representando 16% do ecossistema de mangue brasileiro (SOUZA FILHO, 2005). (Figura 1). À área apresenta um clima tropical úmido típico equatorial amazônico, do tipo *Am* segundo a classificação de Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). A região apresenta dois períodos sazonais: época chuvosa (janeiro a junho) e época seca (julho a dezembro). Adjacentes da zona estudada predominam à espécie de mangue vermelho *Rhizophora mangle* L. O estuário Mojuim e da Bacia do rio Mocapajuba, com influência do ciclo de marés semidiurno enchentes e vazantes com variações de 3,0 a 4,5 m (BRASIL, 2018b).

Figura 1- Mapa dos locais de amostragem dos fluxos, Estuário Mojuim (R1), latitude - 0,731971° e longitude - 47,98869°, Canal de Maré (C1) latitude - 0,76038° e longitude - 47,988967°.



Fonte: Autor.

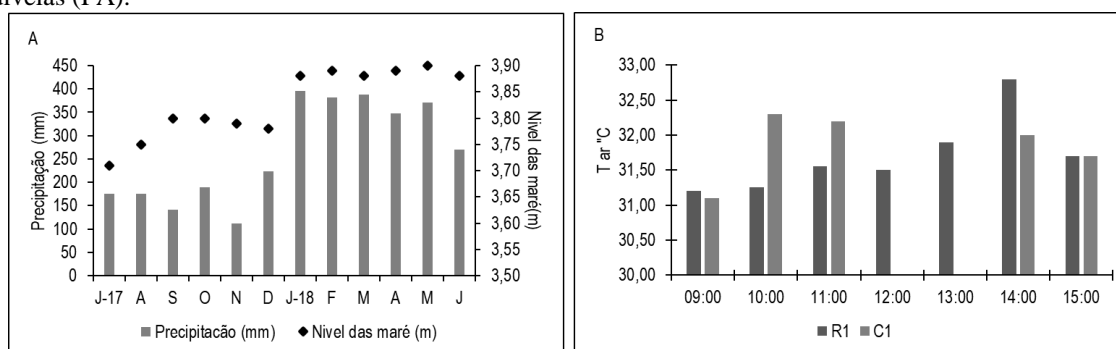
### 3.2.2 Dados climatológicos

Os dados climatológicos da série histórica (1981-2018), foram obtidos na Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automatizada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Soure (00°43'40,18" S, 48°30'56,86" W), a uma distância de 71,5 km noroeste da área de estudo.

Durante o período de estudo, de julho a dezembro 2017 (estação seco) e janeiro a junho 2018 (estação chuvoso), a região apresentou uma precipitação anual acumulada de 3,171.5 mm (Figura 2A), sendo estas comparadas das médias históricas de 2.732 mm dos anos (1981 a 2018) não mostraram diferenças significativas (Test-t;  $p > 0,05$ ) (Figura 2B).

A primeira campanha de amostragem dos fluxos dos gases de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> foram realizadas no período seco com 1,016.5 mm de precipitação, sendo que no dia da campanha no dia (14/11/2017) registro 0,00 mm. a segunda campanha foi no período chuvoso com, 2155,0 mm de precipitação, sendo que no dia 29/3/2018 foi registrada 45,8 mm (NOAA, 2018b). As marés mais baixas do período seco foi de 3,71 m, e mais altas de 3,90 m para o período chuvoso com diferença de 0,19 m (Figura 2) (BRASIL, 2018b).

Figura 2- Precipitação média (mm) altura das marés (m) (2A). Temperatura do ar (Tar; °C) em R1 (estuário Mojuim) e C1(Canal de maré), (2B) Tar dos anos 2017-2018 da área de estudo em São Caetano de Odivelas (PA).



Fonte: Autor.

### 3.2.3 Procedimentos amostrais e analíticos

Para a coleta de gases na interface água-atmosfera foi utilizada a técnica da câmara dinâmica flutuante (RASERA, *et al.*, 2013; JACOTOT; MARCHAND; ALLENBACH, 2018; YI LU *et al.*, 1999). As amostragens foram realizadas no período seco (14 de novembro de 2017) e no período chuvoso (29 de março de 2018).

Os fluxos foram registrados a cada trinta minutos em um período de sete horas dando início às (09h00min) em maré vazante 13h13min, admitindo-se este como ponto de inflexão da maré do período seco e ao concluir as medições a maré estava enchendo 15h00min na maré de quadratura. A coleta foi realizada ao longo do ciclo de maré vazante. Somente para R1 foi repetido a medição dos fluxos nos períodos climáticos.

Para a determinação dos gases foi utilizado um sistema automatizado (*ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer, Los Gatos Research, modelo 915-0011-1000*), O equipamento foi previamente calibrado com gás padrões a 0,94 e 3,15 ppm para o CH<sub>4</sub>, e 0,395 e 1.510 ppm CO<sub>2</sub>. O registro das concentrações dos fluxos foi a cada 2 segundos em tempo real. A câmara utilizada neste estudo foi de plástico sintético com um diâmetro de 32 cm, e largura de 12 cm, foram mensurados a temperatura do ar (°C), por médio de um termo-higroanemômetro portátil (modelo *AK821*) a uma altura de 2,00 m acima da coluna da água. Na água foram determinados *in situ* os parâmetros físico-químicos, temperatura da água (Tag, °C), potencial de hidrogênio (pH), potencial de óxido redução (ORP, mV), oxigênio dissolvido (OD, mgL<sup>-1</sup>), condutividade elétrica (CE, µcm s<sup>-1</sup>), turbidez (Tur, NTU) e salinidade (Sal, PPT ) com uma sonda multiparametrica Horiba (modelo-5000G).

#### 3.2.4 Cálculo dos fluxos

As concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> entre a superfície água-atmosfera, foram ajustados a uma relação linear de concentração de CH<sub>4</sub> ou CO<sub>2</sub> (dc) e o tempo decorrido (dt). O fluxo foi determinado em gramas por metro quadrado por dia, (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) (Equação 1).

$$F = PVM\mu \left( \frac{dc/dt}{ATR} \right) \quad \text{Equação 1.}$$

Onde:  $F$  = fluxo em g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,  $P$  = pressão atmosférica (atm),  $V$  = volume da câmara em litros (9,65 l),  $M$  = massa molecular do CH<sub>4</sub> (16 g mol<sup>-1</sup>) o CO<sub>2</sub> (44 g mol<sup>-1</sup>),  $\mu$  =fator de conversão das unidades (0,0864 L s / µL<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>),  $A$  = área coberta pela câmara sobre a superfície da água (0,80 m<sup>2</sup>),  $T$  = temperatura da câmara em kelvin (K),  $R$  = constante do gás (0,08205 L atm / K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>), dc/dt, se cálculo por regressão linear ( $\gamma = \beta_0 + \beta_1 \times$ ) (ABICHOU *et al.*, 2006; FRANKIGNOULLE, 1988; MCEWING; FISHER; ZONA, 2015). Só os pontos que representam a aumento lineal  $R^2 \geq 0,3$  foram considerados como fluxo,  $R^2 < 0,3$  se considerarem como zero (SUNDQVIST *et al.*, 2014).

#### 3.2.5 Conversões de carbono equivalente

Os FCH<sub>4</sub> foram convertidos a emissões de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>-eq), considerando seu potencial de aquecimento global 23 vezes maior em relação a CO<sub>2</sub> para um período de 100 anos (STOCKER, *et al.*, 2013), usando a seguinte equação (2):

$$CO_{2.eq} = FCO_2 + (FCH_4 * 23) \quad \text{Equação 2.}$$

Onde  $F$  e fluxos de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , e 23, e o potencial de aquecimento global do  $\text{CH}_4$ .

### 3.2.6 Análises estatísticas

Foi determinada a normalidade dos dados dos  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  e as variáveis físico-químicas da água pelo método de ajuste de Shapiro-Wilks, os testes t de Student para diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) dos fluxos entre as diferentes horas de amostragem e entre os períodos sazonais, quando as distribuições forem normais. Foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis para dados não normais. As análises estatísticas foram calculadas com o *software* estatístico BioEstat 5.0. Para a avaliação das relações entre os  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  com os fatores ambientais, físico-químicos, período sazonal e zonas foram utilizadas a análise de componentes principais (ACP) com o *software* estatístico InfoStat®.

### 3.3 Resultados e discussões

As águas da região apresentaram pH básico, para R1 e C1 (Tabela 1). O pH está dentro dos valores médios registrados em outros estuários da costa norte de Brasil, com variação entre 6,6 e 8,2 (NORIEGA; ARAUJO, 2014). O pH não mostrou influência significativa nos fluxos, já que segundo HIROTA *et al.*, (2007) é uma variável que não apresenta significância com a produção de (GEE) por mudar numa escala de curto tempo (diurna) pela influência dos fatores bióticos e ambientais. A temperatura da água apresentou significância estatística sazonal ( $p < 0,05$ ) em R1 de  $29,79 \pm 0,19$  °C no período seco e  $29,29 \pm 0,08$  °C do período chuvoso (Tabela 1 e Figura 4A). A temperatura influencia nas variações temporais  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  (DALVA; MOORE, 1993; MIDDELBURG *et al.*, 1996).

Tabela 1- Variação espacial dos parâmetros físico-químicos da água do Estuário Mojuim (R1), Canal de Maré (C1), sendo temperatura do ar (Tar), temperatura da água (Tag), potencial de hidrogênio (pH), potencial de oxirredução (ORP), oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), turbidez e salinidade. Período seco e chuvoso, para características físicas e químicas da água (Media  $\pm$  Erro padrão, R1 n =13 e C1 n = 8). Letras minúsculas expressam a variação local, e as maiúsculas à variação sazonal, letras iguais não diferem significativamente entre as médias, usando Teste Kruskal-Wallis não paramétrico, com nível de significância de ( $p < 0,05$ ).

Época/Sítio	Tar (°C)	Tag (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg L <sup>-1</sup> )	CE ( $\mu\text{cm s}^{-1}$ )	Turbidez (NTU)	Salinidade (PPT)
<b>Seca</b>								
R1	31,70 $\pm$ 0,73 <sup>aA</sup>	29,79 $\pm$ 0,30 <sup>aA</sup>	8,00 $\pm$ 0,04 <sup>aA</sup>	157,92 $\pm$ 11,24 <sup>aB</sup>	1,55 $\pm$ 0,63 <sup>bB</sup>	42,88 $\pm$ 5,17 <sup>aA</sup>	80,64 $\pm$ 15,67 <sup>aA</sup>	2,65 $\pm$ 0,54 <sup>aA</sup>
C1	31,86 $\pm$ 0,73 <sup>a</sup>	30,18 $\pm$ 1,11 <sup>a</sup>	7,91 $\pm$ 0,72 <sup>a</sup>	156,13 $\pm$ 43,92 <sup>a</sup>	5,31 $\pm$ 1,83 <sup>aA</sup>	23,45 $\pm$ 11,90 <sup>b</sup>	38,95 $\pm$ 26,79 <sup>b</sup>	1,97 $\pm$ 0,50 <sup>b</sup>
<b>Chuvoso</b>								
R1	31,92 $\pm$ 0,70 <sup>aA</sup>	29,29 $\pm$ 0,29 <sup>B</sup>	8,39 $\pm$ 0,62 <sup>A</sup>	204,23 $\pm$ 40,91 <sup>A</sup>	7,76 $\pm$ 1,32 <sup>A</sup>	12,83 $\pm$ 1,24 <sup>B</sup>	174,68 $\pm$ 35,67 <sup>B</sup>	0,74 $\pm$ 0,08 <sup>B</sup>

Fonte: Autor.



Para o ORP foi evidenciado na sazonalidade. Valores menores na época seca,  $157,92 \pm 7,80$  mV (médias  $\pm$  erro padrão), comparado ao chuvoso de  $196,53 \pm 13,95$  mV ( $p < 0,05$ ). O ORP atuando como um agente oxidante, com a temperatura entre 30 e 40°C (Tabela 1), influência nos FCH<sub>4</sub> (JEAN; PIERRE; ROGER, 2010).

O OD apresentou diferença espacial estatisticamente significativa em R1 ( $P < 0,05$ ), com média de  $1,55 \pm 0,34$  mg L<sup>-1</sup>, no Cm a média foi de  $5,30 \pm 0,43$  mg L<sup>-1</sup> (Tabela 1), e no período sazonal foi de  $9,64 \pm 0,93$  mg L<sup>-1</sup>, com diferença estatística significativa ( $P < 0,05$ ) (Tabela 1), Segundo Ibarra *et al.*, (2007) é comum encontrar valores altos de OD durante o dia devido à produção de oxigênio pelo fitoplâncton, uma vez que as águas salobras são empobrecidas no mesmo.

Neste estudo encontraram-se as maiores concentrações de salinidade no período seco em R1 com  $2,65 \pm 0,14$  PPT, e de  $1,97 \pm 0,18$  PPT no período chuvoso, com diferença estatística significativa na sazonalidade de  $0,74 \pm 0,11$  PPT ( $p < 0,05$ ) (Tabela 1). Segundo Purvaja e Ramesh (2001), a salinidade é uma variável dependente da precipitação, vazão do rio e aporte marinho que também é um fator chave das variações na dinâmica do CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> pela presença dos íons negativos como carbonatos e bicarbonatos, neste caso pela entrada da água doce do rio Mojuim.

A CE mostrou relação direta com a salinidade, onde R1 apresentou valores médios de  $42,88 \pm 2,30$   $\mu\text{cm s}^{-1}$ , e C1 com  $23,45 \pm 4,20$   $\mu\text{cm s}^{-1}$  com diferença estatística significativa entre os pontos R1 e C1 e a sazonalidade apenas em R1 com  $12,83 \pm 0,34$   $\mu\text{cm s}^{-1}$  e ( $p < 0,05$ ), (Tabela 1). Segundo Castro, Fraile e Vargas (1996) os maiores valores de CE se registraram nas épocas de menores chuvas, neste caso as menores concentrações iônicas do período seco. A turbidez foi para R1 de  $113,14 \pm 17,46$  NTU na estação chuvosa, e na seca de  $26,56 \pm 06,65$  NTU (Tabela 1). A maior turbidez na estação chuvosa pode ser causada pela presença de matérias sólidas em suspensão (silte, argila, coloides, matéria orgânica), os quais são transportados pelas altas descargas do rio Mojuim para o estuário, produto das atividades agropecuárias e a respiração anaeróbica da decomposição da matéria orgânica.

### 3.3.1 Fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no período seco em relação as marés

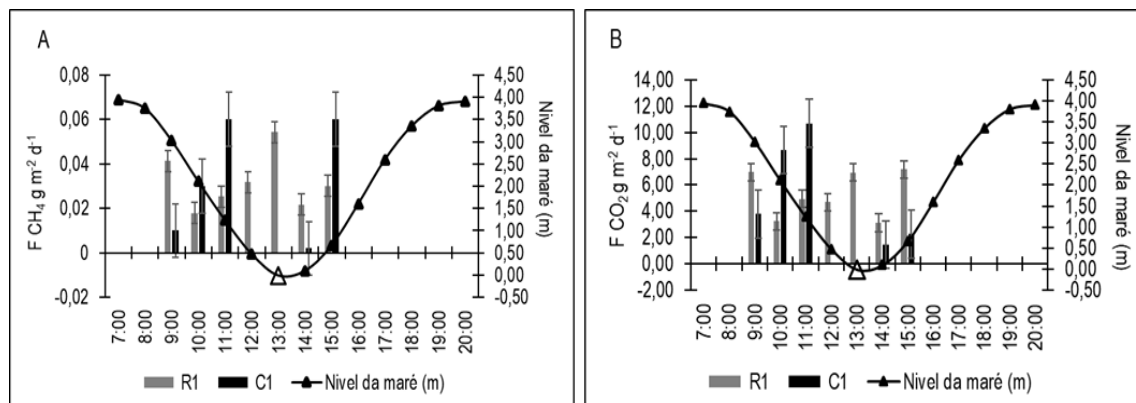
Quando se compararam os FCH<sub>4</sub> (médias  $\pm$  erro padrão) em R1, se encontrou uma variabilidade entre a maré vazante de  $0,029 \pm 0,004$  g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e enchente com  $0,040 \pm 0,011$  g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, sem diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ; Tabela 1).

Para o C1, em maré vazante, foi de  $0,032 \pm 0,017 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e na enchente de  $0,032 \pm 0,030 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sendo estatisticamente igual nas duas marés com ( $p > 0,05$ ; Tabela 1). O  $\text{FCH}_4$  médio total do dia, em R1 variou em  $0,033 \pm 0,005 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e para C1 de  $0,032 \pm 0,014 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabela 1). Sendo que R1 e C1 foram iguais estatisticamente ( $p > 0,05$ ; Tabela 1).

Os  $\text{FCO}_2$  na maré vazante e em R1 foi de  $4,969 \pm 0,624 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e na enchente foi de  $5,465 \pm 1,310 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , e em C1 na maré vazante foi de  $7,717 \pm 2,892 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , e na enchente de  $1,868 \pm 0,400 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sem diferença estatística entre as marés em R1 e C1 ( $p > 0,05$ ). O  $\text{FCO}_2$  médio total, nos dois sítios analisados foi de  $5,160 \pm 0,604 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em R1, e de  $6,255 \pm 2,324 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em C1 (Tabela 1).

Quando se iniciou a amostragem dos gases de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  no período seco (09h00min) a maré estava vazando, e ao concluir estava enchendo (Figura 3). O ponto de inflexão da maré foi às 13h14min. A amostragem dos gases abrangeu as duas marés, neste sentido, R1 e C1 a maré não chegou a ter uma influência significativa nos  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  da estação seca (Tabela 1). R1 apresentou um menor  $\text{FCH}_4$ , sendo influenciado pela maior concentração de OD, para  $\text{CO}_2$  em C1 obteve um maior fluxo poderia ser influenciado pelo pH. O  $\text{FCO}_2$  foi maior nas marés enchendo em comparação as vazantes, dado pela maior concentração de  $\text{CO}_2$  na água (CALL *et al.*, 2015). A amostragem em cada hora produziu efeito no  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  diferente do que alguns autores revelaram (ALLEN *et al.*, 2007).

Figura 3 - Variação dos fluxos de metano  $\text{FCH}_4$  (3A) e os fluxos de dióxido de carbono  $\text{FCO}_2$  (3B), R1 (Estuário Mojuim) e C1 (Canal de maré) do período seco, em maré vazante e enchente, as barras apresentam as médias e erro padrão por hora, a linha contínua preta significa a nível da maré.



Fonte: Autor.

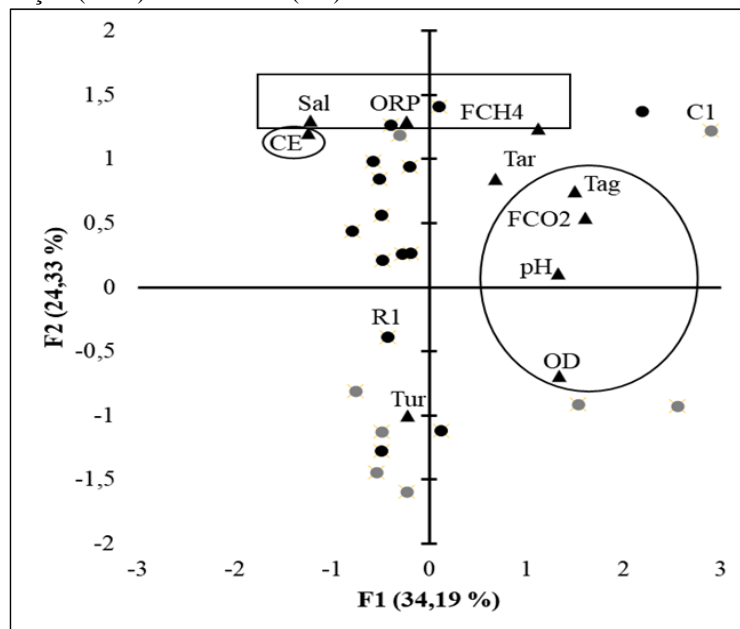
A diferença dos  $FCH_4$  e  $FCO_2$  do período seco em R1 e C1 foi influenciada pelos processos das interações químicas das variáveis da água, diferente ecossistema, entrada de água salubre em marés enchente do mar e água doce do rio Mojuim na maré vazante, cobertura da vegetação dos lados adjacentes e decomposição da mesma.

Nenhuma das zonas estudadas apresentou consumo de  $CH_4$  e  $CO_2$  atmosférico. Os  $FCH_4$  e  $FCO_2$  não variaram estatisticamente a ( $p > 0,05$ ) nos locais R1 e C1 nas horas analisadas (Tabela 1). Os resultados foram similares ao observados por Whalen (2005).

A análise de componentes principais (ACP) das variáveis ambientais e Físioquímicas da água em R1 rio Mojuim e C1 canal, auxiliou na interpretação da variabilidade conjunta total dos dados de 83,10% em quatro principais componentes, onde 58,52% são apresentadas pelas duas primeiras componentes. A primeira explicou 34,19%, segunda 24,33%, a terceira 13,93%, e a quarta 10,66%, apresentando aqui apenas duas dimensões (Figura 4), também são apresentadas as cargas fatoriais de cada variável (Tabela 2).

As variáveis da água que apresentaram a maior relação positiva na componente 1 (circunferência) foram: fluxo de  $CO_2$  ( $FCO_2$ ), potencial de hidrogênio (pH), oxigênio dissolvido (OD), enquanto que estas foram associadas negativamente com a condutividade elétrica (CE). A dimensão 2, representado pelo retângulo: fluxo de metano  $CH_4$  ( $FCH_4$ ), oxirredução (ORP) e salinidade (Sal) mostraram uma correlação positiva. Observa-se que os sítios estudados o C1 está apresentado pelos pontos de cor cinza, e R1 com os pontos de cor preta, indicando características dos grupos diferentes. As variáveis de R1 estão mais próximas entre si, apresentam menor variabilidade em àquelas medidas para C1.

Figura 4- Análises de componentes principais (ACP) mostram a relação das variáveis, ambientais, físicas e químicas da água e os fluxos. Os círculos indicam as variáveis da primeira componente, fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), Potencial de hidrogênio (pH), Oxigênio dissolvido (OD), Temperatura da água (Tag), e negativamente Condutividade elétrica (CE), A dimensão 2 (representado pelo retângulo): Fluxo de metano CH<sub>4</sub> (FCH<sub>4</sub>), Oxirredução (ORP) e Salinidade (Sal).



Fonte: Autor.

Tabela 2- Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados da água. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2, F3 e F4). FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>; Ta: temperatura do ar; Tag: temperatura da água; pH: potencial de hidrogênio; ORP: Óxido redução; OD: Oxigênio dissolvido; CE: condutividade elétrica; Tur: turbineis e Sal: Salinidade.

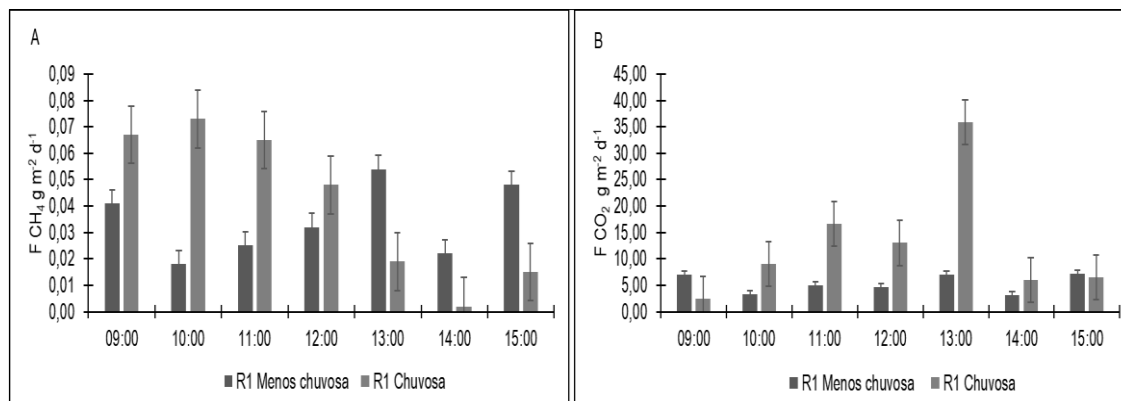
Variáveis	FCH <sub>4</sub>	FCO <sub>2</sub>	Tar	Tag	pH	ORP	OD	CE	Tur	Sal
F1	0,57	<b>0,81</b>	0,35	<b>0,76</b>	<b>0,67</b>	-0,12	<b>0,68</b>	<b>-0,64</b>	-0,11	-0,62
F2	<b>0,63</b>	0,28	0,43	0,38	0,05	<b>0,66</b>	-0,35	0,61	-0,51	<b>0,66</b>
F3	-0,46	-0,31	<b>0,67</b>	0,27	0,35	-0,31	0,32	0,30	0,23	0,32
F4	0,12	-0,06	0,13	0,28	-0,50	0,43	0,18	-0,03	<b>0,69</b>	-0,07

Fonte: Autor.

O principal resultado desta análise indicou que os FCO<sub>2</sub>, e FCH<sub>4</sub> e variáveis da água (Figura 4; Tabela 2) estão associados aos dois ecossistemas. Neste contexto os FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> não mostraram diferença estatística entre ecossistemas.

A sazonalidade para R1 do FCH<sub>4</sub> foi de  $0,033 \pm 0,005 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  na época seca e de  $0,043 \pm 0,010 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  na época chuvosa (Tabela 4; Figura 5 B), os maiores fluxos foram registrados entre 09h00min e 13h00min (Figura 5 A), como em outros estudos com magnitudes de 0,00007 até  $0,42 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (ALLEN *et al.*, 2007).

Figura 5- Fluxo de metano  $F_{CH_4}$  (A) e fluxos de dióxido de carbono  $F_{CO_2}$  (B) da sazonalidade do Estuário Mojuim (R1) no período seco e chuvoso, as colunas apresentam os fluxos por hora, barras mostra o erro Padrão.



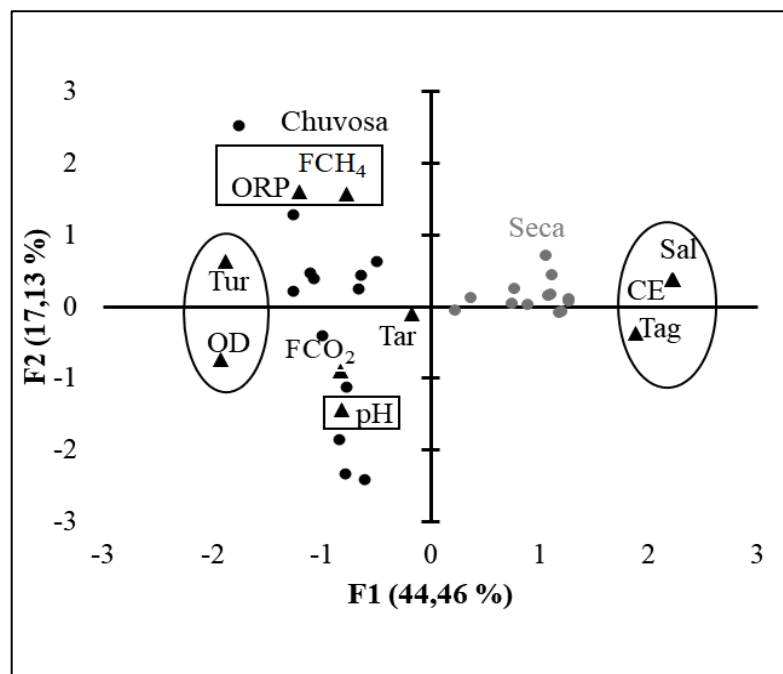
Fonte: Autor.

A sazonalidade total dos  $F_{CO_2}$  foi de  $5,160 \pm 0,604\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$  na época seca e de  $13,280 \pm 3,861$  na época chuvosa. Os maiores fluxos foram registrados entre 11h00min e 13h00min (Figura 5 B), com diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ , Tabela 4), causada pela maior concentração de  $CO_2$  na água e o OD (Tabela 4), sendo o mesmo encontrado em outro trabalho na Amazônia (CALL *et al.*, 2015).

As análises de componentes principais (ACP) das variáveis ambientais e Físico-químicas da água em R1 rio Mojuim, auxiliaram na interpretação da variabilidade conjunta total dos dados de 75,06% em três principais componentes, onde 61,59% são apresentadas pelas duas primeiras componentes. A primeira explicou 44,46%, a segunda 17,13% da variabilidade total dos dados apresentando aqui apenas duas dimensões (Figura 6), também são apresentadas as cargas fatoriais de cada variável (Tabela 3). As variáveis da água que apresentaram a maior relação positiva e negativa, podem-se interpretar que a dimensão 1 está representada pela circunferência: Salinidade (Sal), Condutividade elétrica (CE) e Temperatura da água (Tag). A dimensão 2 (representada pelo retângulo): O fluxo de  $CH_4$  ( $F_{CH_4}$ ), Oxirredução (ORP) Potencial de hidrogênio (pH). A dimensão 3 encontra-se só a temperatura do ar (Tar), sendo que nenhuma das variáveis apresentou relação negativa, com os  $F_{CO_2}$ .

Observa-se que a estação seca está apresentada pelos pontos de cor zinca e chuvosa pelos pontos de cor preta as variáveis da época seca estão mais próximas entre si apresentando menor variabilidade em relação com as da chuvosa (Figura 6; Tabela 3).

Figura 6- Análises de componentes principais (ACP) da sazonalidade, mostram a relação das variáveis, ambientais, físicas e químicas da água e fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. O oval indica as variáveis da primeira componente: Salinidade (Sal), Condutividade (CE), Temperatura da água (Tag), Turbidez (Tur) e Oxigênio Dissolvido (OD). A segunda componente representada pelo retângulo: Oxirredução (ORP), Fluxo de metano CH<sub>4</sub> (FCH<sub>4</sub>), e o Potencial de hidrogênio (pH), a época seca pelos pontos de cor cinza e chuvosa de cor preta.



Fonte: Autor.

Tabela 3- Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados da água. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2 e F3). FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. temperatura do ar (Tar), Tag: temperatura da água; pH; ORP: Óxido redução; OD: Oxigênio dissolvido; CE.; condutividade elétrica; Tur: turbidez e Sal: Salinidade.

Variáveis	FCH <sub>4</sub>	FCO <sub>2</sub>	Tar	Tag	pH	ORP	OD	CE	Tur	Sal
F1	0,11	0,13	0,01	<b>0,65</b>	0,12	0,27	<b>0,69</b>	<b>0,91</b>	<b>0,65</b>	<b>0,91</b>
F2	<b>0,46</b>	0,15	0,00	0,03	<b>0,38</b>	<b>0,47</b>	0,10	0,03	0,07	0,03
F3	0,12	0,21	<b>0,53</b>	0,05	0,26	0,14	0,03	0,00	0,02	0,00
F4	0,03	<b>0,42</b>	0,33	0,02	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autor

Comparando os fluxos medidos no estuário Mojuim com outros estudos se encontrou que os FCH<sub>4</sub> registrados no nosso estudo foram de 0,033 até 0,043 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, enquanto que na Ilha Magüeyes (Porto Rico) foram registrados fluxos de 0,459 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, até 0,767 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2002). No estuário de Adyar (sul da Índia) foi registrado 0,369 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (PURVAJA; RAMESH, 2001). No estuário do rio Jiulongjiang (China) foi 0,001 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (ALONGI *et al.*, 2005). Neste caso os fluxos no estuário amazônico são menores que os fluxos medidos em outros locais.

Tabla 4- Variação espacial e horária do Estuário Mojuim (R1), Canal de Maré (C1). Sazonal para os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Média ± erro padrão, n = 7, em (R1) e (C1) n = 6, onde n.d. significa não determinado. Letras diferentes representam significância entre as médias (LSD, p < 0,05), quando analisado a maré de vazante e maré de enchente (sombreado), letra maiúscula, e entre locais (rio e canal), no período seco. Letras X e Y representam significância entre as médias de distribuição normal (p < 0,05), quando analisado os dois períodos sazonais em R1.

Tempo (horas)	Seco				Chuvoso	
	R1		C1		R1	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
09:00	0,041±0,003 <sup>a</sup>	6,978±0,413 <sup>a</sup>	0,010±0,003 <sup>a</sup>	3,798±1,605 <sup>a</sup>	0,067±0,060 <sup>a</sup>	2,489±0,200 <sup>b</sup>
10:00	0,018±0,003 <sup>a</sup>	3,257±0,268 <sup>a</sup>	0,028±0,016 <sup>a</sup>	8,657±5,125 <sup>a</sup>	0,073±0,004 <sup>a</sup>	9,068±8,072 <sup>ab</sup>
11:00	0,025±0,004 <sup>a</sup>	4,945±1,115 <sup>a</sup>	0,059±0,055 <sup>a</sup>	10,697±8,456 <sup>a</sup>	0,065±0,009 <sup>a</sup>	16,605±1,567 <sup>ab</sup>
12:00	0,032±0,010 <sup>a</sup>	4,698±1,547 <sup>a</sup>	n.d.	n.d.	0,048±0,003 <sup>a</sup>	13,009±1,567 <sup>ab</sup>
<b>Média vazante</b>	<b>0,029±0,004<sup>aAY</sup></b>	<b>4,969±0,624<sup>aAX</sup></b>	<b>0,032±0,017<sup>aA</sup></b>	<b>7,717±2,892<sup>aA</sup></b>	<b>0,063±0,012<sup>aX</sup></b>	<b>10,293±2,526<sup>aX</sup></b>
13:00	0,054±0,026 <sup>a</sup>	6,948±2,764 <sup>a</sup>	n.d.	n.d.	0,019±0,013	35,839±18,382 <sup>a</sup>
14:00	0,022±0,002 <sup>b</sup>	3,122±0,599 <sup>b</sup>	0,002	1,469	0,002±0,001	6,019±5,157 <sup>b</sup>
15:00	0,048	7,184	0,062	2,268	0,015	6,582
<b>Média enchente</b>	<b>0,040±0,011<sup>aAX</sup></b>	<b>5,465±1,310<sup>aAX</sup></b>	<b>0,032±0,030<sup>aA</sup></b>	<b>1,868±0,400<sup>aA</sup></b>	<b>0,011±0,006<sup>bY</sup></b>	<b>18,059±9,442<sup>aX</sup></b>
<b>Médio Total</b>	<b>0,033±0,005<sup>AX</sup></b>	<b>5,160±0,604<sup>AY</sup></b>	<b>0,032±0,014<sup>A</sup></b>	<b>6,255±2,324<sup>A</sup></b>	<b>0,043±0,010<sup>X</sup></b>	<b>13,280±3,861<sup>X</sup></b>

Fonte: Autor.

### 3.3.2 Conversão dos fluxos de CH<sub>4</sub> a emissões de carbono equivalente

Com base em seus potenciais de aquecimento global, os FCH<sub>4</sub>, expressados como emissões de CO<sub>2</sub>-eq, mostraram que o CH<sub>4</sub> especialmente na época seca participa nos fluxos de CO<sub>2</sub>-eq com 24,79 % em C1 e 25,56% em R1, o qual corresponde a 12,91 g CO<sub>2</sub>-eq m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>. O teste estatístico não mostrou diferença significativa entre R1 e C1 ( $p > 0,05$ ). Enquanto que a sazonalidade e o aporte do CH<sub>4</sub> calculado só para R1 foi de 11,41% na época seca predominando a época chuvosa com 21,34 % encontrando diferença significativa sazonal equivalente a 20,15 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>-eq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> das emissões totais que correspondem a 46,18 Gg CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Os valores dos FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> encontrados na Ilha da Macaca são inferiores aos encontrados em outros estudos na Ciénaga de Santa Marta (Colômbia) na época seca de 0,021 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e chuvosa de 0,022 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> em uma região mangue com intervenção humana (BETANCOURT-PORTELA; PARRA; VILLAMIL, 2013). Estes valores são medições de uma primeira informação gerada para o estuário Mojuim, os quais devem ser considerados como um indicador das magnitudes das emissões geradas por estes GEE.

### 3.4 Conclusão

As áreas R1 e C1 apresentaram os maiores fluxos em maré enchente no período seco, onde R1 registrou os maiores FCH<sub>4</sub>. Sendo os fluxos médios totais maiores na época chuvosa, e pode-se inferir que os processos nas interações água-atmosfera que interagem nos FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> neste ecossistema estuarino são complexos.

As variações espaciais e temporais na área estuarina estudada na época seca e chuvosa durante o período de estudo foram fonte de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> para atmosfera, com os maiores fluxos durante o período chuvoso.

As emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> dos pontos (R1 e C1) no período seco obtidos foram influenciados pelos processos físico-químicos da água, principalmente (pH, ORP, OD, Tur e Sal) e da combinação de processos naturais como: períodos climáticos, dinâmica e frequência das marés, principalmente a maré de enchente pela entrada da salinidade de água do mar. Considerando que pesquisas futuras neste ecossistema devem considerar estudos mais intensivos, incluindo ciclos diurnos e noturnos, durante os períodos de as maiores emissões, com ênfase no período chuvoso.



## Agradecimentos

Ao Programa de alianças para Educação e a Capacitação da Organização dos Estados Americanos e o Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (PAEC-OEA-GCUB). Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (UFPA-PPGCA). Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Paulo Sarmento, Lucivaldo da Silva e MSc. Maridalva Ribeiro pela colaboração nos trabalhos de campo.

## Referências

ABICHOU, T. *et al.* Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. **Waste Management**, v. 26, n. 11, p. 1305–1312, 2006.

ALLEN, D. E. *et al.* Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 622–631, 1 fev. 2007.

ALONGI, D. M. *et al.* Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 63, p. 605–618, 2005.

BETANCOURT-PORTELA, J.M.; PARRA, J.B.; VILLAMIL, C. 2013. Emisión de metano y óxido nitroso de los sedimentos de manglar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras**, v. 42, n. 1121, p. 131–152, 2013.

BORGES, A. V. Do we have enough pieces of the jigsaw to integrate CO<sub>2</sub> fluxes in the Coastal Ocean. **Estuaries**, v. 28, n. 1, p. 3–27, 2005.

BORGES, A. V.; ABRIL, G. **Carbon dioxide and methane dynamics in estuaries**. Liège Belgium: Elsevier Inc., 2011. v 5, p. 119-161.

BRASIL. Marinha do Brasil. centro de Hidrografia da Marinha. **Tábuas de maré**. Disponível em : <https://www.marinha.mil.br> 2018. Acesso em 10 de maio 2018b.

CALL, M. *et al.* Spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane fluxes over semi-diurnal and spring–neap–spring timescales in a mangrove creek. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 150, p. 211–225, fev. 2015.

CASTRO, L.; FRAILE, J.; VARGAS, R. J. Conductividad, oxígeno disuelto, pH Y Temperatura en Río Bermúdez (Costa Rica) y su relación con el uso del suelo en la cuenca unificencia. **Uniciencia**, v. 13, n. 1, p. 27-34, 1996.

CURRY, C. L. Modeling the soil consumption at atmospheric methane at the global scale. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, n. 4, p. 1–15, 2007.

DALVA, M.; MOORE, T. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. **Journal of Soil Science**, v. 44, p. 651–664, 1993.

DENMAN, K. *et al.* Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. Contribution of working group to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 2007. **IPCC**, 2007. v. 7.

DOWNING, J. A.; DUARTE, C. M. Abundance and Size Distribution of Lakes, Ponds and Impoundments. **Encyclopedia of Inland Waters**, v. 51, n. 5, p. 469–478, 2009.

DUTAUR, L.; VERCHOT, L. V. A global inventory of the soil CH<sub>4</sub> sink. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, n. 4, p. 1–9, 2007.

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY - NOAA. **PRCP\_CU\_GAUGE\_V1201**. Disponível em: <https://esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em: 10 de abril. 2018b

FRANKIGNOULLE, M. Field measurements of air- sea CO<sub>2</sub> exchange. **Limnology and Oceanography**, v. 33, n. 3, p. 313–322, 1988.

GATTUSO, J.-P.; FRANKIGNOULLE, M.; WOLLAS, R. Carbon and Carbonate Metabolism in Coastal Aquatic Ecosystems. **Annual Reviews**, v. 29, n. 1998, p. 405, 1998.

HIROTA, M. *et al.* Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan. **Chemosphere**, v. 68, n. 3, p. 597–603, 2007.

HOPE, D.; BILLETT, M. F. F.; CRESSER, M. S. S. A review of the export of carbon in river water: Fluxes and processes. **Environmental Pollution**, v. 84, n. 3, p. 301–324, 1994.

IPCC: Observed climate variability and change. Contribution of working group i to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.

JACOTOT, A.; MARCHAND, C.; ALLENBACH, M. Tidal variability of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the water column within a Rhizophora mangrove forest (New Caledonia). **Science of the Total Environment**, v. 631–632, p. 334–340, 2018.

JEAN, M.; PIERRE; ROGER. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. **European Journal of Soil Biology**, v. 37, n. 2001, p. 25–50, 2010.

KHALIL, M. A. K.; RASMUSSEN, R. A.; SHEARER, M. J. Atmospheric nitrous oxide: Patterns of global change during recent decades and centuries. **Chemosphere**, v. 47, n. 8, p. 807–821, 2002.

LARUELLE, G. G. *et al.* Evaluation of sinks and sources of CO<sub>2</sub> in the global coastal ocean using a spatially explicit typology of estuaries and continental shelves. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 15, p. 1–6, 2010.

MCEWING, K. R.; FISHER, J. P.; ZONA, D. Environmental and vegetation controls on the spatial variability of CH<sub>4</sub> emission from wet-sedge and tussock tundra ecosystems in the Arctic. **Plant and Soil**, v. 388, n. 1–2, p. 37–52, 2015.

MIDDELBURG, J. J. *et al.* Organic matter mineralization in intertidal sediments along an estuarine gradient. **Marine Ecology Progress Series**, v. 132, n. 1–3, p. 157–168, 1996.

MUKHOPADHYAY, S. K. *et al.* Impact of Sundarban mangrove biosphere on the carbon dioxide and methane mixing ratios at the NE Coast of Bay of Bengal, India. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 4, p. 629–638, 2002.

NORIEGA, C.; ARAUJO, M. Carbon dioxide emissions from estuaries of northern and northeastern Brazil. **Scientific Reports**, v. 4, n. Table 1, p. 1–9, 2014.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, AND T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007.

PURVAJA, R.; RAMESH, R. Natural and anthropogenic methane emission from coastal wetlands of South India. **Environmental Management**, v. 27, n. 4, p. 547–557, 2001.

QUÉRÉ, C. LE *et al.* Global Carbon Budget 2015. **Earth System Science Data**, v. 7, n. 2, p. 349–396, 2015.

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus B**, v. 44, n. 2, p. 81–99, 1992.

RASERA, M. DE F. F. L. *et al.* Spatial and temporal variability of pCO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> efflux in seven Amazonian Rivers. **Biogeochemistry**, v. 116, n. 1–3, p. 241–259, 2013.

RAYMOND, P. A. *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters. **Nature**, v. 503, n. 7476, p. 355–359, 2013.

RICHEY, J. E. *et al.* Nature outgassing in tropics. **Nature**, v. 416, n. 6911, p. 6413–6416, 2002.

SAWAKUCHI O, H. *et al.* Methane emissions from Amazonian Rivers and their contribution to the global methane budget. **Global Change Biology**, v. 20, n. 9, p. 2829–2840, 2014.

SHINDELL, D. T. *et al.* Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. **science**, v. 326, p. 716–718, 2009.

STOCKER, T.F., D. *et al.* **Climate change 2013: the physical science basis**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge; United Kingdom; New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013. v. 1, 1535p

SUNDQVIST, E. *et al.* Short-term effects of thinning, clear-cutting and stump harvesting on methane exchange in a boreal forest. **Biogeosciences**, v. 11, n. 21, p. 6095–6105, 12 novembro 2014.

WHALEN, S. C. Natural Wetlands and the Atmosphere. **Environmental Engineering Science**, v. 22, n. 1, p. 73–94, 2005.

WEI-JUN, C. Een vergelijking van de effectiviteit van furazolidon in apramycin tegen colibacillose bi gespelde biggen. **The Annual Review of Marine Science**, v. 108, n. 3, p. 123–145, 2011.

WUEBBLES, D. J.; HAYHOE, K. Atmospheric methane and global change. **Earth-Science Reviews**, v. 57, n. x, p. 177–210, 2002.

YI LU, C. *et al.* Methane flux and production from sediments of a mangrove wetland on Hainan Island, China. **Mangroves and Salt Marshes**, v. 3, n. 1, p. 41–49, 1999.

## CAPITULO 4 VARIACÃO ESPACIAL E SAZONAL DOS FLUXOS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> DO SOLO EM UM ECOSISTEMA DE MANGUE NA ILHA MACACA NO ESTUÁRIO AMAZÔNICO.

### Resumo

Foram quantificados os fluxos de metano (FCH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) sazonal e de gradiente topográfico, associados a parâmetros abióticos em solo de mangue, na interface solo-atmosfera na Ilha da Macaca em São Caetano de Odivelas (Pará). A ilha apresenta uma área aproximada de 1.386,50 ha, e duas épocas sazonais: a estação seca de julho a dezembro (2017) e estação chuvosa de janeiro a junho (2018). Os FCH<sub>4</sub> apresentaram médias na época seca de 0,0711 a 0,1874 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> da época chuvosa. Os FCO<sub>2</sub> variaram de 7,0542 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> época seca a 6,3607 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> da chuvosa, sim apresentaram diferença significativa entre as estações climáticas. A zona com maior FCH<sub>4</sub> foi em B1 (0,4448 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e o menor em B2 (0,0083 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), enquanto que, para os FCO<sub>2</sub> o maior foi A2 (10,7338 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e B1(3,8794 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). A relação do gradiente topográfico para FCH<sub>4</sub> da zona baixa de 7,95 m com maior fluxo foi de (0,2360 ± 0,1044 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e alta de 8,24m foi de (0,0271 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), sendo o inverso para FCO<sub>2</sub>, zona baixa com menor fluxo (5,4383 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e a alta com maior fluxo (7,8788 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), em ambos os casos foram encontradas diferenças significativas (p < 0,05). Os fluxos de CH<sub>4</sub> representados como emissões de CO<sub>2</sub>-eq, foi de 8,63 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na época seca e de 10,60 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na época chuvosa, com emissões totais de 35,09 Gg CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Na área de estudo foi realizado um inventário florístico encontrando predominância de 96,7% da espécie *Rhizophora mangue*, e *Avicenia germinans* com 3,28% de área basal total de 321,0 Ind ha<sup>-1</sup>. Os FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> foram influenciados pelas variáveis de solo principalmente pelo acúmulo de matéria orgânica dada pelas reações químicas dos compostos fenólicos inibindo a atividade microbiana, e reagente oxirredução, diferenciando os fluxos nos gradientes topográficos alto e baixo.

Palavras-chave: Metano. Dióxido de Carbono. Ecossistema. Solo. Manguezal. Estuário Amazônico.

## Abstract

Methane (FCH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (FCO<sub>2</sub>) fluxes were quantified seasonal and topographic gradient, associated with abiotic parameters in mangrove soil at the soil-atmosphere interface on Macaca Island, in São Caetano de Odivelas (Pará). The has an approximate area of 1,386.50 ha, and two climatic seasons: the dry season from July to December (2017) and rainy season from January to June (2018). The FCH<sub>4</sub> presented averages in the dry season from 0.0711 to 0.1874 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> of the rainy season. The FCO<sub>2</sub> ranged from 7.0542 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and dry season to 6.3607 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> of the rainy season, but showed significant differences between climatic seasons. The zone with the highest FCH<sub>4</sub> was in B1 (0.4448 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) and the smallest in B2 (0.0083 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), O FCO<sub>2</sub> the highest flow was A2 (10.7338 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) and B1 (3.8794 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). The ratio of topographic gradient to FCH<sub>4</sub> of the 7.95 m low flow zone with the highest flow was (0.2360 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) and 8.24 m high was (0.0271 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), being the inverse for FCO<sub>2</sub>, low zone with lower flow (5.4383 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) and high zone with higher flow (7.8788 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), in both cases significant differences were found ( $p < 0.05$ ). The FCH<sub>4</sub> represented as CO<sub>2</sub>-eq emissions were 8.63 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> in the dry season and 10.60 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> in the rainy season, with total emissions of 35.09 Gg CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. In the study area a floristic inventory was carried out finding a predominance of 96.7% of the species *Rhizophora mangue*, *Avicenia germinans* with 3.28% of total basal area of 321.0 Ind ha<sup>-1</sup>. The FCH<sub>4</sub> and FCO<sub>2</sub> were influenced by the soil variables mainly by the accumulation of organic matter given by the chemical reactions of the phenolic compounds inhibiting the microbial activity, and oxy-reduction reagent, differentiating the fluxes in the high and low topographic gradients.

Keywords: Methane. Carbon dioxide. Ecosystem. Soil. Mangrove. Amazon Estuary.

#### 4.1 Introdução

As concentrações dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera estão aumentando desde a revolução industrial devido às atividades antropogênicas, uso de combustíveis fósseis e mudanças no uso do solo (IPCC, 2001). O CH<sub>4</sub> tem aumentado de 1.750 a 1.819 ppb e CO<sub>2</sub> de 277 a 400 ppm, (NOAA, 2018c; QUÉRÉ *et al.*, 2015). O CH<sub>4</sub> é o segundo GEE mais importante, devido ao potencial de aquecimento global de 23 vezes maior que o CO<sub>2</sub> para um período de 100 anos (SHINDELL *et al.*, 2009).

Dentro da problemática sobre o aquecimento global, tem que se considerar à importância das emissões e sequestros do CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, como influenciadores das mudanças da temperatura da superfície da terra, marinha, padrões espaciais e temporais das precipitações, e intensidade dos fenômenos como “El Niño” (IPCC, 2001). A mudança climática representa um risco para os ecossistemas de mangue (POLIDORO *et al.*, 2010), e os maiores repositórios e reguladores do ciclo de carbono que qualquer outro floresta tropical (DONATO *et al.*, 2011).

Aproximadamente existem 181.077 km<sup>2</sup> de áreas de manguezais no mundo (SPALDING; BLASCO; FIELD, 1997), com a maior área localizada em zonas estuarinas, com aproximadamente de 83.000 a 138.000 km<sup>2</sup> na latitudes de 30° N a 40° S (GIRI *et al.*, 2011; HAMILTON; CASEY, 2016). As áreas litorâneas da costa do Pará possuem 2.176,78 km<sup>2</sup> conhecidas como costa de manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA) (SOUZA FILHO, 2005). Os manguezais das zonas estuarinas das regiões tropicais e subtropicais são reconhecidos como um dos principais contribuintes marinhos para a emissão de GEE na atmosfera (ALLEN *et al.*, 2011; CHEN; TAM; YE, 2012), aportando um 15% (26,1 Tg Cot ano<sup>-1</sup> anualmente) enterrado em ambientes marinhos (BREITHAUPT *et al.*, 2012).

Os manguezais são considerados importantes sumidouros de longo prazo para o CO<sub>2</sub> atmosférico, denominado “carbono azul” (DUARTE *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2016). Este ecossistema atua como um grande repositório de matéria orgânica com 1,023 Mg C ha<sup>-1</sup>, entre 49–98% do total é encontrado no solo (DONATO *et al.*, 2011), onde as reações químicas de compostos fenólicos inibem a atividade microbiana, levando ao acúmulo de matéria orgânica não manguezais (FRIESEN; DUNN; FREEMAN, 2018).

Existem poucos estudos em emissões de GEE entre a interface solo-atmosfera em floresta de mangue em relação à topografia, apesar do grande interesse em quantificar as várias vias de carbono dos manguezais (BOUILLON *et al.*, 2008; DONATO *et al.*, 2011; JACOTOT; MARCHAND; ALLENBACH, 2018; MAHER *et al.*, 2018). Dos poucos estudos neste tipo de ambiente, pode-se referir ao trabalho dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, na florestas de mangue em solos semiáridos no Nordeste do Brasil (NÓBREGA *et al.*, 2016). A grande parte da produção de CO<sub>2</sub> dos manguezais é proveniente da respiração do solo, e os fluxos dependem de mudanças nas características físicas, reações químicas e processos biológicos do solo (BOUILLON *et al.*, 2008).

No caso do CH<sub>4</sub>, a interface solo-atmosfera é dado pelo equilíbrio e compensação de dois processos microbianos que ocorrem simultaneamente durante a decomposição da matéria orgânica. Processo anaeróbico (metanogênese), responsável pela produção do CH<sub>4</sub>, e processo aeróbico (metanotrofia), responsável pela oxidação do CH<sub>4</sub> (CORRALES *et al.*, 2015). O CH<sub>4</sub> é consumido pelas bactérias metanotróficas (ex: reino Archaeas) como única fonte de energia e transformadora do CO<sub>2</sub> durante o processo digestivo, a uma relação 50 % CH<sub>4</sub> e 70% CO<sub>2</sub> (LORENZO ACOSTA YANIRIS, 2005).

Existem vários fatores que contribuem para a variabilidade espaço-temporal dos fluxos, como carbono no solo, qualidade do substrato, temperatura do solo, umidade do solo, atividade microbiana, pH e disponibilidade de nitrogênio (BORN; DORR; LEVIN, 1990; DORR; KATRUFF; LEVINN, 1993). Os solos têm um papel importante no ciclo do carbono, com uma reserva estimada de 1500 Pg C, (DENMAN *et al.*, 2007; KOTROCZÓ *et al.*, 2014; VALENTINI *et al.*, 2000).

Os estuários mostram alta variabilidade espaço-temporal das emissões de CO<sub>2</sub> de 0,094 a 0,6 Pg C ano<sup>-1</sup> (CHEN-TUNG; BORGES, 2009; LARUELLE *et al.*, 2010; REGNIER *et al.*, 2013), e entre latitude de 0° a 23,5° S com emissões de CO<sub>2</sub> de 2,3 ± 0,7 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (ROSENRETER *et al.*, 2018). Para o CH<sub>4</sub> as magnitudes variam de 0,8 a 6,6 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup> (BORGES; ABRIL, 2011; MIDDELBURG *et al.*, 2002; UPSTILL-GODDARD *et al.*, 2000). Estas variações nas emissões de CH<sub>4</sub> em área de mangue são de 0,7 10<sup>5</sup> a 10,5 10<sup>5</sup> g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (BARNES *et al.*, 2006; DALAL *et al.*, 2008). Pesquisas sugerem que as emissões de gases provenientes dos manguezais não são significativas, comparadas com as áreas alagadas continentais (SOTOMAYOR; CORREDOR; MORELL, 1994).



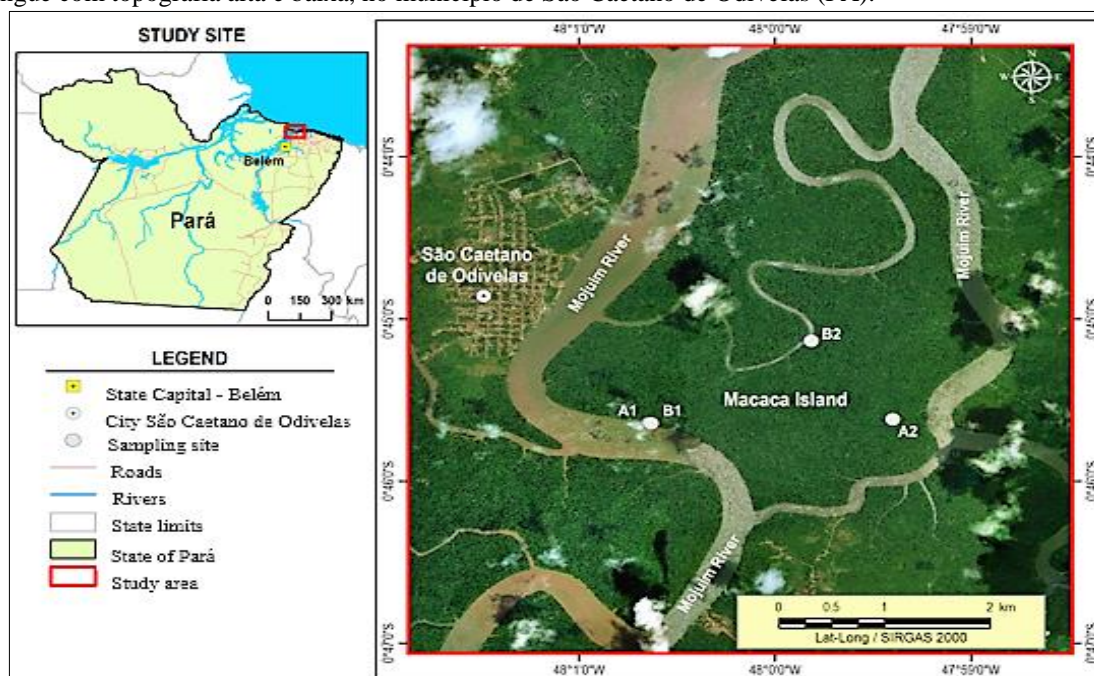
Este trabalho foi realizado objetivando quantificar a variabilidade dos FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> espacial e sazonal e sua relação com um gradiente topográfico associado às variáveis bióticas em solo de manguezal na Ilha da Macaca.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Área de estudo

Está localizada na Ilha da Macaca inserida no estuário Mojuim na reserva extrativista marinha Mocapajuba, no município de São Caetano de Odivelas Pará. (Figura 1).

Figura. 1- Localização da área de estudo e locais de amostragens (A1, B1, A2, B2) em ecossistema de mangue com topografia alta e baixa, no município de São Caetano de Odivelas (PA).



Fonte: Autor.

A área apresenta clima tropical úmido equatorial amazônico, tipo *Am* segundo a classificação de Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Durante o ano de estudo a zona apresentou dois períodos sazonais: época chuvosa de janeiro a junho do ano 2018 tendo 2155,0 mm de precipitação, e a época seca de julho a dezembro do ano 2017 1.016,5 mm, e uma precipitação anual acumulada de 3.171,5mm (BRASIL. 2018c).

Foram comparadas as médias históricas de precipitação de 2.732 mm desde 1981 a 2018, e a Tar entre 24 °C e 32 °C, e as diferenças não foram significativas (Teste-t;  $p > 0,05$ ) (NOAA. 2018c). As marés mais baixas foram no período seco de 3,71 m, e 3,90 m para a estação chuvosa. Com isto a diferença das marés (0,19 m) entre épocas.

A Ilha faz parte da maior faixa de manguezal do planeta de 7.591 km<sup>2</sup> equivalente a 56,6% dos manguezais do Brasil, e o Estado do Pará com 2.176,78 km<sup>2</sup>, denominada Costa de Manguezal de Macromaré da Amazônia (CMMA) com maré chegando até 7,5 m de altura (SOUZA FILHO, 2005).

#### 4.2.2 Desenho experimental das áreas de amostragem

Foram georreferenciadas quatro sítios com um *GPSMAP Garmin* (modelo 64s), divididos em dois gradientes topográficos em relação à altitude em metros acima do nível do mar (MANM) calculados pelo método geodésico elipsoide, dois pontos altos: A1 8,34 m; latitude -0,760727° e longitude -48,010665°, A2 8,5 m; latitude -0,760372° e longitude -47,989951°) com média de 8,42 m, e os dois pontos baixos B1 com 8,14 m e latitude -0,760763° e longitude -48,010509°, B2 com 7,4 m e latitude -0,752301° e longitude -47,996874° apresentando uma média de 7,77 m na área de topografia baixa com uma diferença de 0,65 m entre gradientes topográficos. Os estudos mensais foram nas duas épocas sazonais: a seca, de julho a dezembro 2017 e a chuvosa, de janeiro a junho 2018.

Em A1, A2, B1, e B2 foi traçado uma circunferência de 20,0 m de diâmetro equivalente a 314,20 m<sup>2</sup>, onde foram distribuídas 8 câmaras (n = 32) e uma separação entre câmaras de 7,90 m. Os fluxos foram mensurados usando a técnica da câmara dinâmica fechada (DAVIDSON; TRUMBORE, 1995; VERCHOT *et al.*, 2000), ligada a um analisador de gás infravermelho com um sistema automatizado de aquisição de dados (*ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer*, da *Los Gatos Research*, modelo 915-0011-1000).

O equipamento foi calibrado usando as amostras padrões de gás para o CH<sub>4</sub> (0,94 e 3,15 ppm) e CO<sub>2</sub> (0,395 e 1.510 ppm), para medir a concentração dos gases a uma frequência de 1 Hz. A precisão garantida pelo fabricante é 2 ppm para CH<sub>4</sub> (5 s) 300 ppb para CO<sub>2</sub> (5 s).

As câmaras foram construídas de *Polyvinyl chloride* (PVC) com diâmetro de 19,20 cm e 12,00 cm de altura, e uma tampa com três furos na parte superior, dois para manter a circulação de gás entre a câmara e o aparelho, e outro para manter a pressão atmosférica de dentro da câmara idêntica ao exterior. Foram mensuradas *in situ* as variáveis ambientais; temperatura do ar (Tar, °C), umidade relativa (Ur, %), velocidade do vento (Vv, m s<sup>-1</sup>), usando um termo-higroanemômetro portátil (modelo AK821) a 2,00 m acima da superfície do solo. A temperatura do solo (Ts, °C) foi medida ao lado de cada câmara, após cada medição de fluxo com termômetro portátil digital (modelo TP101).

As variáveis Físico-químicas do solo (n = 8) foram medidas em cada sítio a uma profundidade de 0,15 m, sendo potencial de hidrogênio (pH) medido com eletrodo de vidro calibrado com soluções padrão de pH = 4,0 e 7,0, e o potencial redox (Eh, mV) medido com um eletrodo de platina corrigido (+244 mV) com um equipamento Metrom 744 (EMBRAPA, 2017). O carbono microbiano (Cm), o nitrogênio microbiano (Nm) e Matéria Orgânica (MO) foram calculados pelo método de (Irradiação-extração) (EMBRAPA, 2017; ISLAM; WEIL, 1998; MATOS; MENDONÇA, 2005; SILVA, 2018). O carbono orgânico total (Cot), e nitrogênio orgânico total (Not) foram calculados através de volumetria de (oxirredução) pelo método Walkley-Black (EMBRAPA, 2017; SILVA, 2018; WALKLEY, A., BLACK, 1939). A salinidade foi medida com o aparelho refractômetro (PCE 0 -100), Umidade de solo (Us, %) foi mensurada pelo método gravimétrico residual (EMBRAPA, 2017; SILVA, 2018). Todas as análises de solo foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas do Museu Paraense Emílio Goeldi (LAQGoeldi), em Belém (PA).

Foi realizado um inventário florístico com metodologia de parcelas circulares de 1.250 m<sup>2</sup>, (KAUFFMAN; DONATO; ADAME, 2013), divididas em 4 subparcelas de 314,15 m<sup>2</sup> equivalente a 0,38 ha.

#### 4.2.3 Coleta de dados dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>

As medições foram realizadas mensalmente na época seca de julho a dezembro de 2017, e na época chuvoso de janeiro a julho de 2018, de 07h00min e 17h00min, em campanhas mensais nas marés de quadratura.

Cada câmara foi enterrada aproximadamente a 5,0 cm no solo para evitar a saída de fluxos pelas laterais (HUTCHINSON; LIVINGSTON, 2001; VERCHOT *et al.*, 2000), e fechadas na parte superior com uma tampa de 20,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura durante um período de 4 min (KELLER *et al.*, 2000), sendo os registros das medições obtidos a cada 2 segundos em tempo real.

#### 4.2.4 Cálculo dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>

Os fluxos entre a interface solo-atmosfera, foram calculados a partir de dados de concentração de CH<sub>4</sub> ou CO<sub>2</sub> em ppm (dc), e o tempo decorrido em segundos (dt) pela seguinte equação (1):

$$F = P.V.M.\mu. (dc/dt) / (A.T. R) \quad \text{Equação 1.}$$

Onde:  $F$  = fluxo em  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ,  $P$  = pressão atmosférica (atm),  $V$  = volume da câmara em litros (3,47 L),  $M$  = massa molar do  $\text{CH}_4$  ( $16 \text{ g mol}^{-1}$ ), o  $\text{CO}_2$  ( $44 \text{ g mol}^{-1}$ ),  $\mu$  = fator de conversão das unidades ( $0,0864 \text{ L s } \mu\text{L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ),  $A$  = área coberta pela câmara em metros quadrados ( $\text{m}^2$ ),  $T$  = temperatura da câmara em kelvin (K) e  $R$  = constante dos gases ( $0,08205 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ),  $dc/dt$ , foi determinada por regressão linear ( $\gamma = \beta_0 + \beta_1 \times$ ) (ABICHOU *et al.*, 2006; DAVIDSON *et al.*, 2000; NAKANO *et al.*, 2004). Só os pontos que representam a aumento linear com  $R^2 \geq 0,3$  foram considerados como fluxo, os  $R^2 < 0,3$  se considerou como zero (SUNDQVIST *et al.*, 2014).

#### 4.2.5 Conversão em carbono equivalente

Os  $\text{FCH}_4$  foram convertidos a emissões de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ), considerando seu potencial de aquecimento global de 23 vezes maior em relação ao  $\text{CO}_2$  para um período de 100 anos (STOCKER, *et al.*, 2013), usando a seguinte equação (2):

$$\text{CO}_2\text{-eq} = \text{FCO}_2 + (\text{FCH}_4 * 23) \quad \text{Equação 2.}$$

Onde,  $F$  é fluxo de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , e 23, e o potencial de aquecimento global do  $\text{CH}_4$ , tendo como referência o  $\text{CO}_2$  em um período de 100 anos.

#### 4.2.6 Análise dos dados

Foi determinada a normalidade dos dados dos  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  e parâmetros físico-químicos do solo pelo método de Shapiro–Wilks. O teste t de Student foi utilizado para testar as diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) das emissões entre os diferentes sítios e períodos sazonais, quando as distribuições foram normais com ANOVAS pelo método de Fisher LSD, para os dados não paramétricos foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis. As análises estatísticas foram calculadas com o *software* estatístico livre *Infostat 2015*®.

### 4.3 Resultados

#### 4.3.1 Composição florística

A composição florística da área de estudo abrangeu duas espécies: *Rhizophora mangle* L como a mais predominante apresentando  $310,5 \text{ Ind. ha}^{-1}$  equivalente a 96,7%, e uma área basal de  $18,82 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , a segunda espécie foi *Avicenia germinans* (L) Learn., com  $10,5 \text{ Indivíduos ha}^{-1}$  equivalente a 3,28 %, e área basal de  $10,54 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , dos 321 indivíduos típicos de mangue inventariados. Esta mesma distribuição dendrométrica foi registrada em

Soure, Salinópolis e Maracanã no estado do Pará (CARVALHO; JARDIM, 2017).

#### 4.3.2 Fluxos dos gases de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> da época seca

Os FCH<sub>4</sub> g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> do solo nos quatro sítios analisados variaram (média ± erro padrão) na zona A1 com 0,026 ± 0,021 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, a zona A2 foi 0,005 ± 0,003 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, sendo o mês de julho com maior fluxo em A1 e A2 respectivamente, com uma diferença estatística significativa (p < 0,05). A zona B1 foi de 0,223 ± 0,095 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e B2 foi de 0,012 ± 0,008 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, sendo que em julho aconteceu o maior fluxo em B1 e em B2 foi em dezembro respectivamente, com uma diferença estatística significativa (p < 0,05) (Tabela 1). Onde o potencial de oxidação (CE) apresentou ambiente redutor (Tabela 3) e correlação com FCH<sub>4</sub> de (R<sup>2</sup> 0,70; p = 0,0001).

Tabla 1- Variação mensal, espacial (Media  $\pm$  erro padrão, n=8) e sazonal (Media  $\pm$  erro padrão, n=48 para A1, e B2 com n=40) dos fluxos de metano (FCH<sub>4</sub>) g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e fluxos dióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) em g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> dos sítios estudados, onde n.d. significa não determinado. Sendo que as letras minúsculas diferentes representam significância (p < 0,05) entre as médias de cada sítio mensal (colunas), e as letras maiúsculas representam as diferenças significativas (p < 0,05) entre os sítios (linhas).

MÊS	FCH <sub>4</sub> g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>				FCO <sub>2</sub> g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>			
	SITIO				SITIO			
	A1	B1	A2	B2	A1	B1	A2	B2
Jul-17	0,117 $\pm$ 0,103 <sup>aA</sup>	0,425 $\pm$ 0,417 <sup>aA</sup>	0,027 $\pm$ 0,017 <sup>abA</sup>	0,001 $\pm$ 0,001 <sup>aA</sup>	8,332 $\pm$ 1,604 <sup>aAB</sup>	2,343 $\pm$ 1,245 <sup>bc</sup>	12,000 $\pm$ 2,613 <sup>ba</sup>	5,729 $\pm$ 1,465 <sup>bcBC</sup>
A	0,005 $\pm$ 0,003 <sup>aA</sup>	0,253 $\pm$ 0,236 <sup>aA</sup>	0,002 $\pm$ 0,002 <sup>ba</sup>	0,002 $\pm$ 0,002 <sup>aA</sup>	5,568 $\pm$ 1,834 <sup>abBC</sup>	1,724 $\pm$ 1,724 <sup>bc</sup>	11,458 $\pm$ 4,975 <sup>bb</sup>	23,198 $\pm$ 3,690 <sup>aA</sup>
S	0,003 $\pm$ 0,001 <sup>aAB</sup>	0,348 $\pm$ 0,319 <sup>aA</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>bb</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>ab</sup>	5,495 $\pm$ 1,113 <sup>abB</sup>	7,682 $\pm$ 2,159 <sup>ab</sup>	17,517 $\pm$ 3,943 <sup>abA</sup>	4,358 $\pm$ 0,891 <sup>bcB</sup>
O	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>aA</sup>	-0,000 $\pm$ 0,012 <sup>aA</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>ba</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>aA</sup>	2,641 $\pm$ 1,841 <sup>abB</sup>	2,078 $\pm$ 0,506 <sup>bb</sup>	5,6535 $\pm$ 0,999 <sup>ba</sup>	5,908 $\pm$ 0,995 <sup>bcA</sup>
N	n.d.	0,139 $\pm$ 0,071 <sup>aA</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>bb</sup>	n.d.	n.d.	0,007 $\pm$ 0,001 <sup>bb</sup>	7,6482 $\pm$ 1,063 <sup>ba</sup>	n.d.
D	0,002 $\pm$ 0,002 <sup>aA</sup>	0,176 $\pm$ 0,109 <sup>aA</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>ba</sup>	0,067 $\pm$ 0,037 <sup>aA</sup>	5,013 $\pm$ 1,841 <sup>abA</sup>	5,837 $\pm$ 1,686 <sup>aA</sup>	5,590 $\pm$ 1,584 <sup>ba</sup>	9,407 $\pm$ 4,811 <sup>ba</sup>
Média	0,026 $\pm$ 0,021 <sup>aAB</sup>	0,223 $\pm$ 0,095 <sup>aA</sup>	0,005 $\pm$ 0,003 <sup>bb</sup>	0,012 $\pm$ 0,008 <sup>ab</sup>	5,409 $\pm$ 0,686 <sup>aAB</sup>	3,279 $\pm$ 0,672 <sup>bb</sup>	9,978 $\pm$ 1289 <sup>aA</sup>	9,720 $\pm$ 1,642 <sup>aA</sup>
Jun-18	0,001 $\pm$ 0,001 <sup>aA</sup>	0,058 $\pm$ 0,035 <sup>aA</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>ba</sup>	0,000 $\pm$ 0,000 <sup>aA</sup>	6,521 $\pm$ 3,335 <sup>abAB</sup>	2,147 $\pm$ 0,616 <sup>bb</sup>	6,873 $\pm$ 1,2237 <sup>ba</sup>	3,842 $\pm$ 0,676 <sup>bcAB</sup>
F	0,002 $\pm$ 0,002 <sup>aA</sup>	1,747 $\pm$ 1,377 <sup>aA</sup>	0,008 $\pm$ 0,004 <sup>abA</sup>	0,001 $\pm$ 0,001 <sup>aA</sup>	2,009 $\pm$ 0,409 <sup>bb</sup>	4,778 $\pm$ 1,095 <sup>ab</sup>	16,097 $\pm$ 3,968 <sup>abA</sup>	7,989 $\pm$ 2,608 <sup>bcB</sup>
M	0,013 $\pm$ 0,011 <sup>aA</sup>	0,746 $\pm$ 0,409 <sup>aA</sup>	0,002 $\pm$ 0,001 <sup>abA</sup>	0,002 $\pm$ 0,002 <sup>aA</sup>	3,259 $\pm$ 1,258 <sup>abA</sup>	8,548 $\pm$ 2,821 <sup>aA</sup>	7,191 $\pm$ 1,682 <sup>ba</sup>	3,391 $\pm$ 0,481 <sup>bcA</sup>
A	0,061 $\pm$ 0,041 <sup>aA</sup>	0,068 $\pm$ 0,588 <sup>aA</sup>	0,332 $\pm$ 0,257 <sup>aA</sup>	0,007 $\pm$ 0,003 <sup>aA</sup>	3,326 $\pm$ 1,499 <sup>abB</sup>	3,070 $\pm$ 0,593 <sup>bb</sup>	24,83 $\pm$ 7,693 <sup>aA</sup>	6,499 $\pm$ 0,987 <sup>bcB</sup>
M	0,001 $\pm$ 0,003 <sup>aA</sup>	0,0338 $\pm$ 1,169 <sup>aA</sup>	0,002 $\pm$ 0,003 <sup>abA</sup>	0,009 $\pm$ 0,005 <sup>aA</sup>	2,691 $\pm$ 0,538 <sup>abA</sup>	3,976 $\pm$ 0,744 <sup>ba</sup>	3,908 $\pm$ 1,041 <sup>ba</sup>	3,153 $\pm$ 0,594 <sup>ca</sup>
J	0,041 $\pm$ 0,038 <sup>aA</sup>	1,346 $\pm$ 1,332 <sup>aA</sup>	0,004 $\pm$ 0,002 <sup>abA</sup>	0,002 $\pm$ 0,002 <sup>aA</sup>	7,553 $\pm$ 1,554 <sup>aA</sup>	5,912 $\pm$ 1,869 <sup>aA</sup>	10,039 $\pm$ 3,898 <sup>ba</sup>	5,053 $\pm$ 0,845 <sup>bcA</sup>
Média	0,020 $\pm$ 0,009 <sup>aA</sup>	0,668 $\pm$ 0,384 <sup>aA</sup>	0,058 $\pm$ 0,044 <sup>aA</sup>	0,004 $\pm$ 0,001 <sup>aA</sup>	4,226 $\pm$ 0,729 <sup>ab</sup>	4,739 $\pm$ 0,662 <sup>ab</sup>	11,491 $\pm$ 1,852 <sup>aA</sup>	4,9877 $\pm$ 0,5499 <sup>ab</sup>

Fonte: Autor

Os FCO<sub>2</sub> da zona A1 com  $5,409 \pm 0,686 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , a zona A2 foi de  $9,978 \pm 1,289 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sendo julho de maior fluxo em A1 e setembro em A2 com diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ). A zona B1 com  $3,279 \pm 0,672 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e B2 com  $9,720 \pm 1,642 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sendo setembro de maior fluxo em B1 e outubro B2, com diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) (Tabela 1). Onde os fluxos tiveram variação mensal significativa nos diferentes sítios ( $p < 0,05$ ; Tabela 1). As maiores correlações com os fluxos foram com a umidade de solo ( $R^2 = -0,06$ ;  $p = 0,02$ ), e MO ( $R^2 = -0,84$ ;  $p = 0,001$ ). Os solos aeróbicos, úmidos, ricos em MO e uma boa atividade microbiana podem estar associados a altas emissões de CO<sub>2</sub> (Tabela 3) como os registrados nesta pesquisa com carbono total em ( $R^2 = -0,54$ ;  $p = 0,03$ ), visto que possui alta difusividade na interface superfície-atmosfera (RISK, KELLMAN E BELTRAMI, 2008). Fluxos dos gases de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> da época chuvosa.

#### 4.3.3 Fluxos dos gases de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> da época chuvosa

Os FCH<sub>4</sub> do solo nos quatro sítios analisados variaram (média  $\pm$  erro padrão) na zona A1 com  $0,020 \pm 0,009 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , a zona A2 foi  $0,058 \pm 0,044 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sendo o mês de abril com maior fluxo em A1 e A 2 respectivamente, não encontra-se diferença estatística significativa entre A1 e A2 ( $p > 0,05$ ). A zona B1 foi de  $0,668 \pm 0,0384 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e B2 foi de  $0,004 \pm 0,001 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sendo fevereiro o mês de maior fluxo em B1 e B2 em maio, não tiveram diferença estatística significativa B1 e B2 ( $p > 0,05$ ) (Tabela 1). Sendo que apenas em fevereiro foi observada diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os outros sítios estudados (Tabela 1). O sítio com maior média foi B1 com  $1,747 \pm 1,377 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , associado a Eh -93,75 mV ou ambiente redutor, pH ácido e alto conteúdo da MO, ( $p < 0,05$ , Tabela 3) condições para emissões de CH<sub>4</sub> (HEYER; BERGER, 2000).

Segundo Hirota *et al.* (2007) variáveis como pH não apresentam correlação significativa com a produção de GEE, por ser uma variável que muda numa escala em curto tempo (diurno) por fatores bióticos e ambientais. Neste caso foi observada significativa influencia com a umidade do solo ( $R^2 = 0,70$ ;  $p = 0,001$ ), e com pH ligeiramente ácido (Tabela 3), ( $R^2 = -0,56$ ;  $p = 0,003$ ) e com a salinidade média no solo de 12,69% e ( $R^2 = 0,75$ ;  $p = 0,001$ ).

Os FCO<sub>2</sub> da zona A1 com  $4,226 \pm 0,729 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , a zona A2 foi de  $11,491 \pm 1,852 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sendo o mês de julho de maior fluxo em A1 e fevereiro em A2 com diferença estatística significativa entre A1 e A2 respectivamente ( $p < 0,05$ ). A zona B1 com  $4,739 \pm 0,662 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e B2 com  $4,987 \pm 0,549 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sendo marco de maior fluxo em B1 e fevereiro em B2, e diferença estatística significativa entre B1 e B2 ( $p < 0,05$ ) (Tabela 1).

Não foram encontradas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre os FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> entre os sítios (Tabela 1). Os solos oxidados neste caso Eh de 240,0 mV, mostraram ótimas condições aeróbicos e com possibilidade de excelente atividade microbiana (Tabela 3), sendo este importante fator para as emissões de CO<sub>2</sub> (CHAUHAN *et al.*, 2015), já que possuem alta difusividade superfície-atmosfera, (RISK; KELLMAN; BELTRAMI, 2008). Portanto, sítios mais baixos B1 e B2, quando a preamar satura de água a porosidade do solo, causa a difusão dos gases (Tabela 2) favorecendo o fluxo de gás à medida que os poros estão sendo saturados com o aumento do nível de água no solo.

Tabla 2- Médias mensais, sazonal e pelo gradiente topográfico, alto (A1, A2), e baixo (B1, B2) dos fluxos de metano (FCH<sub>4</sub>)  $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e os fluxos de dióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>)  $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Médias  $\pm$  erro padrão, n=48). Médias com letra maiúscula em comum não diferem significativas entre gradiente, ( $p > 0,05$ ).

Época	Mês	FCH <sub>4</sub>		FCO <sub>2</sub>	
		Alto	Baixo	Alto	Baixo
Seca	Jul-17	$0,001 \pm 0,0004^A$	$0,029 \pm 0,018^A$	$6,697 \pm 1,716^A$	$2,995 \pm 0,493^B$
	Ago	$0,005 \pm 0,002^A$	$0,874 \pm 0,702^A$	$9,053 \pm 2,650^A$	$6,384 \pm 1,428^A$
	Set	$0,008 \pm 0,006^A$	$0,374 \pm 0,219^A$	$5,225 \pm 1,135^A$	$5,969 \pm 1,534^A$
	Out	$0,1968 \pm 0,130^A$	$0,037 \pm 0,284^A$	$14,077 \pm 4,695^A$	$4,785 \pm 0,711^A$
	Nov	$0,002 \pm 0,002^A$	$0,022 \pm 0,565^A$	$3,299 \pm 0,587^A$	$3,565 \pm 0,472^A$
	Dez	$0,023 \pm 0,019^A$	$0,674 \pm 0,666^A$	$8,795 \pm 2,053^A$	$4,703 \pm 1,183^A$
	Média	$0,039 \pm 0,023^{Ax}$	$0,034 \pm 0,144^{Ax}$	$7,858 \pm 1,057^{Ax}$	$4,734 \pm 0,439^{By}$
Chuvosa	Jun-18	$0,072 \pm 0,0518^A$	$0,213 \pm 0,209^A$	$10,166 \pm 1,555^A$	$4,036 \pm 1,026^B$
	Fev	$0,003 \pm 0,0016^A$	$0,127 \pm 0,118^A$	$8,513 \pm 2,672^A$	$12,461 \pm 3,40^A$
	Mar	$0,001 \pm 0,0007^A$	$0,174 \pm 0,161^A$	$11,506 \pm ,515^A$	$6,02 \pm 1,207^A$
	Abr	$0,000 \pm 0,0000^A$	$-0,000 \pm 0,006^A$	$4,147 \pm 0,653^A$	$3,990 \pm 0,731^A$
	Mai	$-0,000 \pm 0,0002^A$	$0,139 \pm 0,071^A$	$7,648 \pm 1,064^A$	$0,007 \pm 0,002^A$
	Jun	$0,000 \pm 0,0008^A$	$0,1210 \pm 0,057^{AB}$	$5,301 \pm 1,176^A$	$7,622 \pm 2,505^A$
	Média	$0,014 \pm 0,009^{Ax}$	$0,129 \pm 0,054^{Ay}$	$7,9160 \pm 0,8083^{Ax}$	$6,2068 \pm 0,895^{Ax}$

Fonte: Autor.



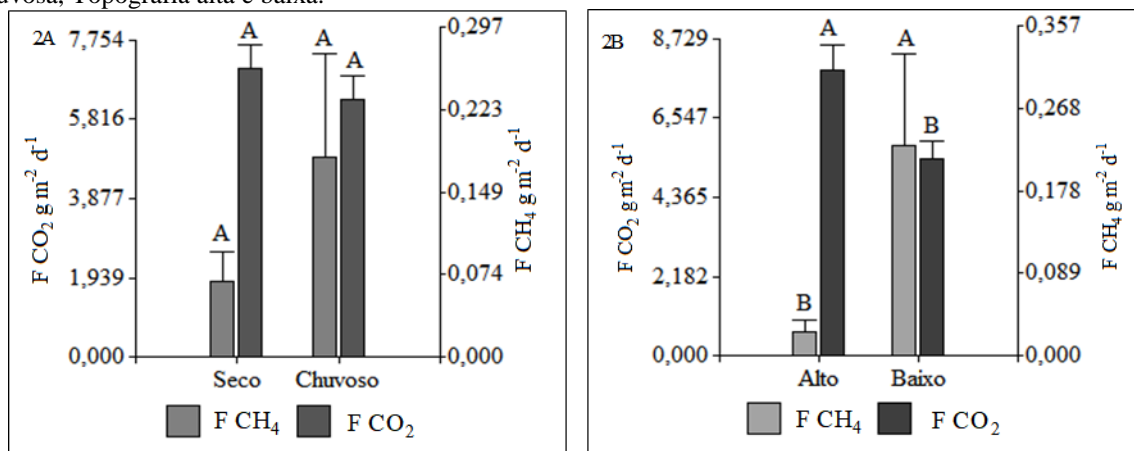
A temperatura do ar apresentou média entre as épocas seca e chuvosa de 33,04 e 30,77 °C, respectivamente (Tabela 3). Estudos indicam que quando a temperatura oscila entre 30 e 40 °C favorecendo as emissões de CH<sub>4</sub> (JEAN; PIERRE;ROGER, 2010). A maior umidade relativa do ar da época seca foi de 61,05%, e na época chuvosa foi de 68,64% (Tabela 3), sendo que para esta época o FCH<sub>4</sub> registrou os maiores fluxos em comparação a FCO<sub>2</sub>. A média da velocidade do vento da época chuvosa foi de 0,394 m s<sup>-1</sup> e na época seca foi de 0,691 m s<sup>-1</sup> (Tabela 3). Todas as variáveis apresentaram diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) entre os períodos climáticos, sendo que nenhuma das variáveis microclimáticas se correlacionou significativamente com os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. A temperatura do solo (Ts, °C) foi significativamente menor que Tar ( $p < 0,05$ ), diferentemente de registrado por outros autores (DUTTA *et al.*, 2013; WANG, 2015).

#### 4.3.4 Fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na sazonalidade

O FCH<sub>4</sub> foi maior na época chuvosa com  $0,187 \pm 0,098 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , quando comparado ao período seco de  $0,071 \pm 0,027 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Tendo variação nos fluxos, mas não mostraram significância estatística ( $p > 0,05$ ) entre as estações (Figura 2A). A topografia baixa teve um FCH<sub>4</sub> de  $0,236 \pm 0,104 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e a alta e fluxo foi de  $0,027 \pm 0,012 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  mostrando variação estatística significativa ( $p > 0,05$ ) (Figura 2B), a qual pode estar relacionada ao acúmulo de MO e baixa oxidação amostrando produção de FCH<sub>4</sub>.

O FCO<sub>2</sub> foi maior na época seca com  $7,054 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1} \pm 0,603 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , quando comparado ao período e chuvosa de  $6,360 \pm 0,579$  não mostraram significância estatística ( $p < 0,05$ ) entre as estações (Figura 2A). O maior FCO<sub>2</sub> foi na época seca relacionada ao acúmulo maior de matéria orgânica um ambiente oxidado e boa aeração no solo, e as marés, que tem participação direta na umidade de solo, sem causar alagamento favorecendo os microrganismos para um bom metabolismo da MO e para a respiração dos micro-organismos. (Tabela 3).

Figura 2- Fluxos de metano ( $F_{CH_4}$ )  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$  e fluxos de dióxido de carbono ( $F_{CO_2}$ )  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ , por épocas climáticas (seca e chuvosa) (Figura 2A), (Figura 2B) apresenta a topografia alta e baixa. As barras mostram as médias anuais e erro padrão. Letras maiúsculas diferentes apresentam a significância entre época seca e chuvosa, Topografia alta e baixa.



Fonte: Autor.

As variáveis do solo apresentaram diferença estatisticamente significativa entre épocas climáticas ( $p < 0,05$  Tabela 3). Nenhuma apresentou correlação significativa ( $p < 0,05$ ) com  $F_{CH_4}$  ou  $F_{CO_2}$ , ao contrário do que foi observado por outros autores (CHEN; TAM; YE, 2012).

Em relação à topografia alta e baixa as variáveis que apresentaram significância neste estudo em ( $p < 0,05$ ), são amostradas com asteriscos na Tabela 3.

Tabla 3- Variação espacial e sazonal das variáveis de solo e ambientais (Media, n=48 em Ts, n=16 outras variáveis de solo, ambientais seca n=40 e chuvosa n=48) dos sítios estudados, Letras minúsculas diferentes representam significância entre as médias de distribuição normal (LSD,  $p < 0,05$ ) entre sítios, e letras maiúsculas entre cada sítio e época climática. As letras (X, Y) as médias totais por época climática, as letras n.d. não determinado As variáveis ambientais Tar: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; Ts: temperatura do solo Cm: carbono microbiano; Nm: nitrogênio microbiano; pH; Sal: Salinidade; Cot: carbono total; Not: nitrogênio total; C:N; carbono nitrogênio; MO: matéria orgânica; Us: umidade de solo. Os (\*) apresentaram a significância da topografia alta e baixa e a relação das variáveis

Variáveis Ambientais		Físico Químicas de Solo													
Epoca	Sítio	T ar °C	Ur %	Vv m/s	Ts °C	Us %	Cm g/kg	Nm g/kg	pH	Eh mV	Sal %	Cot g/kg	Not g/kg	M.O	C:N
Seca	A1	32,54	63,41	0,61	27,10	89,53	0,0002	0,0035	5,30	83,00	35,75	19,94	1,57	34,38	12,71
	A2	33,57	56,30	0,69	23,72	56,61	0,0002	0,022	5,75	297,50	n.d.	8,30	1,28	14,31	6,49
	B1	31,97	65,55	0,71	23,00	94,42	0,0003	0,0132	5,60	-13,00	31,50	29,88	1,58	51,53	18,94
	B2	34,36	58,78	0,73	28,68	79,31	0,0002	0,0076	4,90	225,75	28,75	23,00	1,53	39,65	15,02
Chuvosa	A1	29,66	70,24	0,28	27,68	96,69	0,0006	0,0014	3,79	-55,75	8,75	17,99	1,40	31,03	12,87
	A2	30,98	70,87	0,21	27,34	81,02	0,0008	0,0001	5,94	240,75	6,25	4,91	1,24	8,48	3,96
	B1	31,56	66,63	0,53	27,39	97,93	0,0008	0,0017	4,08	-93,75	10,00	15,49	1,29	26,71	11,96
	B2	30,86	66,78	0,54	28,20	98,22	0,0004	0,0008	4,63	166,25	6,25	21,05	1,62	36,30	12,96
Seca	$\bar{X}$	33,04 <sup>Y</sup>	51,01 <sup>X</sup>	0,69 <sup>Y</sup>	25,42 <sup>X</sup>	79,97 <sup>X</sup>	0,0002 <sup>X</sup>	0,0116 <sup>Y</sup>	5,39 <sup>Y</sup>	148,31 <sup>X</sup>	24,00 <sup>Y</sup>	20,28 <sup>Y</sup>	1,39 <sup>X</sup>	13,29 <sup>X</sup>	34,97 <sup>Y</sup>
Chuvoso	$\bar{X}$	30,77 <sup>X</sup>	68,64 <sup>Y</sup>	0,39 <sup>X</sup>	27,65 <sup>Y</sup>	93,46 <sup>Y</sup>	0,0007 <sup>Y</sup>	0,0010 <sup>X</sup>	4,62 <sup>X</sup>	64,38 <sup>X</sup>	7,81 <sup>X</sup>	14,86 <sup>X</sup>	1,49 <sup>Y</sup>	10,44 <sup>X</sup>	25,63 <sup>X</sup>
Topografia	Alto	31,69	65,21	0,45*	26,46	80,96	0,0005	0,0068	5,20	141,38	12,69	12,79*	1,37*	22,05*	9,01*
	Baixo	32,19	64,44	0,63**	26,82	92,47	0,0004	0,0058	4,80	71,31	19,13	22,36**	1,51**	38,55**	14,72**

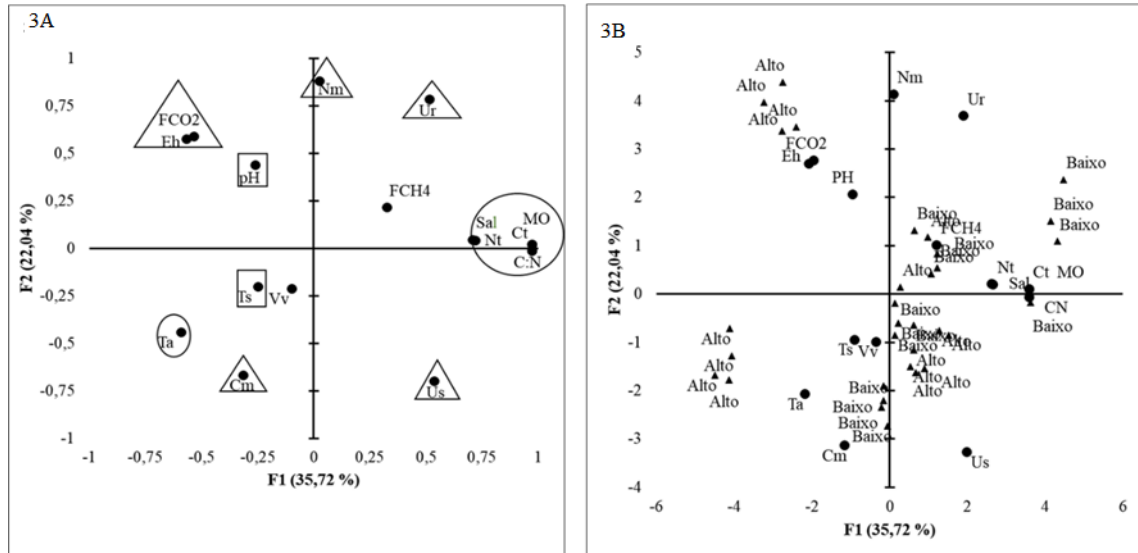
Fonte: Autor.

A análise de componentes principais (ACP) das variáveis ambientais e Físico-químicas do solo, auxiliou na interpretação da variabilidade conjunta total dos dados de 57,76 % em cinco principais componentes, onde 58,52% são apresentadas pelas duas primeiras componentes. A primeira explicou 34,19%, segunda 24,33%, apresentando aqui apenas duas dimensões (Figura 3A), as cargas fatoriais de cada variável são apresentadas na (Tabela 4).

As variáveis do solo que representam a maior correlação positiva são mostradas pelos círculos na dimensão 1, sendo a Salinidade (Sal), matéria orgânica (MO), carbono total (Cot), nitrogênio total (Not) e negativa temperatura de solo (Ts). Estes parâmetros também mostram uma associação negativa com a temperatura do ar (Tar). A dimensão 2 (triângulo), a Umidade relativa (Ur), nitrogênio microbiano (Nm) mostraram uma correlação inversa com o carbono microbiano (Cm) e a umidade do solo (Us). Na terceira dimensão (quadrado), o pH, no quadrante positivo, mostrou uma relação inversa com a temperatura do solo (Ts) a qual está no quadrante negativo (Figura 3A).

Foi realizada uma análise entre variáveis e topografia da área de estudo (gráfico biplot) (Figura 3B). O principal resultado nesta análise indicou que os  $\text{FCO}_2$  (Figura 3B Tabela 4) estão associados ao gradiente topográfico alto, enquanto que, e os  $\text{FCH}_4$  estão associados com a topografia baixa. Neste gradiente os  $\text{FCO}_2$  mostraram uma associação positiva com o Eh, indicando que quanto maior Eh maiores podem ser os  $\text{FCO}_2$  nesta topografia.

Figura 3- Análise de componentes principais (ACP) das variáveis do solo. (3A) indica as principais variáveis. Os círculos indicam as variáveis localizadas na primeira componente. Os triângulos indicam as variáveis da segunda componente, e os quadrados as variáveis na terceira componente. (3B), indicam a análise de componentes principais (ACP) associada com a topografia do solo (gráfico biplot). FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; Tar: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; Ts: temperatura do solo Cm: carbono microbiano; Nm: nitrogênio microbiano; pH; Eh; potencial redox; Sal: Salinidade; Cot: carbono total; Not: nitrogênio total; C:N; carbono nitrogênio; MO: matéria orgânica; Us: umidade de solo.



Fonte: Autor.

Tabla 4 - Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados de solo. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2, F3, F4 e F5) na PCA. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. Tar: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; Ts: temperatura do solo Cm: carbono microbiano; Nm: nitrogênio microbiano; pH: potencial de hidrogênio; Eh: potencial redox; Sal: Salinidade; Ct: carbono total; Nt: nitrogênio total; C:N; carbono nitrogênio; MO: matéria orgânica; Us: umidade de solo.

Variáveis	F1	F2	F3	F4	F5
CH <sub>4</sub>	0,327	0,215	-0,267	0,468	<b>0,655</b>
CO <sub>2</sub>	-0,532	<b>0,589</b>	-0,048	-0,022	-0,006
Ta	<b>-0,591</b>	-0,440	0,466	-0,101	0,04
Ur	0,515	<b>0,785</b>	-0,191	-0,013	0,018
Vv	-0,096	-0,211	0,506	<b>0,659</b>	-0,354
Ts	-0,247	-0,202	<b>-0,621</b>	-0,342	0,500
Cm	-0,314	<b>-0,667</b>	-0,395	0,104	0,284
Nm	0,026	<b>0,880</b>	-0,245	0,052	-0,015
pH	-0,261	0,440	<b>0,470</b>	0,405	0,179
Eh	-0,565	<b>0,575</b>	0,415	-0,120	0,164
Sal	<b>0,709</b>	0,046	0,483	0,263	0,007
Ct	<b>0,974</b>	0,021	0,153	-0,113	0,026
Nt	<b>0,721</b>	0,042	0,420	-0,215	-0,014
CN	<b>0,972</b>	-0,013	0,037	-0,088	0,010
MO	<b>0,974</b>	0,021	0,153	-0,113	0,026
Us	0,536	<b>-0,698</b>	-0,191	0,196	0,113

Fonte: Autor

#### 4.3.5 Emissões dos fluxos de metano a CO<sub>2</sub> equivalente

Com base no potencial do aquecimento global os FCH<sub>4</sub> são expressos como emissões de (CO<sub>2</sub>-eq), mostraram que no gradiente topográfico representa 44% da zona alta (A1e A2) e a baixa (B1 e B2) 56%, enquanto que a época chuvosa apresenta um 54,95% e a seca 45,05% (CO<sub>2</sub>-eq) das emissões totais de (CO<sub>2</sub>-eq), resultando em 35,09 Gt CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tabela 5).

Tabla 5- Emissões CH<sub>4</sub> (%) expressadas como carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq) e a contribuição das Giga toneladas por hectare por ano por cada sítio.

Sitio	CO <sub>2</sub> -eq g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>		% de Emissões CH <sub>4</sub>		Gt CO <sub>2</sub> ha ano <sup>-1</sup>	
	Seco	Chuvosa	Seco	Chuvosa	Seco	Chuvosa
A1	5,98	4,69	9,6	9,82	21,84	17,11
B1	8,41	19,81	61,02	77,38	30,71	72,30
A2	10,09	12,82	1,07	10,4	36,81	46,81
B2	10,04	5,07	3,16	1,68	36,64	18,52
Media	8,63	10,60	18,71	24,82	31,50	38,68

Fonte: Autor

É difícil comparar as emissões resultantes deste estudo com outros manguezais de características similares. Estudos anteriores citam a classificação de três categorias (impactadas, não impactadas é arbitrária), com níveis de impacto baseados em nutrientes dos sedimentos no solo. As emissões de CH<sub>4</sub> de manguezais que foram classificados como não impactados variaram em uma magnitude no CH<sub>4</sub> de 3,0 a 17370,0 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (ALLEN *et al.*, 2007) e para o CO<sub>2</sub> de 24,7 a 904,6 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (NÓBREGA *et al.*, 2016).

Os resultados na ilha da Macaca mostram este sítio é classificado como não impactado (Tabela 6).

Tabela 6- Emissões de CH<sub>4</sub> (μmol m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) e CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) em florestas de mangal durante os períodos de emersão.

Clima	Precipitação	T ar	Fluxo CH <sub>4</sub>	Fluxo CO <sub>2</sub>	Referencia
	mm ano <sup>-1</sup>	Media	μg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	mg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	
Equatorial	2661	20-28	-15,3	-58,96	Chen et al. (2014)
Temperatura	719	19	25,1	45,6	Livesley e Adrusiak (2012)
Subtropical monson	2383	23,1	96,5-269,8	20,2-74,4	Chen et al. (2011)
Subtropical monson	1927	22	190,6-4390,9	24,6-904,6	Chen et al. (2012)
Umidade Tropical	1100	28-31	7-233	70-160	Kristensen et al. (2008b)
Subtropical	1146	20,4	3,0-17370,0	n.d.	Allen et al. (2007)
Subtropical	1155	15-24	20-350	n.d.	Kreuzwieser et al. (2003)
Subtropical monson	108	23,6	n.d.	30,36-96,8	Alongi et al. (2001)
Tropical amazônico	3172	30-33	2,96-7,81	262,31-293,9	<b>Este Estudo (2019)</b>

Fonte: Nóbrega *et al.*, (2016).

#### 4.4 Conclusão

A distribuição espacial das zonas estudadas mostrou que os  $\text{FH}_4$  e  $\text{CO}_2$  foram influenciados pelo gradiente topográfico, um baixo acúmulo de matéria orgânica e elevado carbono microbiano, produto dado pelos processos de decomposição da biomassa, processos biológicos dos microrganismos, respiração e proliferação dos mesmos.

Os Processos físicos e químicos dos sedimentos da floresta de mangue, precipitações bem definidas das épocas climáticas, chuvosa e seca, dinâmica das marés preamar e entrada de água salubre do mar, e baixa mar e entrada de água doce do rio Mojuim durante os mares de sizígia tiveram influência na dinâmica dos  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  entre as épocas seca e chuvosa respectivamente.

A dinâmica dos fluxos provavelmente está influenciada pelas alterações antrópicas das atividades agropecuárias e acúmulo de sedimentos, que são drenados para o rio Mojuim. Os sedimentos poderiam estar relacionados com a Eh do solo, mostrados na ACP, o que indica que este parâmetro tem um papel fundamental para diferenciar os fluxos de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  estudados pelos gradientes topográficos alto e baixo.

Devido à variação dos  $\text{FCH}_4$  e  $\text{FCO}_2$  das quatro zonas estudadas, é necessário que pesquisas futuras sejam realizadas em horários de 24 horas, e marés de sizígia para que ajudem a identificar uma maior magnitude os fluxos e a dinâmica dos GEE para compreender especificamente a complexidade deste tipo de ecossistema em relação a fluxos de GEE.

#### Agradecimentos

Ao Programa de alianças para Educação e a Capacitação da Organização dos Estados Americanos e o Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (PAEC-OEA-GCUB). Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (UFPA-PPGCA). Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Paulo Sarmento, Lucivaldo da Silva e MSc. Maridalva Ribeiro pela colaboração nos trabalhos de campo.

#### Referências

ABICHOU, T. *et al.* Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. **Waste Management**, v. 26, n. 11, p. 1305–1312, 2006.



ALLEN, D. *et al.* Seasonal variation in nitrous oxide and methane emissions from subtropical estuary and coastal mangrove sediments, Australia. **Plant biology (Stuttgart, Germany)**, v. 13, n. 1, p. 126–33, jan. 2011.

ALLEN, D. E. *et al.* Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 622–631, 1 fev. 2007.

BARNES, J. *et al.* Tidal dynamics and rainfall control N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a pristine mangrove creek. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 15, p. 4–9, 2006.

BORGES, A. V.; ABRIL, G. Carbon dioxide and methane dynamics in estuaries. **Liège Belgium: Elsevier Inc.**, v 5, p. 119-161, 2011

BORN, M.; DORR, H.; LEVIN, I. Methane consumption in aerated soil of the temperate zona. **Tellus**, v. 42B, p. 2–8, 1990.

BOUILLON, S. *et al.* Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 22, n. 2, p. 1–12, 2008.

BREITHAUPT, J. L. *et al.* Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, n. 3, p. 1–11, 2012.

BRASIL. Marinha do Brasil. centro de Hidrografia da Marinha. **Tábuas de maré**. Disponível em : <https://www.marinha.mil.br> 2018. Acesso em 10 de maio 2018c

CHAUHAN, R. *et al.* Factors influencing spatial-temporal variation of methane and nitrous oxide emission from a tropical mangrove of eastern coast of India. **Atmospheric Environment**, v. 107, p. 95–106, 2015.

CHEN-TUNG, A. C.; BORGES, ALBERTO V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO<sub>2</sub>. **Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 56, n. 8–10, p. 578–590, 2009.

CHEN, G. C.; TAM, N. F. Y.; YE, Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 48, p. 175–181, 2012.

CORRALES, L. C. *et al.* Bacterias anaerobias: Procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. **Nova**, v. 13 (23), p. 0–2, 2015.

DALAL, R. C. *et al.* Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes. **Plant and Soil**, v. 309, n. 1–2, p. 43–76, 2008.

DAVIDSON, E. A. *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazônia. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 53–69, 2000.

DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E. Gas diffusivity and production of CO<sub>2</sub> in deep soils of the eastern Amazon. **Tellus B**, v. 47, n. 5, p. 550–565, 1995.

DE CARVALHO, E. A.; JARDIM, M. A. G. Composição e estrutura florística em bosques de manguezais Paraenses, Brasil. **Ciencia Florestal**, v. 27, n. 3, p. 923–930, 31 ago. 2017.

DENMAN, K. *et al.* Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007. **IPCC**, v. 7, 2007.

DONATO, D. C. *et al.* Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature Geosciences**, v. 4, n. 5, p. 293–297, 2011.

DORR, H.; KATRUFF, L.; LEVINN, I. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils. **Chemosphere**, v. 26, p. 697–713, 1993.

DUARTE, C. M. *et al.* The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 11, p. 961–968, 2013.

DUTTA, M. K. *et al.* Dynamics and exchange fluxes of methane in the estuarine mangrove environment of the Sundarbans, NE coast of India. **Atmospheric Environment**, v. 77, p. 631–639, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de análises de solo**. 3 ed. Brasília, DF: 2017. 574p.

FRIESEN, S. D.; DUNN, C.; FREEMAN, C. Decomposition as a regulator of carbon accretion in mangroves: a review. **Ecological Engineering**, v. 114, p. 173–178, 2018.

GIRI, C. *et al.* Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 154–159, 2011.

HAMILTON, S. E.; CASEY, D. Creation of a high spatial-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). **Global Ecology and Biogeography**, v. 25, n. 6, p. 729–738, 2016.

HEYER, J.; BERGER, U. Methane emission from the coastal area in the Southern Baltic Sea. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 51, n. 1, p. 13–30, 2000.

HIROTA, M. *et al.* Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan. **Chemosphere**, v. 68, n. 3, p. 597–603, 2007.

HUTCHINSON, G. L.; LIVINGSTON, G. P. Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. **European Journal of Soil Science**, v. 52, n. 4, p. 675–682, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **2001. Observed climate variability and change.** Contribution of working group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York, NY, USA, Cambridge: United Kingdom, 2001. 881p.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998.

JACOTOT, A.; MARCHAND, C.; ALLENBACH, M. Tidal variability of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the water column within a Rhizophora mangrove forest (New Caledonia). **Science of the Total Environment**, v. 631–632, p. 334–340, 2018.

JEAN, M.; PIERRE; ROGER. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. **European Journal of Soil Biology**, v. 37, n. 2001, p. 25–50, 2010.

KAUFFMAN, J. B.; DONATO, D. C.; ADAME, M. F. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. v. 117, p. 117, 2013.

KELLER, M. *et al.* Soil-atmosphere nitrogen oxide fluxes: Class Duration of Installation (Days) permanent. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 17,693-17,698, 2000.

KOTROCZÓ, Z. *et al.* Influence of temperature and organic matter content on soil respiration in a deciduous oak forest. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 3, p. 303–310, 2014.

LARUELLE, G. G. *et al.* Evaluation of sinks and sources of CO in the global coastal ocean using a spatially explicit typology of estuaries and continental shelves. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 15, p. 1–6, 2010.

LORENZO ACOSTA YANIRIS, O. A. M. C. La Digestión Anaeróbica. Aspectos teóricos. Parte I Sobre los Derivados de la caña de azúcar. **Icidca**, v. 1, p. 35–48, 2005.

MAHER, D. T. *et al.* Beyond burial: Lateral exchange is a significant atmospheric carbon sink in mangrove forests. **Biology Letters**, v. 14, n. 7, 2018.

MATOS, S.; MENDONÇA, E. DE S. **Matéria Orgânica do Solo, Métodos de Análises.** 1. ed. Viçosa - MG. 2005. 81p

MIDDELBURG, J. J. *et al.* Methane distribution in European tidal estuaries. **Biogeochemistry**, v. 59, p. 95–119, 2002.

NAKANO, T. *et al.* A comparison of regression methods for estimating soil – atmosphere diffusion gas fluxes by a closed-chamber technique. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 36, p. 107–113, 2004.

NOAA. Trend in Atmospheric Carbon Dioxide. **Earth System research Laboratory**, p. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.h>, 2018.

NÓBREGA, G. N. *et al.* Edaphic factors controlling summer (rainy season) greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) from semiarid mangrove soils (NE-Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 685–693, 2016.

POLIDORO, B. A. *et al.* The loss of species: Mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. **Plos One**, v. 5, n. 4, 2010.

PURVAJA, R.; RAMESH, R. Natural and anthropogenic methane emission from coastal wetlands of South India. **Environmental Management**, v. 27, n. 4, p. 547–557, 2001.

QUÉRÉ, C. LE *et al.* Global Carbon Budget 2015. **Earth System Science Data**, v. 7, n. 2, p. 349–396, 2015.

REGNIER, P. *et al.* Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. **Nature Geoscience**, v. 6, n. 8, p. 597–607, 2013.

RISK, D.; KELLMAN, L.; BELTRAMI, H. A new method for in situ soil gas diffusivity measurement and applications in the monitoring of subsurface CO<sub>2</sub> production. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 113, n. 2, p. 1–9, 2008.

ROSENTRETER, J. A. *et al.* Factors controlling seasonal CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions in three tropical mangrove-dominated estuaries in Australia. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 215, n. July, p. 69–82, 2018.

SHINDELL, D. T. *et al.* Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. **Science**, v. 326, p. 716–718, 2009.

SILVA, S. B. E. **Análise de solo para ciências agrárias**. 2.ed. Belém do Pará. 2018.174p.

SOTOMAYOR, D.; CORREDOR E, J.; MORELL, J. M. Methane Flux From Mangrove Sediments Along the Southwestern Coast of Puerto Rico. **Estuaries Research Federation**, v. 17, n. 1, p. 140–147, 1994.

SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 427–435, dez. 2005.

SPALDING, M.; BLASCO, F.; FIELD, C. World mangrove atlas. **The International Society for Mangrove Ecosystems (ISME)**, v. 14, n. 5, p. 778, 1997.

STOCKER, T.F., D. *et al.* **Climate change 2013: the physical science basis**. Working group contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge; United Kingdom; New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013. v. 1, 1535p

SUNDQVIST, E. *et al.* Short-term effects of thinning, clear-cutting and stump harvesting on methane exchange in a boreal forest. **Biogeosciences**, v. 11, n. 21, p. 6095–6105, 12 nov. 2014.

UPSTILL-GODDARD, R. C. *et al.* Methane in the southern North Sea: Low-salinity inputs, estuarine removal, and atmospheric flux. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 4, p. 1205–1217, 2000.

VALENTINI, R. *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. **Nature**, v. 404, n. 6780, p. 861–865, 2000.

VERCHOT, L. V *et al.* Land-use change and biogeochemical controls of methane fluxes in soils of eastern Amazônia. **Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 41–56, 2000.

WALKLEY, A.; BLACK, A. I. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1939.

WANG, J. *et al.* Amazon boundary layer aerosol concentration sustained by vertical transport during rainfall. **Nature**, v. 539, n. 7629, p. 416–419, 2016.

WANG, L. Modeling and Analysis of Dynamic Response of Servo Feed System under Low Frequency Excitation. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 51, n. 3, p. 80, 2015.

## CAPITULO 5 VARIACÃO ESPACIAL E SAZONAL DOS FLUXOS DE CH<sub>4</sub> E CO<sub>2</sub> COM VARIÁVEIS FÍSICO QUÍMICAS DA ÁGUA, EM UM ESTUÁRIO AMAZÔNICO.

### Resumo

As variações dos fluxos dos gases de Metano (FCH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) foram medidas na interface água-atmosfera no estuário Mojuim da reserva Extrativista marinha Mocapajuba no município de São Caetano de Odivelas Pará, na região norte do Brasil. Foram quantificadas espacial e sazonal além dos fluxos as variações dos fatores ambientais e físico-químicos da água, em três zonas do estuário: 1) Rio Mojuim, 2) Furo e 3) Canal de Maré; cada um com dois pontos de amostragem em campanhas de 10 horas diárias uma vez por mês, de julho até dezembro de 2017, época seca, e de janeiro até junho de 2018, época chuvosa. Os valores médios mensais dos FCH<sub>4</sub> no rio foi maior no mês de junho com 7,1 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> com menor fluxo em setembro de 5,6 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, no furo e maior fluxo foi em junho com 5,1 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e o menor em setembro com 3,8 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, sendo que o canal registro e maior fluxo em fevereiro com 19,4 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> comparado com os outros meses anteriores. Os valor médios mensais dos FCO<sub>2</sub> no rio foi maior no mês de janeiro com 1031,1 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> com menor fluxo em outubro com 782,8 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, no furo e maior fluxo foi em abril com 1111,3 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e o menor em maio com 695,5 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, sendo que o canal registro o maior fluxo em janeiro com 1973,9 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> sendo fevereiro o menor fluxo de 1007,9 m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Sazonalmente, o período seco registrou o menor FCH<sub>4</sub> de 2,452 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> em relação ao chuvoso com FCH<sub>4</sub> de 3,154 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Os FCO<sub>2</sub> foram maiores na época chuvosa de 658,75 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, que o período seco 227,445 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> respectivamente, resultando um fluxo de 368,3 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente para a atmosfera. Os resultados das emissões dos gases no sistema aquático evidenciaram que estes são um importante integrante do ciclo do carbono, ao relacionar com o comportamento hidrológico sazonal, característico da região amazônica. As emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na interface água-atmosfera desta pesquisa se encontram dentro dos valores médios observados em outros estudos; por isso, recomenda-se serem levados em consideração estes valores para futuros estudos nas emissões carbono nos estuários.

Palavras-chave: Fluxo de metano. Fluxo de dióxido de carbono. Mangue. Solo. Água. Amazônia.

## Abstract

Methane (FCH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (FCO<sub>2</sub>) gas fluxes variations were measured at the water-atmosphere interface in the Mojuim estuary of the Mocapajuba marine extractive reserve in the municipality of São Caetano de Odivelas Pará, in northern Brazil. Spatial and seasonal variations in environmental and physicochemical factors of water were quantified in three estuary zones: 1) Mojuim River, 2) Stream and 3) Tidal Channel; each with two sampling points in 10-hour daily campaigns each month, from July to December 2017 dry season, and from January to June 2018 rainy season. The monthly mean values of FCH<sub>4</sub> in the river was higher in June with 7.1 mmol m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> with the lowest flow in September of 5.6 mmol m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> in the bore and greater flux was in June with 5.1 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, and the lowest in september with 3.8 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> the record channel and the highest flow in February with 19.4 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> compared to the previous months. The average monthly values of FCO<sub>2</sub> in the river was higher in January with 1031.1 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> with lower flow in October with 782.8 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, in the bore and the highest flow was in April with 1111.3 mmol m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>and the lowest in May with 695.5 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, the channel having the highest flow in January with 1973.9 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> with February being the lowest flow of 1007.9 m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Seasonally, the dry period registered the lowest FCH<sub>4</sub> of 2.452 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> in relation to the rainy season with FCH<sub>4</sub> of 3.154 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. The FCO<sub>2</sub> were higher in the rainy season of 658.75 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, than the dry period 227.445 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> respectively, resulting in a flow of 368.3 Gg of CO<sub>2</sub> equivalent to the atmosphere. The results of gas emissions in the aquatic system showed that they are an important part of the carbon cycle, when related to the seasonal hydrological behavior, characteristic of the Amazon region. The CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions at the water-atmosphere interface of this research are within the average values observed in other studies; therefore, it is recommended to take these values into account for future studies on carbon emissions in estuaries.

Keywords: Methane fluxes. Carbon dioxide fluxes. Mangrove. Soil. Water. Amazon.

## 5.1 Introdução

As florestas de mangue são ecossistemas dinâmicos que conectam o ciclo do carbono entre os compartimentos terrestre, fluvial, oceânico e atmosférico para uma ampla faixa latitude terrestre (ROSENTRETER *et al.*, 2018a) Estas áreas apresentam uma extensa rede de canais, canais e rios, interconectados por furos, sendo que os canais apresentam uma intermitência diária, regido pelo movimento das marés. A área estuarina do norte do Brasil abriga a maior costa de manguezais do mundo, atingindo 1200 km de extensão (SOUZA FILHO, 2005). São ecossistemas altamente produtivos, que armazenam quantidades globalmente significativas de carbono (carbono azul), com uma grande importância no ciclo biogeoquímico do carbono costeiro (KRAUSE-JENSEN *et al.*, 2018; MCLEOD *et al.*, 2011; NELLEMAN *et al.*, 2009). Atualmente, não existem medidas simultâneas do  $\text{FCO}_2$  e  $\text{FCH}_4$  em águas que circulam nos sistemas de manguezais no bioma amazônico.

A entrada de carbono nos manguezais provém de material orgânico terrestre, carbono orgânico e inorgânico trazidos pelos rios, aporte de água subterrânea rica em carbono inorgânico dissolvido, insumos de carbono vindos de zonas úmidas como restinga, floresta de mangues, e o proveniente dos oceanos (BAUER *et al.*, 2013; COLE *et al.*, 2007; CUI *et al.*, 2018; DITTMAR; LARA, 2001; LAGOMASINO *et al.*, 2015). Devido à alta turbidez, ambiente redutor e intensas mudanças na salinidade (devido à influência alternada do rio e do oceano), abundante aporte de material orgânico (folhas, galhos e troncos), e baixa exportação de carbono orgânico lábil, as águas estuarinas que banham os manguezais são fonte líquida de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  para a atmosfera (BORGES *et al.*, 2003). Contudo, quando falamos do ecossistema de mangue, estes são sumidouros de carbono naturais, retirando o  $\text{CO}_2$  da atmosfera e armazenando-o em sua biomassa por muitos anos (RAY; JANA, 2017). Ainda existem grandes incertezas de quais fatores iniciam e modelam o ciclo biogeoquímico do  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  em um estuário margeado por mangues, e encontra-se com poucas medições foram realizadas na costa norte do Brasil.

Apesar de poucas medições realizadas, a estimativa global revisada para a emissão de  $\text{CO}_2$  nos estuários entre as latitudes de 0 a 23,5° S é de  $52,1 \pm 16,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sendo 15% maior que as estimativas anteriores para esta região latitudinal (ROSENTRETER *et al.*, 2018b). Foi sugerido que a emissão de  $\text{CH}_4$  proveniente de águas de mangue e sedimentos expostos, pode compensar as taxas de sedimentação de carbono azul nos sedimentos de manguezais em até 20% (ROSENTRETER *et al.*, 2018c).



Recentes estimativas realizadas no estuário amazônico, para os fluxos de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  entre a atmosfera e a água, foram de  $174 \pm 129 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $855 \pm 406 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente (CALL *et al.*, 2019). Neste sentido ainda existem grandes incertezas sobre as emissões de  $\text{CO}_2$  e, principalmente,  $\text{CH}_4$  proveniente de águas em estuário com mangues, em especial no bioma amazônico.

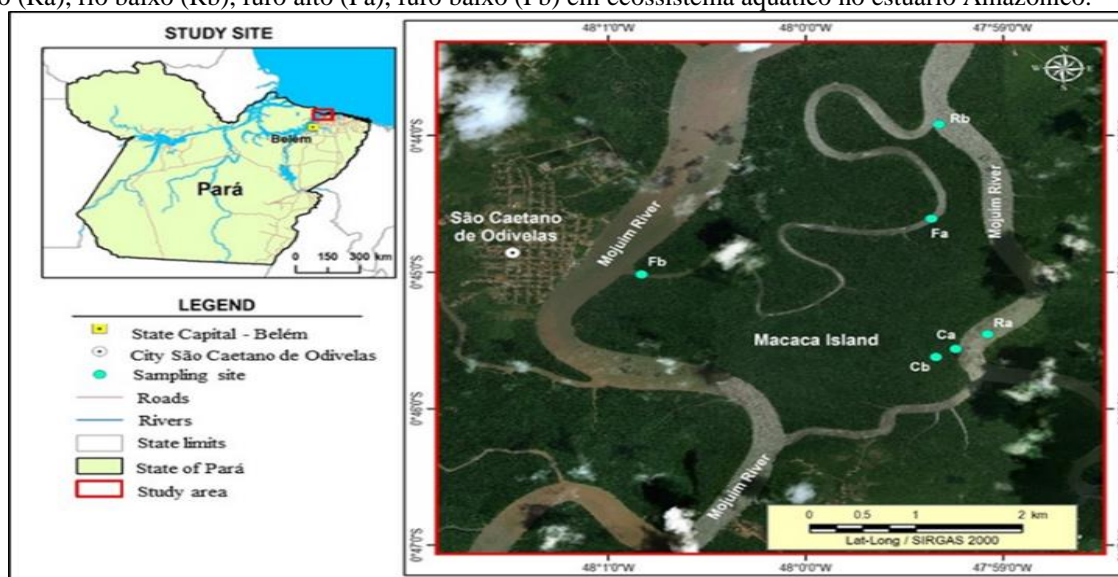
A espacialização de um experimento em um estuário Amazônico deve abranger áreas de canais, furos e rios, os quais têm diferentes larguras e conseqüente volume de água e regime hídrico. Neste trabalho objetiva-se avaliar o comportamento dos fluxos de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , bem como os parâmetros físico-químicos da água, em diferentes horas do dia (estação seca e chuvosa) e mensalmente (durante um ano), a fim de encontrar os fatores que controlam os fluxos de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  em um estuário amazônico dominado por floresta de mangue não antropizado.

## 5.2 Material e métodos

### 5.2.1 Área de estudo

A Área de estudo (Figura 1) está localizada no estuário Mojuim, dentro da Reserva Extrativista Marinha de Mocapajuba (21.029,00 ha), criada em 2014 no município de São Caetano de Odivelas (PA). Delimitada pelas latitudes:  $00^\circ 35' 00'' \text{ S}$ , e  $47^\circ 03' 45'' \text{ W}$ , e  $00^\circ 52' 30'' \text{ S}$  e  $48^\circ 05' 00'' \text{ W}$ .

Figura 1- Localização da área de estudo e locais de amostragens: Canal alto (Ca), canal baixo (Cb), rio alto (Ra), rio baixo (Rb), furo alto (Fa), furo baixo (Fb) em ecossistema aquático no estuário Amazônico.



Fonte: Autor.

O estuário faz parte da maior faixa de manguezal contínua do planeta (7.591 km<sup>2</sup>), equivalente a 56,6% dos manguezais do Brasil. O estado do Pará possui 2.176,78 km<sup>2</sup> denominada Costa de Manguezal de Macromaré da Amazônia (CMMA), influenciada pelo movimento das marés com um padrão semidiurno, com variações entre os 3,0 a 7,5 m (SOUZA FILHO, 2005). O clima é tropical úmido, típico equatorial amazônico, do tipo *Am* dado pela classificação de Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), com dois períodos sazonais: época chuvosa (janeiro a junho) e época seca (julho a dezembro) (BARROS; TORRES; FRÉDOU, 2011).

### 5.2.2 Dados climatológicos

Os dados climatológicos da série histórica (1981-2018), foram obtidos na estação meteorológica de observação de superfície automatizada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Soure (00°43'40,18" S, 48°30'56,86" W), a uma distância de 71,5 km noroeste da área de estudo. No período do estudo, os dados de precipitação pluviométrica foram coletados de uma estação automática localizada na margem do rio Mojuim em São Caetano de Odívelas.

### 5.2.3 Desenho experimental e analítico

A área de amostragem foi dividida em três sítios e seis zonas (Figura 1) descritas no texto por abreviação. Sítio 1) Rio Mojuim com 0,390 km de largura média e 6,5 km de comprimento: a) Rio alto (Ra) latitude -0,757615 e longitude -47,984604, b) Rio baixo (Rb) latitude -0,731971 e longitude -47,988690. Sítio 2) Furo com 0,078 km de largura média e 9,5 km de comprimento: a) Furo alto (Fa) latitude -0,743513 e longitude -47,989351, b) Furo baixo (Fb) latitude -0,750322 e longitude -48,013863. Sítio 3) Canal de maré com 0,017 km de largura média e 0,26 km de comprimento: a) Canal alto (Ca) latitude -0,759425 e longitude -47,987317, b) Canal baixo (Cb) latitude -0,760380 e longitude -47,988967.

Para as medições dos FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> foram realizados dois experimentos distintos: o primeiro constituiu de uma amostragem intensiva durante um dia na estação seca (novembro 2017) e outro na estação chuvosa (março 2018), analisando o fluxo a cada hora (maré vazante e maré enchente) em uma maré morta (lua crescente) entre as 9h:00min até 15h:00min nas duas épocas climáticas. Neste primeiro experimento os fluxos foram determinados simultaneamente no rio (Rb) e no canal (Cb) (Figura 1).

O segundo experimento registrou mensalmente o fluxo dos gases, na maré morta, em três locais distintos: Rio (Ra; Rb), Furo (Fa; Fb) e Canal (Ca; Cb) (Figura 1). Neste segundo experimento as medições foram realizadas ao longo da variação da maré, o mesmo percurso foi adotado em campanhas mensais de julho a dezembro de 2017 (época menos chuvosa), e de janeiro a junho do ano de 2018 (época chuvosa) das 08h00min e 17h00min.

A medição dos  $FCH_4$  e  $FCO_2$  foi realizada mediante a técnica da câmara dinâmica flutuante, ligada a um analisador infravermelho com sistema automatizado de aquisição de dados (*Ultra-portable Greenhouse Gás Analyzer*, modelo 915-0011-1000, *Los Gatos Research*) (BERMAN *et al.*, 2012). O equipamento foi previamente calibrado usando as amostras padrões de gás  $CH_4$  (0,940 e 3,150 ppm) e  $CO_2$  (0,395 e 1.510 ppm).

A câmara utilizada foi personalizada, elaborada de plástico sintético com diâmetro de 32 cm, largura de 12 cm, colocada acima da superfície da água durante 4 min., com registro das concentrações a cada 2 segundos em tempo real a uma frequência de 2 Hz (JACOTOT; MARCHAND; ALLENBACH, 2018). A câmara flutuante pode influir nas medições dos fluxos quando a intensidade do vento é alta, induzindo a turbulências artificiais, resultando no aumento de fluxos (KREMER *et al.*, 2003; YANG *et al.*, 2014). Nos ambientes de baixa perturbação, onde o vento é quase zero e o fluxo da água lento, a câmara é um método poderoso (LORKE *et al.*, 2015; VACHON; PRAIRIE; COLE, 2010). A técnica foi implementada em pesquisas anteriores por (ALLENBACH, 2018b; JACOTOT; MARCHAND; RASERA *et al.*, 2013; YI LU *et al.*, 1999).

Foram mensurados *in situ* variáveis ambientais: temperatura do ar ( $T_a$ ; °C), umidade relativa ( $U_r$ ; %), Velocidade do vento ( $V_v$ ;  $m\ s^{-1}$ ) com um termo-higroanemômetro portátil (modelo AK821) a 1,00 m acima da coluna da água e variáveis físico-químicas da água: temperatura da água ( $T_{ag}$ ; °C), potencial de hidrogênio (pH), potencial de óxido redução (ORP; mV), oxigênio dissolvido (OD;  $mg\ L^{-1}$ ), condutividade elétrica (CE;  $mS\ cm^{-1}$ ), turbidez (Tur; NTU), salinidade (Sal; PPT), gravidade específica da água ( $\sigma$ ) e total sólidos dissolvidos (TDS;  $g\ L^{-1}$ ) coletados a 1,0 m de profundidade da coluna da água com uma sonda multiparamétrica Horiba (modelo U-50G).

#### 5.2.4 Estimativa dos fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>

Os fluxos entre a interface água-atmosfera, foram calculados a partir de dados de concentração de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> em ppm (dc) e o tempo decorrido em segundos (dt), pela seguinte equação (1) (FANG; MONCRIEFF, 1996; FREIJER; BOUTEN, 1991; JACOTOT; MARCHAND; ALLENBACH, 2018b): calculada pela seguinte equação (1):

$$F = P.V.M.\mu (dc/dt) / (A.T.R) \quad \text{Equação 1.}$$

Onde: F= fluxo em g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, P = pressão atmosférica (atm), V = volume da câmara em litros (9,65 l), M = massa molecular do CH<sub>4</sub> (16 g mol<sup>-1</sup>) o CO<sub>2</sub> (44 g mol<sup>-1</sup>), μ =fator de conversão das unidades (0,0864 L s μL<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), A = área coberta pela câmara sobre a superfície da água (0,80 m<sup>2</sup>), T = temperatura da câmara em kelvin (K), R = constante dos gases (0,08205 L atm / K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>), (dc/dt), se cálculo por regressão linear ( $\gamma = \beta_0 + \beta_1 \times$ ) (ABICHOU *et al.*, 2006; FRANKIGNOULLE, 1988; MCEWING; FISHER; ZONA, 2015). Só os pontos que representam a aumento linear com R<sup>2</sup> ≥ 0,3 foram considerados como fluxo, os R<sup>2</sup> < 0,3 se considerou como sendo zero (SUNDQVIST *et al.*, 2014).

#### 5.2.5 Conversão dos fluxos de CH<sub>4</sub> a carbono equivalente

Os fluxos de CH<sub>4</sub> foram convertidos em emissões de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>-eq), usando a equação (2):

$$CO_2\text{-eq} = FCO_2 + (FCH_4 * 23) \quad \text{Equação 2.}$$

Onde F = fluxos de FCO<sub>2</sub> ou FCH<sub>4</sub>, e 23 é o potencial de aquecimento global do CH<sub>4</sub> em relação ao CO<sub>2</sub> em um período de 100 anos em relação ao CO<sub>2</sub> em um período de 100 anos. (STOCKER *et al.*, 2013).

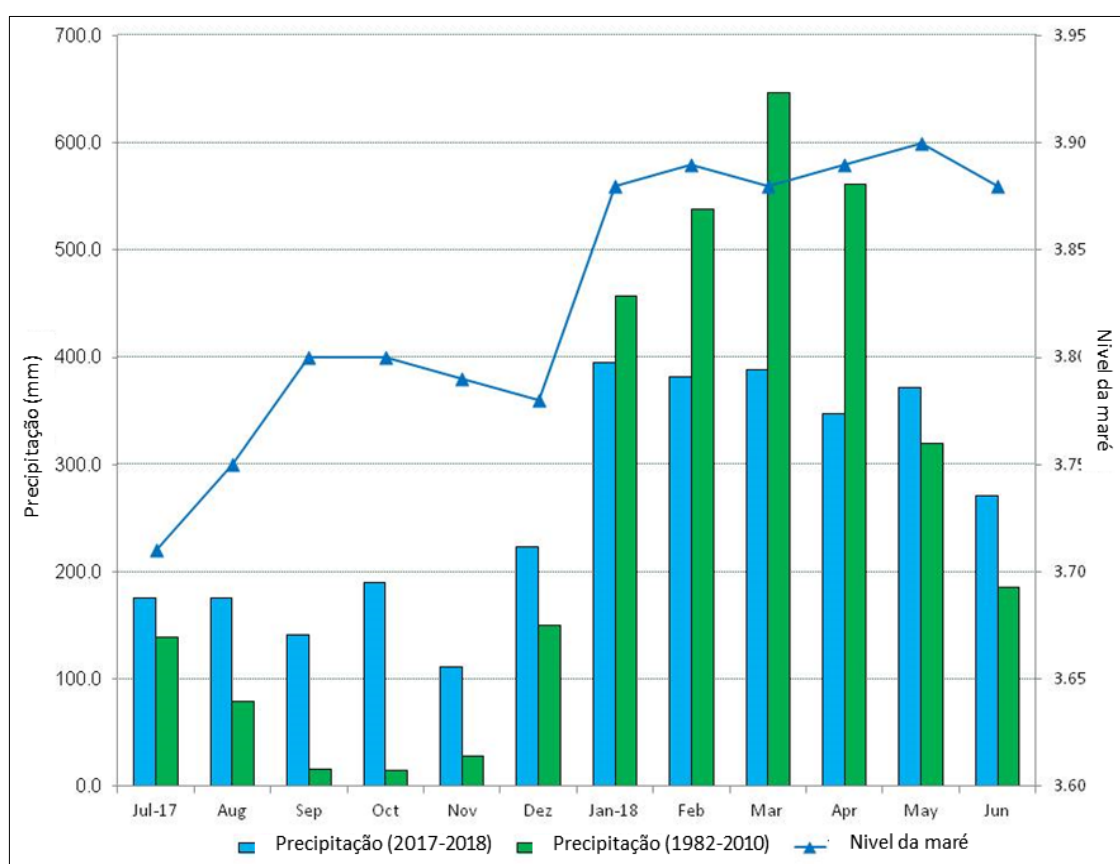
#### 5.2.6 Análises estatística

Os resultados dos FH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> que apresentaram distribuição normal pelo método de ajuste de Shapiro-Wilks foram comparados através da análise de variância (ANOVA), e testados pelo método de Fisher (LSD) para diferenças significativas maiores que 95%. Quando as distribuições não paramétricas usou-se o teste de Kruskal-Wallis. A análise de correlação foi realizada pelo método de Pearson. A avaliação das relações dos fluxos de gases com os fatores ambientais e físico-químicos da água foi feita pelo método da análise de componentes principais (ACP). Estas análises foram realizadas com o *software* InfoStat ®.

### 5.3 Resultados e discussão

Durante o período de estudo percebeu-se uma forte sazonalidade na área de estudo (Figura 2). A precipitação acumulada de 3.171 mm, o período seco de julho a dezembro do ano 2017, 1,016 mm, período chuvoso de janeiro a junho do ano 2018 foi de 2.155 mm. A Tar (temperatura do ar), Ur (umidade relativa) e precipitação não foram significativas com as médias históricas (1981 a 2018) (Test-t < 0,05). As marés mais baixas no período seco de 3,71 m, as mais elevadas no chuvoso de 3,90 m. (BRASIL, 2018d).

Figura 2- Normal climatológica no município de Soure (1981-2018), precipitação anual e altura máxima da maré, dos anos de 2017-2018, no município de São Caetano de Odivelas (PA).



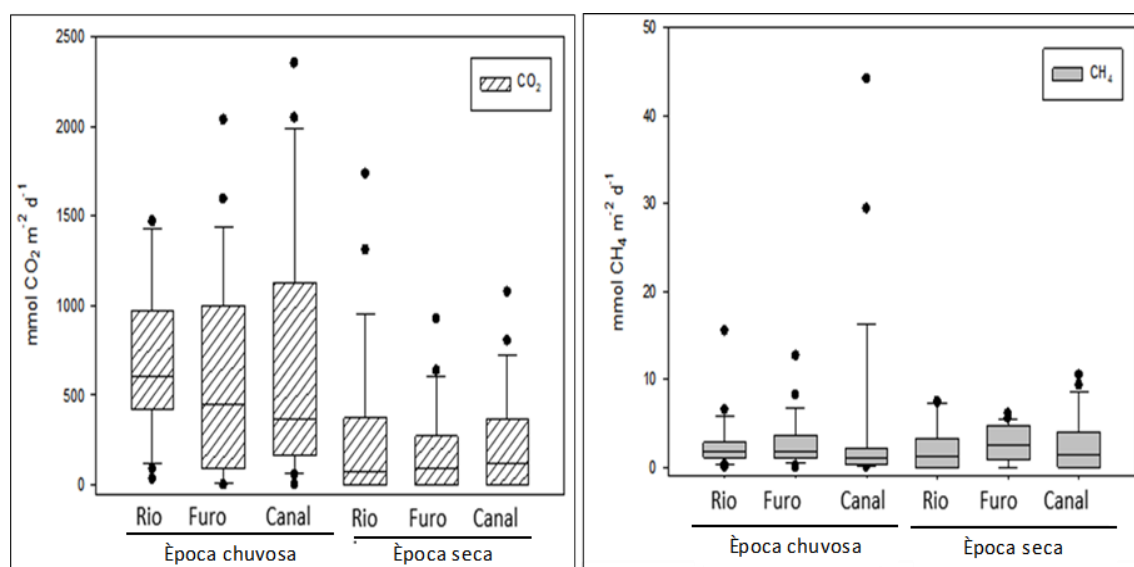
Fonte: Autor.

#### 5.3.1 Sazonalidade dos fluxos dos gases de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>

Ao longo do ano hidrológico, observaram fluxo positivo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> da água para a atmosfera (Figura 3). Não foram observadas diferenças significativas entre o FCO<sub>2</sub> na estação chuvosa e seca entre o FCO<sub>2</sub> no rio ( $272,0 \pm 87,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), o furo ( $170,4 \pm 49,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e o canal ( $239,8 \pm 60,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (Tabela 1).

Porém, em cada local se observo um fluxo significativamente maior durante a época chuvosa quando comparada à seca (Tabela 2). O rio apresentou  $\text{FCO}_2$  de  $704,9 \pm 88,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , o furo de  $601,0 \pm 115,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e canal com  $670,3 \pm 145,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  durante a estação chuvosa. Os  $\text{FCH}_4$  não apresentaram diferenças espaciais e sazonais (Figura 4). O  $\text{FCH}_4$  variou entre  $2,1 \pm 0,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  do rio (Tabela 2) para a atmosfera durante o período menos chuvoso até  $4,1 \pm 2,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , no canal para a atmosfera durante o período chuvoso (Figura 3).

Figura 3- Fluxo de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) no rio, furo e canal, durante a época seca e chuvosa, no estuário amazônico.



Fonte: Autor

Existe uma maior variação nos  $\text{FCH}_4$  na estação chuvosa em especial no canal, o que é menos percebido com o  $\text{FCO}_2$  (Figura 4). No estuário os  $\text{FCO}_2$  durante a estação chuvosa foram de  $658,7 \pm 67,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $\text{FCH}_4$  de  $3,1 \pm 0,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , maiores que os fluxos durante a estação seca,  $230,8 \pm 39,5 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $2,4 \pm 0,3 \text{ mmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Os  $\text{FCO}_2$  durante a estação chuvosa foram significativamente maiores ( $\text{LSD} = 158,721$ ;  $p < 0,0001$ ) do que os fluxos na época seca, porém não foram significativos ( $\text{LSD} = 1,647$ ;  $p = 0,390$ ) os  $\text{FCH}_4$  entre as estações.

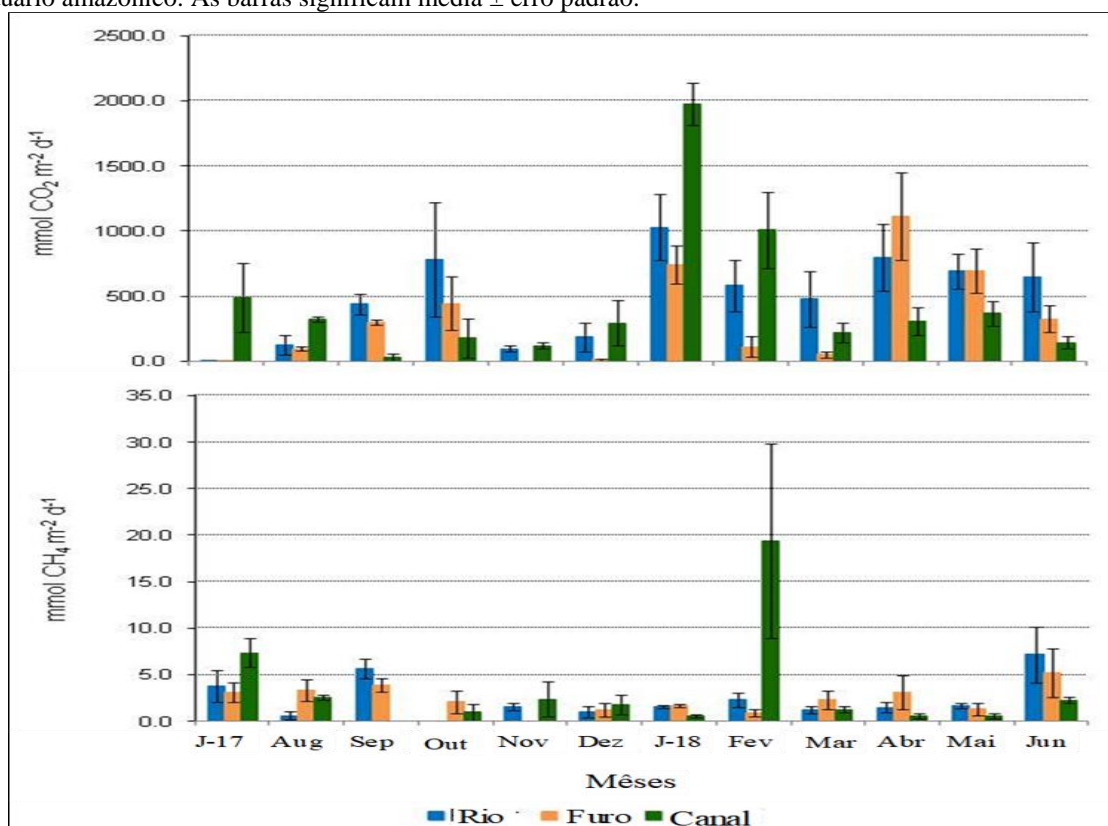
Assim, quando convertido os  $\text{FCH}_4$  em equivalente de  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ), os fluxos médios de  $\text{CO}_2\text{-eq}$  da água para a atmosfera foram extremamente elevados principalmente na época chuvoso ( $30,1 \pm 3,0 \text{ g CO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) em comparação à época seca ( $11,3 \pm 1,8 \text{ g CO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). A participação dos  $\text{FCH}_4$  é de 8,1% na estação chuvosa e 24,6% durante a estação seca para os fluxos totais de  $\text{CO}_2\text{-eq}$ .

As áreas de mangue no estuário amazônico são completamente inundadas durante a cada quadratura da lua, resultando em fluxos mais elevados durante a época chuvosa, cuja origem deve ser o aporte de carbono inorgânico trazido pelos rios para o estuário, bem como o aporte do solo trazido pelo rio originando elevados  $\text{FCO}_2$  para atmosfera (BORGES; ABRIL, 2011).

### 5.3.2 Fluxo mensal de $\text{CH}_4$ e $\text{CO}_2$

O  $\text{FCO}_2$  no rio foi maior nos meses de janeiro ( $1031,1 \pm 254,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), seguido de abril ( $797,8 \pm 253,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e menores em outubro ( $782,8 \pm 437,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (Figura 4). No furo os  $\text{FCO}_2$  foram mais elevados em abril ( $1111,3 \pm 336,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), seguido de janeiro ( $741,6 \pm 143,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e mais baixos em maio ( $695,5 \pm 170,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). No canal os  $\text{FCO}_2$  foram maiores nos meses de janeiro ( $1973,9 \pm 163,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e menores em fevereiro ( $1007,9 \pm 291,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Quando comparamos os  $\text{FCO}_2$ , entre o rio e canal em cada mês, os resultados mostram diferença significativa em janeiro, agosto e setembro, ou seja, início das épocas chuvoso e seco.

Figura 4- Fluxos de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) do rio, furo e canal, ao longo de um ano hidrológico no estuário amazônico. As barras significam média  $\pm$  erro padrão.



Fonte: Autor.

No rio e no furo os FCH<sub>4</sub> foram significativamente maiores nos meses de junho (rio =  $7,1 \pm 2,9$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; furo =  $5,1 \pm 2,6$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e menores em setembro (rio =  $5,6 \pm 1,0$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; furo =  $3,8 \pm 0,7$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Apenas no mês de fevereiro com FCH<sub>4</sub> ( $19,4 \pm 10,4$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) o FCH<sub>4</sub> foi maior que os outros meses no canal. Comparando os fluxos do rio e do canal foi possível observar diferenças significativas apenas nos meses de janeiro, maio e setembro (Figura 4). Os fluxos dos gases da água para atmosfera, com exceção do FCH<sub>4</sub> no furo, foram sempre maiores na época chuvosa em comparação com a época seca (Tabela 1).

A média anual das emissões de CO<sub>2</sub> no rio foi maior 6,9% e 21,1% maior em comparação aos fluxos no canal e furo, respectivamente. O FCH<sub>4</sub> médio anual foi maior no canal, sendo 17,0% e 29,2% superior ao do furo e do rio, respectivamente.

Analisando o estuário de São Caetano de Odivelas o valor médio dos FCO<sub>2</sub> foi de  $450,8 \pm 43,2$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e para o FCH<sub>4</sub> foi de  $2,8 \pm 0,4$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. O estuário amazônico estudado libera para a atmosfera um total de  $7,241$  kg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> e  $0,016$  kg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>. Neste sentido, o estuário estudado apresentou um fluxo da água para atmosfera de  $515,3 \pm 47,5$  mmol CO<sub>2</sub>-eq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Tabela 1), e um fluxo anual de  $368,3$  Gg CO<sub>2</sub>-eq para a atmosfera.

Tabela 1- Fluxo de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>-eq\* do rio, furo e canal na estação seca, chuvosa e média anual, no estuário amazônico em São Caetano de Odivelas (PA).

Estação	CO <sub>2</sub> (mmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )			CH <sub>4</sub> (mmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )			CO <sub>2</sub> -eq (mmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )			
	Rio	Furo	Canal	Rio	Furo	Canal	Rio	Furo	Canal	Total
Seca	272,094	170,416	239,827	2,111	2,733	2,512	320,649	233,275	297,594	286,814
Chuvosa	704,991	601,012	670,247	2,579	2,767	4,116	764,304	562,849	764,904	731,285
Média anual	488,542	385,714	455,037	2,345	2,750	3,314	542,477	413,043	531,249	515,399

Fonte: Autor.

\*Os potenciais de aquecimento global de 23 vezes maior para CH<sub>4</sub> foram usados para converter as emissões de CH<sub>4</sub> em CO<sub>2</sub>-eq para comparar seus impactos no efeito estufa (IPCC, 2013).

Outros estudos registraram fluxos de  $0,44$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para CH<sub>4</sub> e  $80,45$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para CO<sub>2</sub> (JACOTOT; MARCHAND; ALLENBACH, 2018) e  $21,25$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para CH<sub>4</sub> e  $159,55$  mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para CO<sub>2</sub> (CALL *et al.*, 2019). No Estuário Mojuim se registrou os maiores fluxos no período chuvoso. Adicionalmente, somente o CO<sub>2</sub> mostrou diferença estatisticamente significativa entre os períodos climáticos.



O estuário estudado é uma fonte de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> para a atmosfera, um sistema de alta produtividade o que representa uma fixação significativa de CO<sub>2</sub> (WANG *et al.*, 2016). Os resultados dos FCO<sub>2</sub> são expressivamente maiores do que os escassos trabalhos publicados anteriormente em ecossistemas de manguezais com macromaré localizados em áreas tropicais (BORGES *et al.*, 2003; BOUILLON *et al.*, 2008; CALL *et al.*, 2019; ROSENRETER *et al.*, 2018b). Ainda existem grandes incertezas acerca dos altos fluxos de carbono em áreas de mangue, em especial no bioma Amazônia.

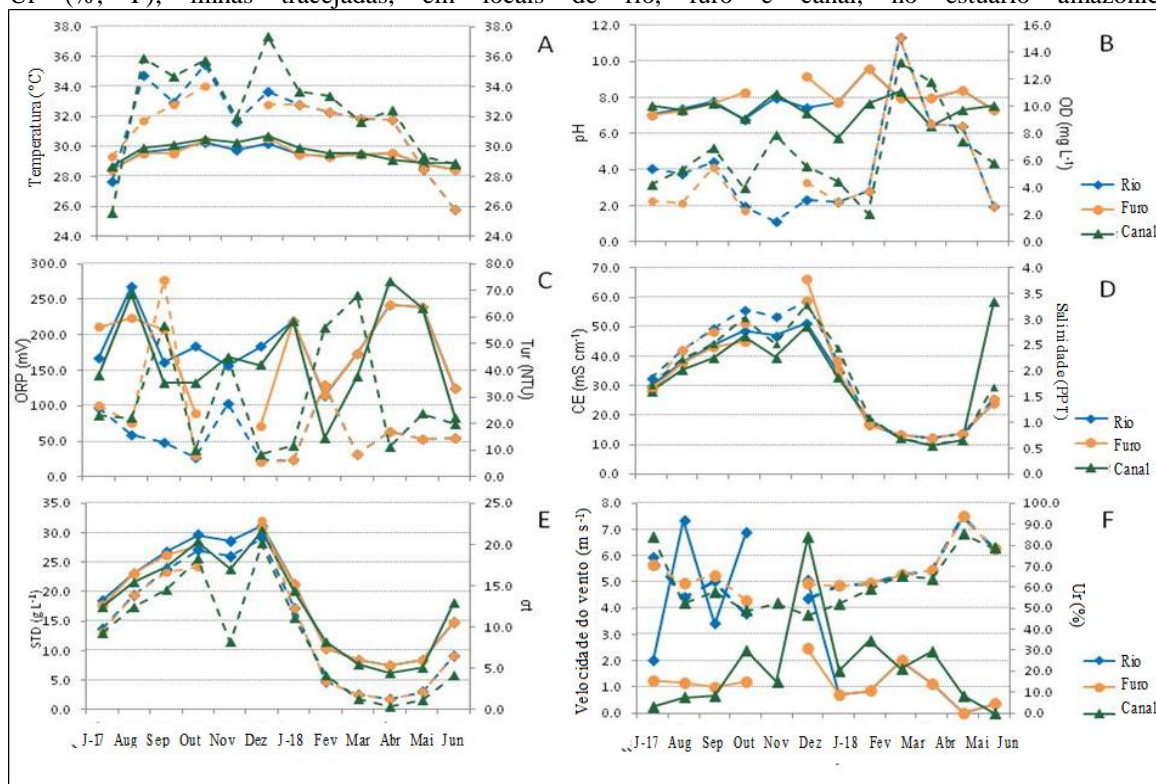
### 5.3.3 Correlação entre os fluxos e as propriedades físico-químicas da água

As temperaturas da água e do ar foram maiores durante o período menos chuvoso. A temperatura da água ao contrário da temperatura do ar não apresentou variação sazonal oscilando entre 28-30 °C (Figura 5-A).

O pH se manteve praticamente constante nos três lugares estudados, variando de 5,8 (único momento em janeiro no canal) a 9,6 em (fevereiro no rio e furo) com média de 7,7. Entretanto o oxigênio dissolvido apresentou concentração mais elevada durante a estação chuvosa de (7,1 mg L<sup>-1</sup>), quando comparada à estação seca (4,5 mg L<sup>-1</sup>), apresentando (máximo = 15,1 mg L<sup>-1</sup>; mínima = 1,5 mg L<sup>-1</sup>) (Figura 5-B). O potencial redox (máxima = 275,5; mínima = 55,0) e a turbidez (máxima = 73,9; mínima = 5,8) foi extremamente variada durante o ano de estudo (Figura 5-C). A Condutividade elétrica e apresentou um comportamento idêntico a Salinidade, tendo valores maiores na época seca do que na chuvosa (Figura 5-D), sendo em média 42,3 e 20,7 mS cm<sup>-1</sup>, e 2,7 a 1,2 PPT na estação seca e chuvosa, respectivamente.

O mesmo padrão aconteceu com o STD e com  $\sigma_t$  (Figura 5-eq), apresentando 25,2 a 11,8 g L<sup>-1</sup>, e 15,4 até 4,3 g L<sup>-1</sup> na estação seca e chuvosa, respectivamente. A Vv variou expressivamente na estação seca (máximo = 7,4; mínimo = 0,3), e principalmente no ambiente de rio seca (máximo = 7,4; mínimo = 2,0), onde apresentou a maior intensidade, sendo que a Ur foi maior na estação chuvosa (70,1%) em comparação com a estação seca (59,3%) (Figura 5-F). É importante acrescentar que os resultados apresentados no furo foram idênticos aos resultados apresentados no rio durante a estação chuvosa (Figura 5).

Figura 5- Variação mensal dos parâmetros ambientais: a temperatura da água (Tag °C; A), pH (B), potencial redox (ORP mV; C), condutividade elétrica da água (CE mS cm<sup>-1</sup>; D), sólidos totais dissolvidos (STD, g L<sup>-1</sup>; E) e velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>; F). Linhas contínuas representam os parâmetros temperatura do ar (°C; A), oxigênio dissolvido D (OD mg L<sup>-1</sup>; B), turbidez (Tur NTU; C), salinidade (Sal PPT; D),  $\sigma_t$  (E), e Ur (%; F); linhas tracejadas, em locais de rio, furo e canal, no estuário amazônico.



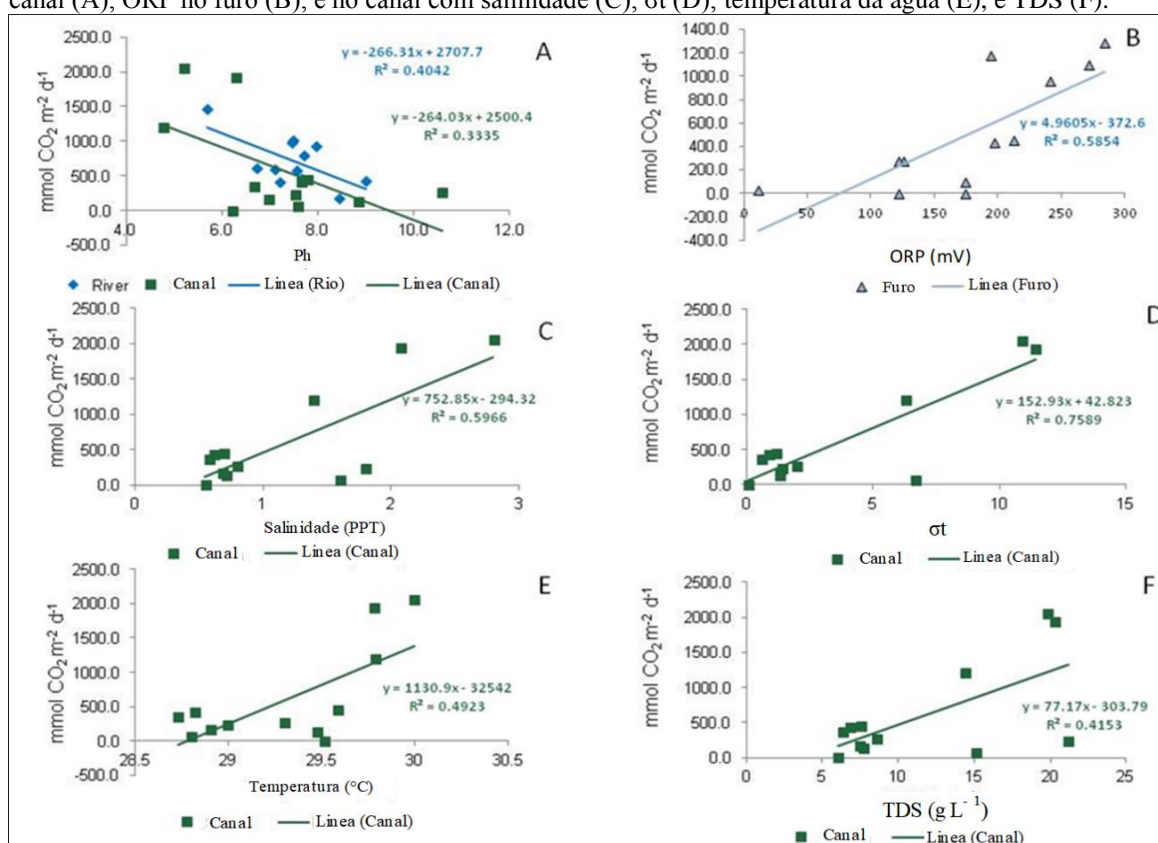
Fonte: Autor.

A precipitação anual com períodos máximos e mínimos bem definidos típicos do bioma Amazônico, a qual determina a extensão de um influxo de águas marinhas no estuário e a inundação com lixiviação de nutrientes nas áreas de manguezais e de bacias hidrográficas continentais (PAMPLONA; PAES; NEPOMUCENO, 2013).

O pH alcalino das águas indica uma alta influência do ciclo de marés na área de estudo (SOUZA *et al.*, 2009). As concentrações mais elevadas de OD no período chuvoso permitiram classificar as águas do estuário Mojuim como saturadas, e não saturada durante a estação seca (Figura 5-B). Na estação chuvosa os FCO<sub>2</sub> do rio e do canal foram correlacionados negativamente com o pH da água (Pearson = -0,640 e -0,580, p = 0,030 e 0,050, no rio e canal, respectivamente). O canal também teve correlação com a salinidade (Pearson = 0,770, p = 0,000),  $\sigma_t$  (Pearson = 0,870, p = 0,000), e temperatura da água (Pearson = 0,700, p = 0,010) e TDS (Pearson = 0,640, p = 0,020). No furo o FCO<sub>2</sub> na estação chuvosa só foi correlacionado com o Eh (Pearson = 0,770, p = 0,000).

Por enquanto na estação seca não foi encontrada nenhuma correlação entre o fluxo de  $\text{CO}_2$  e as variáveis estudadas. Na estação chuvosa o  $\text{FCO}_2$  do rio e do furo só se correlacionaram com pH e ORP, sendo que no canal foram observadas uma série de correlações sendo a de melhor coeficiente linear com  $\sigma$  (Figura 6).

Figura 6- Regressão linear na época chuvosa entre o fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e o pH no rio e canal (A), ORP no furo (B), e no canal com salinidade (C),  $\sigma$  (D), temperatura da água (E), e TDS (F).



Fonte: Autor.

O  $\text{FCH}_4$  teve uma correlação significativa apenas com a temperatura da água (Pearson = -0,640,  $p = 0,030$ ) no furo, não foi observada nenhuma outra correlação nos outros locais estudados. Durante o período seco o  $\text{FCH}_4$  se correlacionou apenas no furo com a Turbidez (Pearson = 0,680,  $p = 0,030$ ) e no canal com a temperatura da água (Pearson = -0,590,  $p = 0,040$ ). Estudos realizados no estuário em Bragança mostraram uma correlação negativa significativa entre a salinidade e densidade. Em uma comparação anual o  $\text{FCO}_2$  foi correlacionado positivamente com o ORP (Pearson = 0,260,  $p = 0,030$ ) e negativamente com pH (Pearson = -0,360,  $p = 0,000$ ).

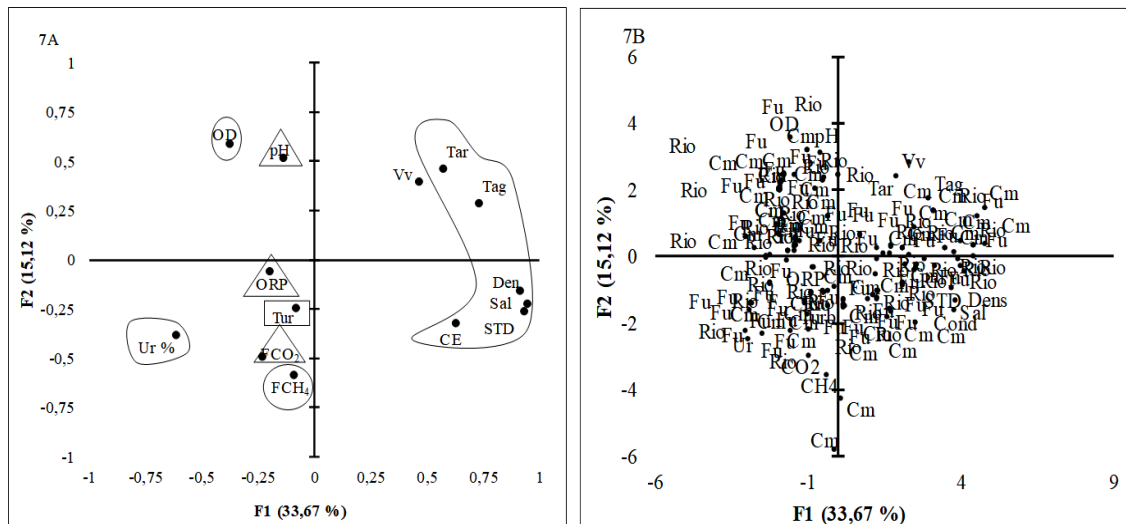
O  $\text{FCH}_4$  mostrou correlações significativas com pH (Pearson = -0,260,  $p = 0,030$ ) e Tur (Pearson = 0,320,  $p = 0,010$ ). Com isto, os resultados mostraram que o pH influencia negativamente nos  $\text{FCO}_2$  e  $\text{FCH}_4$ . Isto talvez explique porque os  $\text{FCO}_2$  na época chuvosa

são maiores, devido a maior participação dos rios com águas mais ácidas, resultando em uma contribuição maior para os  $\text{FCO}_2$  da água para a atmosfera. O fato de ORP estar positivamente correlacionado com os  $\text{FCO}_2$  indica uma alta contribuição da respiração heterotrófica para os fluxos, conseqüentemente espera-se que esteja acontecendo uma maior decomposição de material orgânico dentro da água.

A análise de componentes principais (ACP) auxiliou na interpretação da variabilidade conjunta total dos dados de 61,97% onde e 48,79% foi representada pelas duas primeiras componentes. A primeira ACP explicou 33,67% e a segunda 15,12% (Figura 7A e Tabela 2).

Das variáveis estudadas da água a que tem maior correlação positiva e estas são mostradas pela figura irregular na dimensão 1. A temperatura do ar (Tar) Temperatura da água (Tag), densidade (Den), salinidade (Sal), sólidos totais (STD) e condutividade elétrica (CE) mostraram uma associação positiva na primeira componente. Estes parâmetros também mostram uma associação negativa com a umidade relativa (Ur). A dimensão 2 mostradas pelo (retângulo), oxigênio dissolvido (OD) mostraram uma correlação inversa com o fluxo de metano ( $\text{FCH}_4$ ). Na dimensão 3 (Triângulo), e  $\text{FCO}_2$  e óxido redução (ORP), pH (negativo) mostraram uma relação inversa com as outras variáveis (Figura 7). Foi realizada uma análise entre variáveis da água e zonas de estudo (gráfico biplot) (Figura 7B).

Figura 7- Análise de componentes principais (ACP) das variáveis da água. (7A) indica as principais variáveis. A figura irregular indica as variáveis localizadas na primeira componente. Os círculos indicam as variáveis da segunda componente, e os triângulos as variáveis na terceira componente. FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>; FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; Tag: temperatura do ar; Ur: umidade relativa; Vv: velocidade do vento; pH: potencial de hidrogênio; CE: condutividade elétrica; Sal: Salinidade. (7B), indica a análise de componentes principais (ACP) associada com a zonas na água (gráfico biplot). FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; Ta: temperatura da água; pH; ORP: Oxirredução; CE; condutividade elétrica; Tur: turbidez; OD: Oxigênio dissolvido; STD: Sólidos totais; Sal: Salinidade; Den: densidade; Vv: velocidade do vento; Ta: temperatura do ar e Ur: umidade relativa.



Fonte: Autor.

Tabla 2- Apresenta as cargas fatoriais da análise de componentes principais dos dados da água. Os valores em negrito indicam a carga significativa da variável e a localização (componente F1, F2, F3, F4 e F5) na PCA. FCH<sub>4</sub>: fluxo de CH<sub>4</sub>; FCO<sub>2</sub>: fluxo de CO<sub>2</sub>. Tag: temperatura da água; pH; ORP: Óxido redução; CE.; condutividade eletrica; Tur: turbidez; OD: Oxigênio dissolvido; STD: Sólidos totais; Sal: Salinidade; Den: densidade; Vv: velocidade do vento; Ta: temperatura do ar e Ur: umidade relativa.

Variáveis	F1	F2	F3
FCH <sub>4</sub>	-0,092	<b>-0,588</b>	-0,223
FCO <sub>2</sub>	-0,232	-0,494	<b>0,524</b>
Ta	<b>0,732</b>	0,288	0,067
pH	-0,137	0,515	<b>-0,536</b>
ORP	-0,196	-0,057	<b>0,840</b>
CE	<b>0,628</b>	-0,326	-0,291
Tur	-0,083	-0,249	-0,485
OD	-0,375	<b>0,585</b>	0,015
STD	<b>0,931</b>	-0,264	-0,050
Sal	<b>0,945</b>	-0,222	0,004
Den	<b>0,914</b>	-0,161	0,100
Vv	0,465	0,398	0,403
Tar	<b>0,573</b>	0,462	0,160
Ur	<b>-0,613</b>	-0,386	0,059

Fonte: Autor.

As emissões de gás para atmosfera podem ocorrer por difusão molecular ascendente (KRISTENSEN *et al.*, 2008), o CH<sub>4</sub> pela ebulição de bolhas menos denso (BARNES *et al.*, 2006; KOMIYA *et al.*, 2015).

#### 5.4 Conclusão

As variáveis físico-químicas da água e ambientais revelaram um padrão sazonal com os FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub>. Estas variações mostraram uma sincronia com as precipitações e descargas fluviais, sendo as maiores foram durante a época de chuvosa, pode-se inferir que os processos das interações água-atmosfera que particionam os FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> para este ecossistema estuarino mostraram a complexidade em relação as outras variáveis estudadas.

Os resultados obtidos provavelmente foram influenciados pelos processos físico-químicos da água, e da combinação de processos naturais como os períodos climáticos, a dinâmica das marés que no período chuvoso são maiores permitindo a entrada da água marinha das marés enchentes durante o ano, e os tipos de sedimentos envolvidos pelas atividades agropecuárias que são descarregados por lixiviação na bacia hidrográfica do rio Mojuim que alimenta de água doce o estuário, o qual desempenham um papel fundamental para diferenciar os FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> entre a interface água-atmosfera.

Devendo-se considerar estudos mais intensivos para pesquisas futuras para este ecossistema, é que identifique a maior magnitude a dinâmica das variações dos FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub>, para avaliar o papel deste ecossistema.

A ocorrência dos menores FCO<sub>2</sub> e maiores FCH<sub>4</sub> durante a época seca indicam o papel da fotossíntese e algas nos afluentes fluviais do estuário, ainda existe uma grande incerteza dos fluxos totais produzidos pelos estuários considerando a falta de dados mais precisos para ter maior certeza que estes sistemas atuam como fonte líquida de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> atmosférico, sem esquecer as implicações líquidas na captação de carbono regionais, bem como globais.

#### Agradecimentos

Ao Programa de alianças para Educação e a Capacitação da Organização dos Estados Americanos e o Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (PAEC-OEA-GCUB). Universidade Federal do Pará, (UFPA-PPGCA). Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Paulo Sarmiento, Lucivaldo da Silva e Msc. Maridalva Ribeiro pela colaboração no trabalho.

## Referências

- ABICHOU, T. *et al.* Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. **Waste Management**, v. 26, n. 11, p. 1305–1312, 2006.
- BARNES, J. *et al.* Tidal dynamics and rainfall control N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a pristine mangrove creek. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 15, p. 4–9, 2006.
- BARROS, D. D. F.; TORRES, M. F.; FRÉOU, F. L. Ictiofauna do estuário de São Caetano de Odivelas e Vigia (Pará, Estuário Amazônico). **Biota Neotropica**, v. 11, n. 2, p. 367–373, 2011.
- BAUER, J. E. *et al.* The changing carbon cycle of the coastal ocean. **Nature**, v. 504, n. 7478, p. 61-70, 2013.
- BERMAN, M. G. *et al.* Interacting with nature improves cognition and affect for individuals with depression. **Journal of Affective Disorders**, v. 140, n. 3, p. 300–305, 2012.
- BORGES, A. V.; ABRIL, G. Carbon dioxide and methane dynamics in estuaries. **Liège Belgium: Elsevier Inc.**, v 5, p. 119-161. 2011.
- BORGES, A. V. *et al.* Atmospheric CO<sub>2</sub> flux from mangrove surrounding waters. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 11, p. 1558, jun. 2003.
- BOUILLON, S. *et al.* Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 22, n. 2, p. 1–12, 2008.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Centro de Hidrografia da Marinha. **Tábuas de maré**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br> 2018. Acesso em 10 de maio 2018d.
- CALL, M. *et al.* High pore-water derived CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from a macro-tidal mangrove creek in the Amazon region. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 247, p. 106–120, 2019.
- COLE, J. J. *et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 171–184, 2007.
- CUI, X. *et al.* Stronger ecosystem carbon sequestration potential of mangrove wetlands with respect to terrestrial forests in subtropical China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 71–80, 2018.
- DITTMAR, T.; LARA, R. J. Molecular evidence for lignin degradation in sulfate-reducing mangrove sediments (Amazônia, Brazil). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 65, n. 9, p. 1417–1428, 2001.
- EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY - NOAA. **PRCP\_CU\_GAUGE\_V1201**. Disponível em: <https://esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em 10 de abril. 2018c.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. An improved dynamic chamber technique for measuring CO<sub>2</sub> efflux from the surface of soil. **Functional Ecology**, v. 10, n. 2, p. 297, 1996.

FRANKIGNOULLE, M. Field measurements of air-sea CO<sub>2</sub> exchange. **Limnology and Oceanography**, v. 33, n. 3, p. 313–322, 1988.

FREIJER, J. I.; BOUTEN, W. A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution: Experiments and simulation. **Plant and Soil**, v. 135, n. 1, p. 133–142, 1991.

IPCC. Climate change. The physical science basis. *In*: STOCKER, T. F. *et al.* (eds.). **Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change 2013**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 1535.

JACOTOT, A.; MARCHAND, C.; ALLENBACH, M. Tidal variability of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the water column within a Rhizophora mangrove forest (New Caledonia). **Science of the Total Environment**, v. 631–632, p. 334–340, 2018.

KOMIYA, S. *et al.* Contribution of Ebullition to Methane and Carbon Dioxide Emission from Water between Plant Rows in a Tropical Rice Paddy Field. 2015.

KRAUSE-JENSEN, D. *et al.* Sequestration of macroalgal carbon: The elephant in the Blue Carbon room. **Biology Letters**, v. 14, n. 6, 2018.

KREMER, J. N. *et al.* Technical note: Conditions for using the floating chamber method to estimate air-water gas exchange. **Estuaries**, 2003.

KRISTENSEN, E. *et al.* Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. **Aquatic Botany**, v. 89, n. 2, p. 201–219. 2008.

LAGOMASINO, D. *et al.* High-resolution forest canopy height estimation in an African blue carbon ecosystem. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v. 1, n. 1, p. 51–60, 2015.

LORKE, A. *et al.* Technical Note: Drifting vs. anchored flux chambers for measuring greenhouse gas emissions from running waters. **Biogeosciences Discussions**, v. 12, n. 17, p. 14619–14645, 2015.

MCEWING, K. R.; FISHER, J. P.; ZONA, D. Environmental and vegetation controls on the spatial variability of CH<sub>4</sub> emission from wet-sedge and tussock tundra ecosystems in the Arctic. **Plant and Soil**, v. 388, n. 1–2, p. 37–52, 2015.

MCLEOD, E. *et al.* A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.9, n. 10, p. 552-560, 2011.

NELLEMAN, C. *et al.* **Blue Carbon** - the role of healthy oceans in binding carbon. Grid-Arendal: **Environment**, 2009, 71p.



PAMPLONA, F. C.; PAES, E. T.; NEPOMUCENO, A. Nutrient fluctuations in the Quatipuru river: A macrotidal estuarine mangrove system in the Brazilian Amazonian basin. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 133, p. 273–284, 2013.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, AND T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1633–1644, 2007.

RASERA, M. DE F. F. L. *et al.* Spatial and temporal variability of pCO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> efflux in seven Amazonian Rivers. **Biogeochemistry**, v. 116, n. 1–3, p. 241–259, 2013.

RAY, R.; JANA, T. K. Carbon sequestration by mangrove forest: One approach for managing carbon dioxide emission from coal-based power plant. **Atmospheric Environment**, v. 171, p. 149–154, 2017.

ROSENTERETER, J. A. *et al.* Methane emissions partially offset “blue carbon” burial in mangroves. **Science Advances**, v. 4, n. 6, p. 69–82, 2018a.

ROSENTERETER, J. A. *et al.* Factors controlling seasonal CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions in three tropical mangrove-dominated estuaries in Australia. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 215, p. 69–82, 2018b.

ROSENTERETER, J. A. *et al.* Seasonal and temporal CO<sub>2</sub> dynamics in three tropical mangrove creeks – A revision of global mangrove CO<sub>2</sub> emissions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 222, p. 729–745, fev. 2018c.

SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: Cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 427–435, dez. 2005.

STOCKER, T.F. D. *et al.* (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York, NY, USA, Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom, 2013. v. 1, 1535 p.

SUNDQVIST, E. *et al.* Short-term effects of thinning, clear-cutting and stump harvesting on methane exchange in a boreal forest. **Biogeosciences**, v. 11, n. 21, p. 6095–6105, 2014.

VACHON, D.; PRAIRIE, Y. T.; COLE, J. J. The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange. **Limnology and Oceanography**, v. 55, n. 4, p. 1723–1732, 2010.

WANG, H. *et al.* Temporal and spatial variations of greenhouse gas fluxes from a tidal mangrove wetland in Southeast China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 2, p. 1873–1885, 2016.

YANG, L. *et al.* Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs. **Acta Ecologica Sinica**, v. 34, n. 4, p. 204–212, 2014.

YI LU, C. *et al.* Methane flux and production from sediments of a mangrove wetland on Hainan Island, China. **Mangroves and Salt Marshes**, v. 3, n. 1, p. 41–49, 1999.

## CAPITULO 6 DISCUSSÃO GERAL

### 6.1 Resultados chave

Este estudo é o primeiro a fornecer evidência em escala de campo dos valores e contribuições estimadas dos FCH<sub>4</sub> e dióxido de carbono FCO<sub>2</sub>, de um estuário na Amazônia Oriental na reserva extrativista marinha Mocapajuba, realizada em dois ecossistemas distintos: O primeiro, na interface solo-atmosfera na (Ilha da Macaca), em duas topografias altas e baixas, com uma de floresta de mangue com predominante das espécies *Rhizophora mangle* L. e *Avicennia germinans* (L.) Stearn. O segundo ecossistema, foi em água salubre na interface água-atmosfera (estuário do rio Mojuim) em três zonas: Canal de maré, Furo e Rio, com larguras e conseqüente volume de água diferentes.

Os resultados mostraram que as campanhas diárias feitas na interface solo-atmosfera e água-atmosfera, dos FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> em diferentes horários do dia, e durante as duas marés, a vazante e da enchente, mostraram variabilidade nos seus fluxos durante as horas de medição e também durante as marés da enchente e vazante, respectivamente.

Além disso, os fluxos não apresentaram diferença estatística significativa entre os horários e as marés. De acordo com isto, poderíamos dizer que os registros dos fluxos podem ser feitos em qualquer hora do dia e maré, respectivamente, sendo que estas variáveis não apresentaram uma influência de relevância significativa sobre a produção de FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub>.

Em relação ao gradiente topográfico os FCH<sub>4</sub> e FCO<sub>2</sub> do solo nos pontos mais altos foram totalmente diferenciáveis, em comparação aos pontos mais baixos. Isto deve a um baixo acúmulo de matéria orgânica e elevado carbono microbiano, produto pelos processos de decomposição da biomassa, processos biológicos dos microrganismos, respiração e proliferação dos mesmos.

### 6.2 Prioridades para pesquisas futuras

Para este estudo não foi considerado o carbono atmosférico captado pela biomassa aérea sendo está uma variável importante, a qual atividade é regulamentada pela lei e resolução do Conselho Nacional do Médio Ambiente CONAMA resolução n° 004/1985 (Brasil, 1985 e 1965) que relata à proteção dos manguezais, neste caso importante que poderia ser válida para cálculos futuros de carbono, e que permita a elaboração de uso de equações alométricas desenvolvidas em ecossistema de mangue da região amazônica.

As variáveis físico-químicas da água no estuário Mojuim e no solo na Ilha da Macaca foram analisados de forma geral, ou seja, apenas uma vez no mês, sugere-se que se poderiam realizar pesquisas de maior precisão com espacialmente mais fracionadas para entender a complexidade hidroquímica e biogeoquímicas deste ecossistema.

Os manguezais e estuários são ainda ecossistemas pouco desconhecidos, entretanto com natural riqueza biológica muito desenvolvida e inestimável. Esta área, por ser uma reserva extrativista, precisa de pesquisas em relação aos seus bens e serviços em relação com as comunidades, para estimar economicamente, quanto poderia ser o valor de venda do carbono e serviços ambientais, componente que não foi abordado nesta pesquisa.

### **6.3 Considerações finais**

O presente estudo destaca a necessidade de adotar um protocolo de amostragem mais intensivo, que identifique a magnitude da variação dos  $FCH_4$  e  $FCO_2$  espacial e temporal, para considerações futuras de inventários anuais.

Aos resultados aqui apresentados mostraram que as marés não apresentarem influencia significativa nos horários estudados. Para estudos futuros se recomenda estudos que incluam o ciclo de 24 horas nas duas épocas climáticas.

Os resultados mostram que não existe uma variação significativa entre os horários, entretanto, se existir a necessidade de escolher seria melhor amostrar nas marés enchendo para o  $FCO_2$ , o que independe para o  $FCH_4$ . Também poderia ser incluído um sistema de classificação melhorado para a determinação do nível de impacto nos manguezais, com base na biomassa aérea, pois o total de C e N no solo afetam os fluxos de  $CO_2$ .

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, D. *et al.* Seasonal variation in nitrous oxide and methane emissions from subtropical estuary and coastal mangrove sediments, Australia. **Plant Biology**, v. 13, n. 1, p. 126–33, 2011.
- ALLEN, D. E. *et al.* Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 622–631, 2007.
- ALONGI, D. M. Present state and future of the world's mangrove forests. **Environmental Conservation**, v. 29, n. 3, p. 331–349, 2002.
- BOUILLON, S. *et al.* Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 22, n. 2, p. 1–12, 2008.
- BREITHAUPT, J. L. *et al.* Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, n. 3, p. 1–11, 2012
- CHEN, G. C.; TAM, N. F. Y.; YE, Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 48, p. 175–181, 2012.
- GIANI, L. *et al.* Characteristics and methanogenesis of the Balandra lagoon mangrove soils, Baja California sur, Mexico. **Geoderma**, v. 72, n. 1–2, p. 149–160, 1996.
- GIRI, C. *et al.* Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 154–159, 2011.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE.- ICMBIO. **Atlas dos manguezais do Brasil**, 2018. 179p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **2001. Observed climate variability and change. Contribution of working group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** New York, NY, USA, Cambridge : United Kingdom, 2001. 881p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC **2007**: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York, NY, USA: Cambridge United Kingdom, 2007. 976p.
- KJERFVE, B. *et al.* Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. **Elsevier Science B.V**, p. 479–532, 2002.
- MARINHO, C. *et al.* Effect of sediment composition on methane concentration and production in the transition zone of a mangrove (Sepetiba Bay, Rio de Janeiro, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, p. 429–436, 2012.

MORENO-MAY, G. J. *et al.* Estimación del potencial de captura de carbono en suelos de manglar de isla del Carmen. **Unacar Tecnociencia**, v. 4, n. 4, p. 23–39, 2010.

ORGANIZATION WORLD METEREEOLOGICAL - WMO; Atmosphere watch Global-GAW. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2014. **The Guardian**, v. 11, p. 2–5, 2015.

RICKLEFS, R. E.; LATHAM, R. E. Global patterns of diversity in mangrove floras. **Species Diversity in Ecological Communities: historical and geographical perspectives**, p. 215–229, Jan.1993.

SAHOO, K.; DHAL, N. K. Potential microbial diversity in mangrove ecosystems: a review. **Indian Journal of Marine Sciences**, v. 38, n. 2, p. 249–256, 2009.

SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: Cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 427–435, 2005.

SPALDING, M.; BLASCO, F.; FIELD, C. World mangrove atlas. **The International Society for Mangrove Ecosystems (ISME)**, v. 14, n. 5, p. 778, 1997.

SPALDING, M.; KAINUMA, M.; COLLINS, L. **Book review: world atlas of mangroves**. Amsterdam, Netherlands: Springer, 2010.