

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RITIELLE RODRIGUES ANJOS

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA FLUTUANTE PARA MEDIÇÃO DE FLUXO DE
CO₂ NA INTERFACE ÁGUA-AR

CURITIBA

2023

RITIELLE RODRIGUES ANJOS

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA FLUTUANTE PARA MEDIÇÃO DE FLUXO DE
CO₂ NA INTERFACE ÁGUA-AR

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre

Orientador: Michael Mannich

Coorientador: Emílio Mercuri

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Anjos, Ritielle Rodrigues

Desenvolvimento de uma câmara flutuante para medição de fluxo de CO₂ na interface água-ar / Ritielle Rodrigues Anjos. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Ambiental.

Orientador: Michael Mannich

Coorientador: Emílio Mercuri

1. Medidores de fluxo. 2. Gases do efeito estufa. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Ambiental. III. Mannich, Michael. IV. Mercuri, Emílio. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **RITIELLE RODRIGUES ANJOS** intitulada: **Desenvolvimento de uma câmara flutuante para medição de fluxos de CO₂ na interface água-ar**, sob orientação do Prof. Dr. MICHAEL MANNICH, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 13 de Novembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

13/11/2023 15:57:55.0

MICHAEL MANNICH

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/11/2023 13:38:11.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

13/11/2023 17:00:47.0

NELSON CONSOLIN FILHO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ - CAMPO MOURÃO)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão e reconhecimento a todos que contribuíram para a realização desta dissertação, pois sem o apoio e encorajamento de cada um de vocês, essa jornada acadêmica teria sido muito mais desafiadora.

Primeiramente, agradeço a Deus por me manter determinada e por me dar forças para enfrentar os obstáculos que surgiram ao longo deste percurso. A meus queridos pais, Altemir e Tania, dedico uma gratidão especial. Vocês são minha base, meu porto seguro e meus exemplos de vida. Suas palavras de incentivo e amor incondicional foram fundamentais para eu me tornar a pessoa que sou hoje. Agradeço também ao meu irmão, Rafael, por ser uma inspiração para mim. Sua admiração e apoio foram essenciais para minha jornada acadêmica e pessoal.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) merece meu agradecimento por fornecer um ambiente propício para o desenvolvimento acadêmico. Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) e à secretaria por me proporcionarem oportunidades e agregar conhecimentos valiosos em minha trajetória acadêmica. Um agradecimento especial é direcionado ao meu orientador, Michael Mannich. Sua paciência, dedicação e incentivo foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa. Suas orientações e visão crítica me ajudaram a amadurecer academicamente.

Não posso deixar de mencionar meu colega Pedro Grochocki. Sua colaboração foi imprescindível para a realização das medições e também na montagem e programação da câmara utilizada nesta dissertação.

Além disso, agradeço a todos os meus colegas e amigos que estiveram presentes durante esta etapa. Seus incentivos e apoio foram inestimáveis, tornando essa jornada mais significativa e gratificante. Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho, meu sincero agradecimento. Essa conquista não seria possível sem vocês

Rutelle Rodrigues Amiz

Curitiba, Outubro 2023

RESUMO

As câmaras flutuantes utilizadas na medição de fluxo de CO₂ na interface água-ar, têm sua origem na crescente necessidade de compreender as trocas de gases entre a atmosfera e os corpos d'água. Inicialmente, eram dispositivos simples construídos com materiais acessíveis, como polímeros, vidro ou metal. Posteriormente, evoluíram com a inclusão de colares flexíveis e extensões de parede para aprimorar a precisão das medições. Nesta pesquisa, realizou-se uma comparação das medições de fluxos de CO₂ na interface água-ar em condições de campo, empregando duas variações de câmaras: uma equipada com um colar flexível e outra com extensão de parede. Os objetivos específicos que orientaram a pesquisa incluíram a proposição de recomendações para otimizar o uso de câmaras na medição de fluxos de CO₂ na interface água-ar, levando em consideração as vantagens e limitações de cada tipo de câmara. Além disso, buscou-se quantificar as diferenças nos valores de fluxos de CO₂ obtidos pelas câmaras com colar flexível e com extensão de parede, com o propósito de identificar discrepâncias entre esses dois métodos. A pesquisa envolveu experimentos de campo em ambiente aquático, a fim de compreender o desempenho relativo das câmaras em diferentes condições. Os resultados destacaram as implicações práticas dessas diferenças nas medições de fluxo de CO₂, oferecendo uma base sólida para o aprimoramento da instrumentação utilizada em estudos de trocas de gases nessa interface.

Palavras-chaves: Câmaras flutuantes, desenvolvimento, gases do efeito estufa, água-ar.

ABSTRACT

Floating chambers used for measuring CO₂ flux at the water-air interface have their origins in the growing need to understand gas exchange between the atmosphere and bodies of water. Initially, these were simple devices constructed from readily available materials such as polymers, glass, or metal. Subsequently, they evolved with the inclusion of flexible collars and wall extensions to enhance measurement accuracy. In this research, a comparison of CO₂ flux measurements at the water-air interface under field conditions was conducted using two chamber variations: one equipped with a flexible collar and the other with a wall extension. Specific research objectives included proposing recommendations for optimizing chamber usage in CO₂ flux measurements at the water-air interface, considering the advantages and limitations of each chamber type. Additionally, efforts were made to quantify differences in CO₂ flux values obtained by chambers with flexible collars and wall extensions, with the purpose of identifying discrepancies between these two methods. Field experiments in aquatic environments were conducted as part of the research to understand the relative performance of chambers under varying conditions. The results highlighted the practical implications of these differences in CO₂ flux measurements, providing a solid foundation for enhancing the instrumentation used in gas exchange studies at this interface.

Key-words: Floating chambers , development, greenhouse gases, water- air.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esboço do método de medição do fluxo de gases por seringa	21
Figura 2 – Esboço do método de medição do fluxo de gases por sensores automáticos	22
Figura 3 – Funcionamento interno da câmara flutuante	23
Figura 4 – Gráfico dos fluxos concentração x tempo	26
Figura 5 – Sensor K30 10.000 ppm	31
Figura 6 – Mapa de localização das medições	36
Figura 7 – Resultado final da câmara flutuante sem o colar	37
Figura 8 – Resultado final da câmara flutuante sem o colar	38
Figura 9 – Resultado final da câmara flutuante com o colar flutuante	38
Figura 10 – Teste da câmara	40
Figura 11 – Exemplo do teste nº1 - Câmara sem o colar	41
Figura 12 – Exemplo do teste nº1 - Câmara com o colar	41
Figura 13 – Relação do fluxo com a velocidade do vento (m/s)	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de câmaras flutuantes	22
Tabela 2 – Resultado final dos testes	42
Tabela 3 – Razão entre C e P - Medição 1	43
Tabela 4 – Razão entre C e P - Medição 2	43
Tabela 5 – Razão entre C e P - Medição 3	44
Tabela 6 – Razão entre C e P - Medição 4	44
Tabela 7 – Razão entre C e P - Medição 5	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PPGEA Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

UFPR Universidade Federal do Paraná

CH₄ Metano

CO₂ Dióxido de carbono

C Câmara com colar

P Câmara sem colar

M Massa de gás

q Taxa de fluxo

k velocidade de transferência

GEE Gases de Efeito Estufa

u velocidade média do vento

CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO	12
2	Objetivos	14
2.1	Objetivos gerais	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	Revisão Bibliográfica	15
3.1.1	Mudanças climáticas e gases do efeito estufa	15
3.1.2	Medição de gases em lagos e reservatórios	16
3.1.3	Transferências de gases na interface água-ar	18
3.1.4	Câmaras Flutuantes	19
3.1.5	Balanco de massa na câmara flutuante	24
3.1.6	Concentração de fluxos e gases nas câmaras	25
3.1.7	Câmaras Flutuantes no Brasil e no Mundo	26
3.1.8	Turbulência	28
3.1.9	Desafios de pesquisa com as câmaras flutuantes	29
4	MÉTODOS	31
4.1	Materiais e Métodos	31
4.1.1	Método dos sensores	31
4.1.2	Descrição das câmaras flutuantes	32
4.1.3	Operação das câmaras	34
4.1.4	Cálculo do fluxo do gás	34
4.1.5	Área de estudo	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Resultados	37
5.1.1	Componentes das câmaras flutuantes	37
5.1.2	Testes	38
5.1.3	Análise dos dados	40
6	CONCLUSÃO	46
6.1	Conclusão	46
7	REFERÊNCIAS	47

Apêndices	54
APÊNDICE A APÊNDICES	55
A.1 Medição 1	55
A.2 Medição 2	56
A.3 Medição 3	57
A.4 Medição 4	58

1 INTRODUÇÃO

A velocidade e a magnitude das mudanças no sistema climático da Terra, especialmente quando associadas a uma variedade de ações antrópicas prejudiciais ao planeta, tornaram-se objetos de preocupação científica e da política internacional (MORAIS et al., 2017). O aquecimento global é caracterizado por aumentos de temperatura da média global, que podem ser causados por processos dentro do sistema atmosférico ou mesmo por influências externas, como resultado de ações antrópicas (FREITAS et al., 2015). Em relação a isso, os modelos climáticos projetam que nas taxas atuais de crescimento populacional e emissões de gases de efeito estufa, as temperaturas da superfície terrestre podem aumentar para diferentes cenários entre 1,6°C e 5,8°C até o final deste século (PRASAD et al., 2017).

Louis et al. (2000) estima que as emissões de CO₂ em reservatórios são equivalentes a 4% das emissões antrópicas globais totais de CO₂, enquanto as emissões de CH₄ dos reservatórios representam aproximadamente 20% das emissões antropogênicas globais. Os fluxos de gases de efeito estufa em ambientes aquáticos são medidos usando uma variedade de técnicas (câmaras flutuantes, equações paramétricas de fluxo, método das covariâncias turbulentas, métodos acústicos e método de funis) que fornecem vários graus de cobertura espacial e temporal do local onde irá se aplicar o método (LOUIS et al., 2000). Muitas técnicas comumente usadas para medir as emissões de gases de efeito estufa no ambiente aquático, estão focadas na quantificação do fluxo difusivo de gás na interface água-ar (DEEMER et al., 2016). Há uma carência de pesquisas direcionadas as dificuldades metodológicas na observação do fenômeno de troca na interface água-ar, a interação entre a superfície da água e a atmosfera que oferecem oportunidade para aprimoramentos (SÁ, 2017).

Em relação aos métodos mencionados anteriormente, o mais utilizado normalmente é a câmara flutuante, que é amplamente empregada para determinação direta do fluxo de difusão de CO₂ na interface água-ar. Essas câmaras tem sido utilizadas frequentemente nos últimos anos, para medir o fluxo de gás em rios, reservatórios e lagos (BEAULIEU et al., 2012; CRAWFORD et al., 2013; PODGRAJSEK et al., 2014; LORKE et al., 2015b). No entanto, a taxa de fluxo medida pelo método da câmara flutuante pode ser significativamente desviada porque a própria é um método de monitoramento de fluxo de ar invasivo, que perturba o gradiente de concentração entre ar e água e a turbulência na interface água-ar (MANNICH, 2013; GRINHAM et al., ; SAMIOTIS et al., 2018).

Há algumas controvérsias sobre a precisão da medição da câmara sob determinadas condições (MATTHEWS et al., 2003; VACHON et al., 2010), e para analisar isso,

foram conduzidos alguns testes para avaliar a eficácia das câmaras em ambientes rasos, turbulentos e com água corrente (COLE et al., 2010; LORKE et al., 2015a). Muitos estudos abordam sobre o uso da câmara por ser um método mais barato e mais simples. Existem várias abordagens sobre essa mesma técnica, Bastviken et al. (2015) produziram uma câmara flutuante onde era necessário sempre que iniciasse uma nova medição levantar durante 5 minutos a câmara utilizada, para que ocorresse a ventilação. Bastviken et al. (2015) fizeram algumas alterações na câmara utilizada na pesquisa, adicionaram uma ventilação mecânica no espaço superior da câmara, usando uma bomba de ar e um temporizador de regulação passiva, para analisar o excesso de pressão do ar, assim não sendo necessário a manutenção manual da câmara. E em relação a turbulência, Vachon et al. (2010) analisaram a sua relação com a velocidade de transferência de gás em água doces e suas implicações nas trocas gasosas.

Algumas observações são feitas em relação ao uso da câmara flutuante e potenciais influências nas medições, como as paredes da mesma, a saturação do gás e a perturbação da camada limite. Lorke et al. (2015a) mostraram algumas sugestões em sua pesquisa para futuros aprimoramentos no método da câmara flutuante, que inclui: (I) as câmaras ancoradas aumentam a turbulência, fazendo com que o fluxos de gases sejam superestimados; (II) as câmaras à deriva têm um impacto muito pequeno na turbulência da água, assim, produzem medições mais confiáveis; (III) a concentração das câmaras ancoradas depende muito do design da câmara e das condições de amostragem; e (IV) um método muito interessante e promissor para reduzir o viés das câmaras ancoradas é usando um colar flexível de material resistente para vedar as paredes da câmara, ao invés de extensão das paredes de câmara rígidas penetrando dentro da água. Essa última abordagem não foi verificada experimentalmente, mas por meio de simulações.

Neste contexto, há oportunidades de aprimoramentos de abordagens e técnicas para estudar a emissão de CO₂ em reservatórios, rios e lagos. O método de câmara flutuante ainda necessita de ajustes, demandando a consideração das recomendações propostas por pesquisadores especializados na área, visando otimizar a eficiência da câmara e aproximá-la do modelo ideal.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal desta pesquisa é realizar uma comparação das medições de fluxos de CO₂ na interface água-ar em condições de campo entre câmara com colar flexível e câmara com extensão de parede.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos que norteiam a pesquisa são os seguintes:

- Propor recomendações para otimizar o uso de câmaras na medição de fluxos de CO₂ na interface água-ar, considerando as vantagens e limitações de cada tipo de câmara.
- Quantificar as diferenças nos valores de fluxos de CO₂ obtidos pelas câmaras com colar flexível e com extensão de parede para identificar as discrepâncias entre os dois métodos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E GASES DO EFEITO ESTUFA

Um dos principais assuntos dos debates atuais da comunidade científica mundial diz respeito às mudanças climáticas. Essa preocupação toda está relacionada com os impactos que as alterações climáticas provenientes das diversas atividades humanas podem causar no meio ambiente, principalmente os efeitos dos extremos climáticos, que se tornam cada vez mais frequentes (SOUZA; AZEVEDO, 2009).

As mudanças climáticas, bem como suas causas e consequências, representam um dos principais desafios que a sociedade enfrenta no século XXI (MARTIN et al., 2016). Esse fenômeno está diretamente associado às emissões antrópicas de GEE (GENEVA, 2013). Por essa razão, cada vez mais países têm procurado aumentar a eficiência de suas atividades produtivas, para garantir a redução de emissões desses gases (ZHANG et al., 2016). Os principais GEE são o vapor d'água, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CO_4) e o óxido nitroso (N_2O) (LOPES, 2017; BANCO MUNDIAL, 2010).

Os GEEs representam menos de 1% dos gases que compõem a atmosfera. O vapor d'água embora esteja em maior quantidade presente na atmosfera, sendo considerado o mais importante GEE, é pouco afetado pelas atividades antrópicas. Por outro lado, o CO_2 , o CH_4 e o N_2O são muito influenciados por elas e considerados os mais importantes relacionados ao efeito estufa (LOPES, 2017; SAEFL, 1997).

Em agosto de 2021 foi divulgada a contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6). O capítulo 3, intitulado "Impacto humano no sistema climático", realizou uma avaliação quantitativa da influência humana no sistema climático, considerando a representação do clima médio observado, suas mudanças e variabilidade. Ao combinar as evidências de todo o sistema climático, ficou claramente demonstrado que a influência humana resultou no aquecimento da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre. Porém, permanecem incertezas na quantificação da influência humana em indicadores de mudança climática em larga escala na atmosfera, oceano, criosfera e na superfície terrestre. A limitação inclui a brevidade dos registros observacionais, baixo desempenho do modelo e compreensão limitada do processo (TING; YING, 2021).

3.1.2 MEDIÇÃO DE GASES EM LAGOS E RESERVATÓRIOS

Reservatórios são corpos de água que preenchem vales e rios que foram barrados pelo homem para fins específicos. Os reservatórios se diferenciam dos lagos em alguns quesitos, principalmente por possuírem no geral bacias hidrográficas maiores, com flutuação e hidrodinâmica variáveis de níveis controlado pelo homem. Os sedimentos que ficam no fundo dos reservatórios são provenientes do rio barrado e da vegetação local que foi inundada, que indica a interferência da bacia hidrográfica e das atividades humanas na quantidade e qualidade do sedimento. Esses corpos d'água possuem processos microbiológicos de produção e consumo de gases de efeito estufa parecido com os de lagos, devido à estrutura (TUNDISI, 2000).

No sedimento de lagos e reservatórios a decomposição por vias aeróbias necessita da concentração de oxigênio dissolvido. Então assim que é consumido totalmente, o processo de decomposição passa a ser regido por meios anaeróbios. A decomposição anaeróbia promove a produção de ácidos orgânicos, os quais são decompostos formando CO_2 e CH_4 . Nestes ambientes, o nitrogênio gasoso N_2 também é gerado pela decomposição de aminoácidos e desnitrificação (SANTOS et al., 2005).

A localização geográfica, tipo de vegetação do entorno, temperatura, sazonalidade, tamanho, profundidade do reservatório, profundidade da tomada de água das turbinas, operação da barragem e outros fatores, contribuem para que haja uma ampla variação nas emissões por reservatórios. Adicionalmente, essas condições influenciam no ciclo biogeoquímico do reservatório, que determinam o padrão de emissão de um reservatório ao longo do tempo.

O metano e o dióxido de carbono são os dois principais gases de efeito estufa associados aos reservatórios de usinas hidrelétricas. Os gases emitidos pelos reservatórios se originam da decomposição de três fontes: da biomassa original inundada, da biomassa formada pelo processo de fotossíntese nas águas do reservatório, e da matéria orgânica proveniente da bacia de drenagem do reservatório. A decomposição diminui progressivamente a quantidade de biomassa inundada, e a proporção da sua contribuição para a emissão de gases diminui com o tempo, sendo a maior contribuição gerada nos primeiros três anos depois da inundação (ABRIL et al., 2005).

As metodologias internacionalmente aceitas para elaboração de inventários nacionais de emissões e remoções antropogênicas de GEE no caso da avaliação de emissões de CO_2 e CH_4 de áreas inundadas, fornecem apenas bases para desenvolvimentos metodológicos futuros, refletindo a limitação da informação científica disponível no tema. No atual estado, tem-se a base científica, mas ainda assim algumas lacunas precisam ser preenchidas, como entender os detalhes e como quantificar todos os resultados, esse é o grande desafio que devem ser considerados nas definições estratégicas de políticas energéticas,

legislações e regulamentações (EGGLESTON et al., 2006).

A medição do dióxido de carbono (CO_2) em lagos é um tópico importante para entender o ciclo global desse gás de efeito estufa e seu impacto nas mudanças climáticas. A turbulência e a interface água-ar desempenham um papel crucial nesse contexto (KORTELAINEN et al., 2006).

Compreender a medição do CO_2 em lagos é fundamental para avaliar o papel desses ecossistemas no ciclo global do carbono e nos processos climáticos. Essas informações são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de mitigação das mudanças climáticas e para a gestão sustentável dos recursos hídricos (BATTIN et al., 2008)

A turbulência na água dos lagos resulta de processos como ventos, correntes e atividades biológicas. Ela influencia a taxa de troca de gases entre a água e a atmosfera, afetando diretamente as concentrações de CO_2 . A turbulência aumenta a mistura da água superficial com as camadas mais profundas, promovendo o aumento da transferência de CO_2 dissolvido na água para a atmosfera e vice-versa (DELSONTRO et al., 2018).

A interface água-ar é o local onde ocorre a troca de gases entre o ambiente aquático e a atmosfera. Nessa região, a diferença nas concentrações de CO_2 na água e no ar impulsiona o processo de difusão. O CO_2 dissolvido na água se difunde para a atmosfera, enquanto o CO_2 atmosférico se dissolve na água. A taxa de difusão depende de vários fatores, incluindo a velocidade do vento, a temperatura da água e a concentração de CO_2 na atmosfera (COLE et al., 2007; RAYMOND et al., 2013).

A medição precisa do dióxido de carbono (CO_2) em lagos requer a consideração desses fatores e o uso de técnicas adequadas. Normalmente, sensores e equipamentos de amostragem são empregados para determinar a concentração de CO_2 dissolvido na água e na atmosfera.

A medida da concentração de CO_2 tanto no ar quanto na água, pode ser quantificada com grande precisão por vários métodos. Vários estudos têm sido realizados em laboratório, uma vez que estes ambientes oferecem condições de estudo controladas, tentando entender os processos envolvidos nesta troca e as relações da turbulência (principalmente a velocidade do vento) na interface ar-água (BROECKER; PENG, 1974; LISS, 1973; OCAMPO-TORRES et al., 1994). No entanto, estas informações não podem ser quantitativamente transferidas para os ambientes naturais.

Estudos sugerem que, em lagos e oceanos, a fonte dominante de turbulência na camada limite da água, que afeta o coeficiente de troca, é a velocidade do vento (BROECKER; PENG, 1974; LISS, 1973; CRUSIUS; WANNINKHOF, 2003). Assim, relações empíricas baseadas na velocidade do vento têm sido usadas para a determinação de k nestes ambientes.

Três métodos principais são geralmente usados para estimar o fluxo de gases bio-

geoquímicos do CO₂ na interface água-ar: técnicas micrometeorológicas (como gradiente e técnicas de covariância de turbulência), estimativas baseadas nas equações paramétricas do modelo de difusão e câmaras flutuantes. Cada um desses métodos possui vantagens e desvantagens inerentes, que na verdade são complementares, pois suas características estão relacionadas a custo, logística e resolução temporal e espacial (LAMBERT; FRÉCHETTE, 2005a).

3.1.3 TRANSFERÊNCIAS DE GASES NA INTERFACE ÁGUA-AR

A Lei de Henry define que a solubilidade de um gás em um líquido é diretamente proporcional à pressão parcial do gás. O efeito causado pela redução da pressão é grande e imediato, mas requer um curto período de tempo para que o Princípio de Le Châtelier se estabeleça e a temperatura se reequilibre (FEARNSIDE, 2004).

Em áreas afastadas da interface água-ar, a turbulência domina o transporte dos gases. Porém, perto da camada limite, a viscosidade da água enfraquece o movimento turbulento, levando ao desenvolvimento de camadas-limites (ou sub-camadas) viscosas em ambos os lados da interface água-ar. Essas camadas dominadas pelo processo de difusão molecular promovem resistência à transferência de gás, formando assim um gradiente de concentração (MANNICH, 2013).

Para gases extremamente solúveis, ou aqueles que reagem com a água, a camada-limite atmosférica promove a maior resistência à migração, enquanto para gases insolúveis, a migração através da subcamada aquática é o processo limitante. Muitos gases biogeoquímicos, como por exemplo, CO₂, O₂, CH₄, N₂O, se classificam nesta categoria, de forma que do ponto de vista prático a camada-limite atmosférica pode ser ignorada (JÄHNE, 1987; CRUSIUS; WANNINKHOF, 2003; UPSTILL-GODDARD, 2006).

A magnitude do coeficiente de transferência é determinada pela difusão através da camada limite que varia espacial e temporalmente e cuja espessura é função da turbulência próxima à superfície e da difusão molecular. O aumento da turbulência diminui a espessura da camada limite e amplia o coeficiente de transferência (ZAPPA et al., 2003).

A troca gasosa entre a água e a atmosfera é controlada pelas pressões parciais do gás no ar e na água e pela quantidade de troca de energia turbulenta na interface água-ar. Essa troca física é em geral chamada de velocidade de transferência k (COLE et al., 2010). A determinação do valor de k para um reservatório ou lago não é trivial, e normalmente esse valor é estimado empiricamente com base na velocidade do vento (GÅLFALK et al.,). No entanto, além dessas relações empíricas estarem disponíveis para apenas alguns sistemas, sabe-se que k depende de muitos fatores além da velocidade do vento, como convecção, correntes, presença de surfactantes e precipitação, sendo preferível, portanto, que o valor de k seja medido diretamente para cada sistema específico. Nesse aspecto, as

câmaras flutuantes configuram-se como uma boa opção de medição direta (COLE et al., 2010; GÁLFALK et al.,).

3.1.4 CÂMARAS FLUTUANTES

A solubilidade dos gases na água depende da temperatura e da pressão. Para que se garanta o equilíbrio da pressão dentro e fora do ambiente da câmara, a válvula no topo da câmara precisa ser instalada e fechada antes de iniciar as medições (KREMER et al., 2003). Conforme Duchemin et al. (1999), a temperatura é um parâmetro importante, e suas mudanças podem ser um problema para as medições, porque podem alterar a pressão, o gás, a sua solubilidade e difusividade. Para evitar mudanças de temperatura nas câmaras, as superfícies são geralmente cobertas com um material isolante e refletivo (LAMBERT; FRÉCHETTE, 2005a; KREMER et al., 2003).

Matthews et al. (2003) apontam alguns aspectos físicos ao lidar com as medidas da câmara, tais como: (i) criação de um microambiente estagnado para evitar a ação do vento, chuva e outros fatores que afetam a camada limite água-ar, (ii) mudanças do gradiente de concentração de gás na camada água-ar devido à alteração da concentração da câmara durante a medição, (iii) intrusão de ar atmosférico sob condições de vento, e (iv) pressão e temperatura, mudanças dentro da câmara, devido ao aquecimento ou resfriamento. Resultados semelhantes foram estudados para câmaras fechadas medindo fluxos de CO₂ na interface solo-ar (KUTZBACH et al., 2007). As imprecisões nessas medidas eram principalmente associadas a: (i) cálculos imprecisos do volume da câmara, (ii) escape de gás, (iii) acumulação de vapor de água, (iv) movimento interno devido à advecção (turbulência), (v) variações na concentração ou alterações no volume da câmara que impactam os gradientes de concentração. Essas considerações são levadas em conta na maioria das medições de interação ar-água.

Para avaliar as emissões de gases de efeito estufa de lagos e reservatórios artificiais, é muito comum o uso de câmaras flutuantes, que servem para estimar o fluxo de gás na interface água-ar da água superficial. Porém devido a própria câmara ser um método de monitoramento de fluxo de gás intrusivo com base na medição de mudanças de gradientes dentro da câmara, isso faz com que esse método seja muito sensível a turbulência (MANNICH et al., 2016).

Pesquisadores que utilizaram a câmara flutuante no oceano e em lagos foram os primeiros a questionar e testar a precisão de medições de fluxo de gases pela câmara flutuante (MATTHEWS et al., 2003; VACHON et al., 2010; MARTINSEN et al., 2020). Foi observado por Campeau and Giorgio (2014) que as câmaras provavelmente adicionavam viés às estimativas de fluxo em riachos, fazendo com que ocorresse a perturbação da superfície da água e uma crescente turbulência. Mas até o momento, poucos estudos ten-

taram quantificar este efeito ou incorporar no projeto da câmara (LORKE et al., 2015a; RIBAS-RIBAS et al., 2018).

A medição de fluxos de GEE por meio de câmaras flutuantes é muito utilizada em virtude de sua simplicidade construtiva e de amostragem, custo acessível e vantagens de logística. Porém, diversos estudos de (MATTHEWS et al., 2003; VACHON et al., 2010; LORKE et al., 2015a; ZHAO et al., 2015), indicam que são necessárias a definição e o uso de um modelo base de câmara que reduza ou elimine os efeitos adversos que as câmaras causam na turbulência da camada limite aquática na área de medição.

O método da câmara flutuante costuma ser a técnica mais aplicada para medição por causa de seu baixo custo, ter operação simples e ser de fácil implantação em vários locais. Isso aumenta a capacidade de obter medições pontuais em um curto espaço de tempo facilitando a cobertura espacial e aumentando a mobilidade de medições em comparação com outras técnicas (DUCHEMIN et al., 1999; RASERA, 2010; COLE et al., 2010). O modelo da câmara irá variar de acordo com o objetivo da pesquisa, mas deve-se ter cuidado para evitar possíveis erros: (I) a área de contato da câmara deve ser maior que o volume da câmara (KREMER et al., 2003); (II) a câmara deve ter um "respiradouro" para transmitir mudanças na pressão atmosférica e flutuações no volume interno da mesma. (LIVINGSTON; HUTCHINSON, 1995) (III) de acordo com o tipo de detecção de concentração de gás e o tempo de amostragem, é importante controlar a temperatura interna (BELANGER; KORZUN, 1991).

A câmara flutuante é um recipiente rígido, e o lado inferior que é aberto, cria um volume fixo de ar fechado hermeticamente e limitado na parte inferior pela superfície da água. Nesse método da câmara flutuante está incluso o monitoramento e a concentração do gás de interesse ao longo do tempo. A concentração de gás pode aumentar ou diminuir, dependendo da direção do fluxo. Por essa técnica também é estimada a taxa de fluxo de gás, e é possível fazer uma análise da taxa de variação da concentração de gás ao longo do tempo, levando em consideração a área da seção transversal da câmara em contato com a água e o volume do espaço dentro da câmara (STEPHENS, 1978; KREMER et al., 2003; RASERA, 2010).

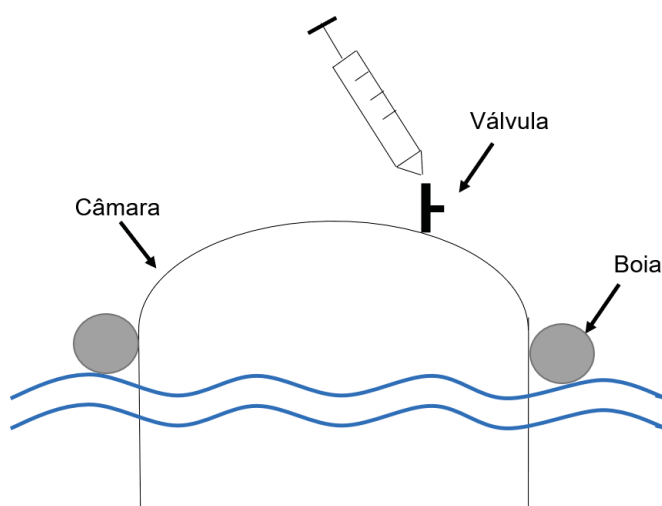
O método das câmaras flutuantes mede fluxos de CO₂ na mesma ordem de grandeza das medidas com a técnica de covariância turbulenta, segundo Podgrajsek et al. (2014). Em alguns momentos da pesquisa de Podgrajsek et al. (2014) foram observadas discrepâncias entre os resultados obtidos por ambos os métodos, devido ao fato de que as câmaras flutuantes em geral realizam medições por períodos curtos de tempo, o que as impede de detectar eventos isolados de fluxo elevado. Destaca-se que as câmaras flutuantes fornecem uma amostragem pontual, dificultando o estudo de gradientes espaciais de fluxo de GEE, enquanto a técnica das covariâncias turbulentas cobre uma área de amostragem de forma integral (PODGRAJSEK et al., 2014).

Além disso, a camada limite água-ar pode ser perturbada por mudanças de temperatura dentro da câmara o que causa mudança de pressão, assim também como alteração do gradiente de concentração dentro da câmara (CONEN et al., 2000). Existem alguns problemas comuns em metodologias de medição de fluxo de gás, independentemente se estiver usando uma câmara flutuante estática ou outros métodos. Esses problemas são (i) a captura de bolhas (geralmente bolhas de metano) emitidas a partir de sedimentos e (ii) a captura de ar atmosférico em condições de vento (DUCHEMIN et al.,).

O funcionamento da câmara flutuante ocorre encapsulando uma parte da superfície da água com uma câmara impermeável para medir a mudança na concentração de um gás de interesse dentro da câmara ao longo do tempo. A câmara é apoiada por dispositivos de flutuação na água ou suspenso diretamente sobre a água. Câmaras de diferentes projetos têm demonstrado produzir resultados diferentes (LAMBERT; FRÉCHETTE, 2005b), tornando o projeto da câmara uma importante variável.

Na câmara a concentração do gás de interesse pode ser medida de várias maneiras. As mais comuns são a coleta de gás na câmara por meio de seringas, onde a concentração é medida por cromatografia gasosa, em campo ou laboratório. E também existe o monitoramento contínuo por meio de bombeamento, onde o gás passa por um sistema de circulação fechado passando por um sensor automático que registra a informação (PARALOVO; MANNICH, 2017). A figura 1 ilustra um esquema da câmara flutuante pelo método de medição por seringas.

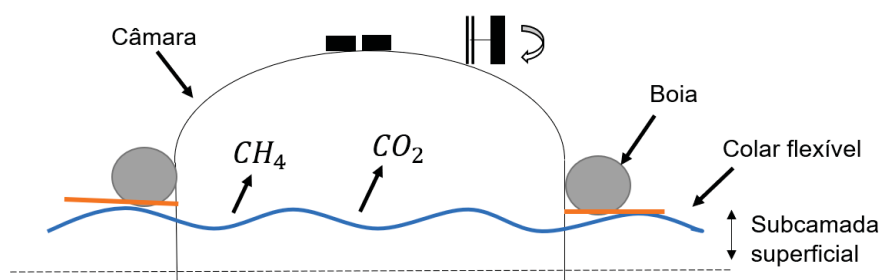
Figura 1 – Esboço do método de medição do fluxo de gases por seringa



De acordo com Lorke et al. (2015a), o método de medição por sensores automáticos tende a medir fluxos maiores do que os medidos por análise em laboratório, porém apresentam boa correlação. Por fornecerem um maior número de dados com maior facilidade e pelo processo ser rápido, considera-se os sensores automáticos mais adequados para estudos com câmaras flutuantes. Independentemente do método de medição, no entanto, é importante promover a homogeneidade do gás no interior da câmara. Para isso, um

pequeno ventilador pode ser instalado para garantir a mistura suficiente e não adicionar turbulência na câmara. Kremer et al. (2003) determinaram, que sob condições de vento moderado, não há diferença significativa entre medições com câmaras com ou sem ventilador. Em contrapartida, Rasesa (2010) obteve fluxos maiores em câmaras com ventilador em condições de laboratório, mas diferenças muito menores em experimentos de campo. Na figura abaixo é possível visualizar um esquema de como funciona a câmara flutuante pelo método de medição com sensores.

Figura 2 – Esboço do método de medição do fluxo de gases por sensores automáticos



Adicionalmente, alguns aspectos físicos que devem ser considerados nas medições com câmaras incluem: (I) criação de um microambiente estagnado que previne a ação do vento, chuva e outros fatores que afetam a camada limite na água e no ar, (II) mudanças de concentração no gradiente entre água e ar devido à alteração de concentração de gás na câmara, (III) captura de ar atmosférico em condições de ventos mais intensos quando a câmara pode sofrer ruptura/desconexão da água com as paredes e (IV) mudanças de pressão e temperatura no ambiente interno da câmara (MATTHEWS et al., 2003). A tabela 1 apresenta algumas características de câmaras flutuantes utilizada por alguns pesquisadores.

Tabela 1 – Características de câmaras flutuantes

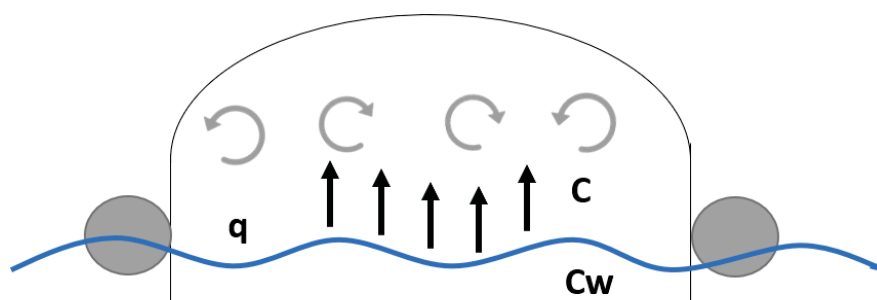
Autor	A (m ²)	V(L)	V (m ³)	A/V	Tempo (min)	Gases medidos
Araújo (2020)	0,04	9,4	0,01	4,04	5	CO ₂ , CO ₄ e N ₂ O
Bastviken et al. (2015)	0,07	7,5	0,01	9,45	6	CO ₂
Duc et al. (2020)	0,07	6,3	0,01	10,95	-	CO ₂ e CO ₄
Lorke et al. (2015a)	0,13	16,8	0,02	7,5	-	CO ₂ e CO ₄
Lorke et al. (2015a)	0,07	6,8	0,01	9,71	-	CO ₂
Junior et al. (2020)	0,09	-	-	-	-	CO ₂ e CO ₄
Rawitch et al. (2020)	0,04	5,73	0,01	6,11	-	CO ₂
Rawitch et al. (2020)	0,01	1,03	0	9,13	-	CO ₂
SÁ (2017)	0,08	8,6	0,01	9,3	-	CO ₂
Vachon et al. (2010)	0,1	23	0,02	4,35	10	CO ₂

Existem duas limitações principais do uso da câmara em água corrente causada pelo protótipo da câmara e suas condições: (I) a câmara pode superestimar o fluxo de riachos porque perturba a superfície da água, induz turbulência na água e quando há

ondas, elas podem "romper" o selo com a água e entrar por baixo (II) a câmara é difícil de se implantar em áreas onde há significativa turbulência, ou onde o riacho é estreito ou raso. Esses fatores podem causar subestimação dos fluxos de gás de riachos (RAWITCH et al., 2020).

A presença de um ventilador dentro da câmara permite assumir o gás como sendo homogeneamente distribuído (totalmente misturado). Se a concentração na água (C_W) for maior do que a concentração de equilíbrio dentro da fase gasosa, ou seja, a água sendo supersaturada por CO_2 , o gás concentrado C , dentro da câmara aumenta com o tempo por causa do gradiente de concentração criando uma massa de transferência de gás da água para a câmara, acumulando o gás na câmara. A mudança de concentração resultante na câmara cria condições instáveis e não lineares, interferindo nas medições. Da mesma forma, um comportamento oposto pode ser observado para concentrações de gases na água sendo inferior a concentração de equilíbrio e a redução do gás na câmara. Em outras palavras, a medida e o método alteram o processo a ser medido, pois cada mudança na concentração de gás difere das condições ambientais e realimentam os fluxos, mudando o gradiente de concentração entre a água e o ar dentro da câmara. Embora seja mencionado com frequência na literatura, falta uma análise detalhada sobre o assunto (MANNICH, 2013). Na figura abaixo é possível visualizar o esquema do funcionamento interno câmara flutuante.

Figura 3 – Funcionamento interno da câmara flutuante



Duchemin et al. (1999), Matthews et al. (2003), Eugster et al. (2003) perceberam que as medições com câmaras flutuantes, principalmente sob condições de ventos fracos, são superestimadas quando comparadas com resultados de equações paramétricas, com os métodos das covariâncias turbulentas e com o método da adição de traçados SF_6 (hexafluoreto de enxofre) (MATTHEWS et al., 2003). Atualmente Soumis et al. (2008), demonstraram que os resultados das câmaras superestimam os fluxos durante o dia e subestimam durante a noite. Já Demarty et al. (2009) constataram que o método das equações paramétricas da camada limite subestima o fluxo de CO_2 e CH_4 e superestima o efeito do vento em áreas de maior profundidade e subestima em áreas mais rasas.

De acordo com Belanger and Korzun (1991) as perturbações acontecem devido

ao efeito de bloqueio da câmara relacionado ao cisalhamento do vento na superfície da água e conseqüentemente reduz a turbulência e, influencia o gás na taxa de transferência. Também, [Frankignoulle et al. \(1996\)](#) perceberam que o estado da perturbação na turbulência aquática causado pela câmara é reduzido se estiver à deriva livremente, como um Drifter Lagrangiano. [Lorke et al. \(2015a\)](#) observaram maior troca gasosa de velocidades com câmaras ancoradas em comparação com câmaras á deriva e [Teodoru et al. \(2012\)](#) determinaram uma dependência linear da velocidade de transferência de gás na água em relação à câmara flutuante. Isso pode ser associado à desaceleração do fluxo, a penetração da câmara na água e, conseqüentemente a geração de turbulência devido ao derramamento de redemoinhos no colar submerso da câmara. O último foi observado para câmaras ancoradas em comparação com câmaras á deriva por [Frankignoulle et al. \(1996\)](#), [Lorke et al. \(2015a\)](#), [Teodoru et al. \(2012\)](#), mesmo com ventos fracos e ondas pequenas ([VACHON et al., 2010](#)).

3.1.5 BALANÇO DE MASSA NA CÂMARA FLUTUANTE

As principais preocupações relacionadas às medições da câmara flutuante ocorrem devido as perturbações induzidas pela própria câmara, que podem ser criadas na interface água-ar dentro da mesma ([KREMER et al., 2003](#); [COLE et al., 2010](#)). Essas perturbações estão relacionadas com as mudanças nas características da camada limite atmosférica, devido às restrições dos efeitos do vento na superfície, influenciando a velocidade de transferência do gás ([DUMESTRE et al., 1999](#)), no entanto, se considera as medidas realistas, desde que a camada limite aquática não seja afetada pela implantação da câmara, justificado pela taxa de renovação muito menor da camada limite aquática, em comparação com a camada limite atmosférica [Tokoro et al. \(2007\)](#), [Guérin et al. \(2007\)](#), [Repo et al. \(2007\)](#), [Soumis et al. \(2008\)](#) mostraram que as medições da câmara flutuante são consistentes com outras técnicas.

A alteração da massa de gás (M), no interior da câmara é definida pelo produto da taxa de fluxo (q) na interface água-ar e a área da seção transversal da câmara, A (L_2), na interface como:

$$\frac{dM}{dT} = q \cdot A \quad (3.1)$$

Fazendo a substituição da equação e tomando a massa no interior da câmara como o produto entre a concentração do gás C e o volume da câmara, V , constante, considera-se:

$$V \frac{dC}{dT} = K_L A H \left(\frac{C_W}{H} - C \right) \quad (3.2)$$

A condição inicial é $C(t = 0)$, onde C_0 é a concentração do gás no ar ambiente,

pois no começo das medições a concentração no ambiente interno é igual à concentração do ambiente externo. Assim, solucionando a equação inicial obtém-se:

$$C = \frac{C_W}{H} + (C_0 - \frac{C_W}{H} \exp(-\frac{K_L}{H} AVt)) \quad (3.3)$$

A equação agora pode ser apresentada de forma adimensional:

$$\frac{C}{C_0} = \alpha + (1 - \alpha) \exp(-t^*) \quad (3.4)$$

na qual:

$$t^* = \frac{k_L H A}{t} V \quad (3.5)$$

, e

$$\alpha = \frac{C_W}{H C_0}. \quad (3.6)$$

Na equação final é possível identificar a concentração adimensional na câmara como função do tempo adimensional (t^*) e α , que representa a razão entre a concentração na água e a concentração de equilíbrio com o ambiente gasoso, isto é, o grau de saturação do ambiente aquático. Se $\alpha > 1$, a água encontra-se supersaturada e se $\alpha < 1$, a concentração é inferior a de saturação.

No interior da câmara o volume gasoso é considerado homogêneo, devido à presença do ventilador. Se a concentração na água (C_W) for superior à concentração de equilíbrio com a fase gasosa a água encontra-se supersaturada de CO_2 , e a concentração do gás (C) no interior da câmara cresce com o decorrer do tempo devido à transferência de gás na superfície líquida e seu aprisionamento na câmara.

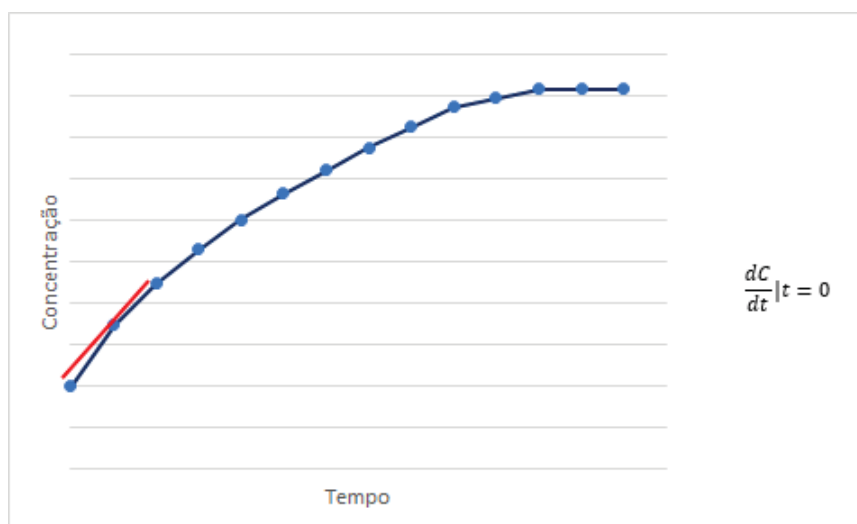
3.1.6 CONCENTRAÇÃO DE FLUXOS E GASES NAS CÂMARAS

Os fluxos dos GEE na superfície da água variam com o tempo, profundidade e outras diversas condições ambientais e meteorológicas (ventos e chuvas), que alteram as taxas de transferência de gases e, com as condições de descarga dos afluentes que alteram o tempo de residência das águas. Monitoramentos de longo prazo são necessários para contemplar essas variações naturais (ABRIL et al., 2005).

É importante que a câmara possua extensão das paredes abaixo da linha de água para evitar que a turbulência criada pelos movimentos da câmara sobre a água, apesar de ancorada ao fundo, afete a transferência dos gases. Além disso, uma abertura para regulação da pressão é necessária, pois o aumento da pressão aumenta a solubilidade do

gás, reduzindo o fluxo. Os efeitos da radiação devem ser contornados fabricando a câmara com material reflexivo, de modo a manter a temperatura interna em equilíbrio com o ambiente. Os gases são coletados em seringas e analisados por cromatografia gasosa (CG) em laboratório. Pode ser também realizada medição em tempo real com equipamento analisador de gases acoplado à câmara (LAMBERT; FRÉCHETTE, 2005a). Na figura abaixo é possível observar a concentração x o tempo, do fluxo.

Figura 4 – Gráfico dos fluxos concentração x tempo



3.1.7 CÂMARAS FLUTUANTES NO BRASIL E NO MUNDO

Na pesquisa de Samiotis et al. (2018) foram ressaltados alguns pontos importantes sobre as incertezas das câmaras flutuantes utilizadas que chamaram atenção. Foram três os principais fatores que contribuíram na incerteza das medições de fluxo pela câmara na pesquisa: (i) o volume ativo da câmara (sobre a superfície), (ii) o ar e temperatura na câmara, e (iii) a incerteza do instrumento. Nessa pesquisa, o fator que contribuiu significativamente na incerteza da medição foi o volume ativo da câmara, que afetou o cálculo de emissão de fluxo. Este volume pode variar dependendo das ondas, fluxo do vento e fluxo da água. Afim de minimizar este fator para contribuição na incerteza da medição, as amostragens foram realizadas em dias sem indução de ondas pelo vento. Todas essas informações devem ser levadas em conta na hora de construir a câmara, para que ela possua o melhor desempenho possível.

Em Queensland na Austrália um estudo (GRINHAM et al.,) foi realizado utilizando várias câmaras flutuantes para estimar a emissão de CH₄ em 22 corpos d'água, as taxas de emissões de CH₄ foram medidas através da implantação de 3 a 16 câmaras flutuantes por corpo d'água, cobrindo zonas periféricas e centrais. Os resultados deste estudo demonstraram que as lagoas são uma importante fonte de emissão de CH₄ em

Queensland, e provavelmente também globalmente. Sobre as características das câmaras dessa pesquisa, foram escolhidas câmaras flutuantes para capturar a ebulição e a difusão dos fluxos. Para o desenvolvimento das câmaras, nesse estudo seguiu-se as recomendações de Bastviken et al. (2015). Devido à sua leveza, as câmaras utilizadas se mostraram ideais para serem implantadas em lagoas, onde tanto o acesso ao local quanto os procedimentos podem representar desafios. Nesse contexto, foram realizadas medições contínuas ao longo de 24 horas (GRINHAM et al.,). No que diz respeito às incertezas da câmara, neste estudo foi destacada a presença de alta variabilidade espacial nas taxas de emissão dentro das lagoas. Essa observação ressalta a importância de garantir que as câmaras cubram a maior escala espacial possível durante uma campanha de medição.

No Brasil, muitas pesquisas estão se destacando com o uso das câmaras flutuantes, (MISKALO et al., 2020; ARAÚJO, 2020). A primeira pesquisa de Araújo (2020) é sobre a variação sazonal de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) no rio Tocantins, à jusante do reservatório da UHE de Tucuruí. O fluxo de CO_2 das águas do rio Tocantins foi mensurado in situ por meio da técnica da câmara flutuante. A câmara, com área superficial de $0,038 \text{ m}^2$ e volume de 9,4 litros, foi construída com uma bacia de polipropileno e coberta com uma manta asfáltica metalizada e refletora para evitar o aquecimento interno. Além disso, um “colar flexível” feito com polietileno expandido, foi fixado na borda da câmara a fim de manter a mesma flutuando sobre a água. Para determinação do fluxo in situ a câmara foi conectada a um analisador de gás por infravermelho (LiCor, modelo LI-820), interligado a um computador portátil, registrando em tempo real a concentração de CO_2 no interior da câmara (ARAÚJO, 2020).

Na outra pesquisa, realizada por Miskalo et al. (2020), que teve como objetivo desenvolver um robô para realizar análises de fluxos difusivos de CH_4 e CO_2 , utilizando uma câmara flutuante e GPS. O robô chamado Robo CO_2 era constituído de uma câmara de ar de pneu e um recipiente central. Estes elementos, permitiram ao robô flutuar, deslocar sobre a água e armazenar o fluxo de gases na câmara. O método utilizado para medir o fluxo de gases foi o de sensores. O modelo também contou com uma bússola para auxiliar a localização do GPS, para que o robô conseguisse se alinhar ao local sem precisar se transladar. As coletas foram realizadas em 2 pontos, e foram realizadas 4 coletas em cada ponto.

Analisando esses estudos pode-se perceber que estão sendo realizadas diversas pesquisas com o objetivo de melhorar o desempenho das câmaras no meio aquático e que esse tema ainda precisa ser muito discutido, para que se aproxime cada vez mais da sua melhor execução, com menos falhas possíveis.

3.1.8 TURBULÊNCIA

As câmaras flutuantes são dispositivos utilizados para quantificar o gases na em lagos/rios/reservatórios. Esses equipamentos consistem em estruturas flutuantes que permitem a coleta de amostras de água e medição direta do CO_2 dissolvido. A medição do CO_2 em lagos é importante para entender os processos de ciclagem de carbono e sua influência no equilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos. Além disso, o CO_2 dissolvido na água desempenha um papel crucial na acidificação dos lagos, afetando a vida aquática.

Existem diferentes tipos de câmaras flutuantes utilizadas para quantificar o CO_2 em lagos, como a câmara de fluxo fechado e a câmara de fluxo aberto. Ambas as câmaras são projetadas para permitir a coleta de amostras de água próxima à superfície e a medição do CO_2 dissolvido.

A câmara de fluxo fechado é hermeticamente selada, permitindo que a amostra de água seja isolada do ambiente externo. Dessa forma, a câmara pode ser mantida em condições controladas, como temperatura e luminosidade, durante a medição do CO_2 . Geralmente, sensores de CO_2 são utilizados para medir a concentração do gás dentro da câmara.

Já a câmara de fluxo aberto permite a circulação da água durante a medição. A água é coletada em um compartimento dentro da câmara, onde ocorre a medição do CO_2 . Esse tipo de câmara permite uma maior interação entre a água do lago e a atmosfera, refletindo condições mais próximas da realidade.

A turbulência afeta a medição do CO_2 nas câmaras flutuantes de diferentes maneiras. Em um ambiente turbulento, a mistura de água na superfície do lago é mais intensa, o que pode resultar em uma maior troca de CO_2 entre a água e a atmosfera. Isso pode levar a uma subestimação da concentração real de CO_2 dissolvido na água.

Para minimizar os efeitos da turbulência, várias estratégias podem ser adotadas. Uma delas é o uso de um colar ou anel fixado na abertura da câmara. Esse colar é projetado para criar uma barreira física entre a água e a atmosfera, reduzindo a troca de gases durante a medição. O colar ajuda a manter a amostra de água isolada da influência direta do ambiente turbulento (HOLGERSON et al., 2022).

Além do colar, outras abordagens podem ser empregadas para diminuir a turbulência e melhorar a precisão das medições de CO_2 . Isso inclui a escolha adequada do local de medição, preferencialmente em áreas mais protegidas e calmas do lago, onde a turbulência é reduzida. O uso de estabilizadores, como braços laterais, também pode ajudar a minimizar o impacto da turbulência nas medições (TEODORU et al., 2012).

3.1.9 DESAFIOS DE PESQUISA COM AS CÂMARAS FLUTUANTES

Uma pesquisa detalhada realizada por [Vachon et al. \(2010\)](#) revela o que é necessário levar em conta no momento da construção do protótipo da câmara. No estudo foi demonstrado que a turbulência abaixo da câmara à deriva é maior do que fora dela. Foi observado também pelos pesquisadores que a câmara induz turbulência, possivelmente pelas paredes da câmara abaixo da superfície da água. Com essa pesquisa também foi possível concluir que sob baixos níveis de turbulência do corpo d'água as câmaras superestimam o fluxo entre duas e até dez vezes, e em condições de alta turbulência, a superestimativa é de aproximadamente 50%. Isso quer dizer que, em regime de baixa turbulência, que é o que geralmente ocorre em reservatórios, os movimentos da câmara na superfície são mais importantes em virtude da turbulência adicional criada pela câmara demonstrar um papel importante.

Mais recentemente, [Lorke et al. \(2015a\)](#) realizaram testes em laboratório e em pequenos rios a fim de comparar a confiabilidade dos resultados fornecidos por câmaras ancoradas e à deriva. Seus resultados mostraram que as câmaras ancoradas geram turbulência adicional sob as câmaras e superestimam assim os fluxos reais. Em comparação, as câmaras à deriva forneceram resultados mais confiáveis, visto que induzem menos turbulência ([PARALOVO; MANNICH, 2017](#)).

[Crawford et al. \(2013\)](#), [McMahon and Dennehy \(1999\)](#) usaram a técnica de aerodinâmica (câmara em forma de canoa) ao invés de câmaras cilíndricas ou retangulares para minimizar a geração de turbulência induzida pela câmara na borda. No entanto, eles não forneceram evidências de que esse objetivo teria sido alcançado. Outra abordagem para minimizar o viés das câmaras ancoradas seria projetar câmaras sem rigidez, com paredes submersas. A submersão das bordas da câmara pode ser evitada completamente usando um pedaço de folha fina de plástico, que irá aderir à superfície da água para selar o espaço superior da câmara. As medições revelaram uma forte redução de distúrbios de fluxo induzidos pela câmara turbulência em comparação às câmaras ancoradas e à deriva. Essas câmaras "voadoras" requerem uma estrutura para manter a câmara acima da superfície da água, que pode ser suportada por flutuadores a uma distância lateral maior da câmara ou, em pequenos riachos, também por fixação na margem do rio.

A proposta para contornar o problema da turbulência induzida pelas paredes submersas da câmara em relação ao seu movimento, partiram da pesquisa de [Lorke et al. \(2015a\)](#). A ideia central é adicionar um colar flexível de material resistente, para garantir o fechamento do volume interno da câmara, evitando o contato com o ar externo, de modo que as mudanças de concentração no volume interno sejam apenas pelo fluxo na interface água-ar ao longo da área da câmara.

[Lorke et al. \(2015a\)](#) compararam o uso de câmaras ancoradas e à deriva livre em

vários riachos com diferentes velocidades de fluxo. O estudo claramente mostra que (i) câmaras ancoradas aumentam a turbulência sob as câmaras e, assim, elevam os fluxos, (ii) câmaras á deriva têm um impacto muito pequeno na turbulência da água e, assim, geram fluxos mais confiáveis, (iii) o viés das câmaras ancoradas depende muito do projeto da câmara e das condições de amostragem, e por fim, (iv) há um promissor método para reduzir o viés das câmaras ancoradas usando um colar de plástico flexível para vedar a câmara, ao invés das paredes rígidas das câmaras penetrarem na água. Foram realizados testes em laboratório com essa nova configuração de câmara ancorada com colar flexível, se obteve alguns resultados promissores. Apesar dos resultados em laboratório apontarem que essa configuração de câmara produz menos turbulência do que os tipos clássicos, não foram realizados experimentos com esse tipo de câmara em campo. Ao todo, esses resultados fornecem novas orientações sobre como aplicar câmaras de fluxo em reservatórios e lagos.

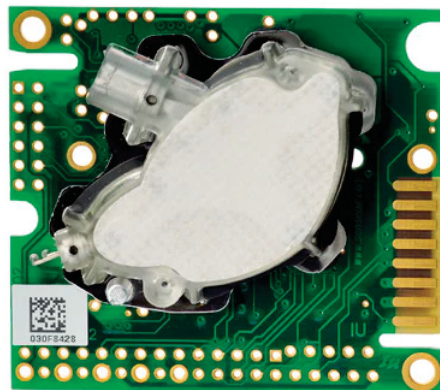
4 MÉTODOS

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1 MÉTODO DOS SENSORES

Para medir o fluxo de CO₂ utilizou-se o sensor K30 10.000 ppm, que foi projetado para ser integrado em diferentes dispositivos que requerem monitoramento de CO₂ em ambientes internos. No estudo atual, o circuito e os sensores utilizados foram reutilizados de uma pesquisa anterior conduzida por [Gabriel \(2022\)](#), nesse estudo, eles foram empregados em um equilibrador para a medição de gás CO₂. Abaixo é possível conferir uma Figura do modelo de sensor utilizado.

Figura 5 – Sensor K30 10.000 ppm



O sensor K30 foi selecionado após uma análise comparativa de vários modelos disponíveis e foi comprovado pela literatura científica como sendo confiável e apresentando bom desempenho uma vez calibrado. Ele possui uma faixa de medição de 0 a 10.000 ppmv, com precisão de ± 30 ppmv ou ± 3 Foram conduzidos testes laboratoriais para identificar problemas no funcionamento do equipamento, além de um teste de campo para avaliar os efeitos de um ambiente sem controle adequado de temperatura, umidade, pressão, chuva e radiação solar. Os testes laboratoriais revelaram problemas causados pela umidade relativa excessiva acumulada dentro do sensor, bem como perda de pressão devido à má vedação dos adaptadores fornecidos pelo fabricante do sensor de CO₂. Isso resultava na mistura do ar atmosférico ao redor do equipamento com o gás presente no equilibrador, alterando a concentração medida pelo ar ambiente. Além disso, foram observados problemas no fornecimento de energia, onde variações na tensão recebida pelo sensor causavam erros na leitura ([GABRIEL, 2022](#)).

Foi constatada uma oscilação nas leituras do sensor devido à variação da tensão do sistema durante a alimentação do sensor K30. Essa variação ocorria devido à instabilidade do fornecimento de energia do Arduíno. Para contornar esse problema, foi necessário alterar a configuração do sistema, alimentando o sensor com a mesma tensão que o Arduíno, mantendo uma tensão fixa de 12V e aterrando todos os componentes do sistema para manter um mesmo potencial.

A umidade do ar também causava interferência nas medições de CO₂, além de condensar na tubulação. Foi constatado por meio de testes laboratoriais, que a configuração recomendada pelo fabricante para filtragem de umidade, composta por um water-trap e um filtro hidrofóbico, não era suficiente para garantir o funcionamento ideal do sensor K30. Como solução, foi desenvolvido um sistema dessecador de 20 cm, preenchido com sílica, para ser instalado em série com o sistema fornecido pelo revendedor do sensor. Esse sistema dessecador tinha como objetivo estabilizar a umidade à qual o sistema estaria exposto (GABRIEL, 2022).

Devido ao encaixe do adaptador do fluxo de gás indicado pelo fabricante, o sistema não ficava completamente vedado, já que a peça era apenas posicionada e parafusada na cabeça do sensor. Para resolver esse problema, o sensor foi colocado em uma caixa hermética e vedada, com apenas uma entrada e uma saída para a tubulação. Essa vedação resolveu a contaminação externa e a perda de pressão no sistema. No entanto, a pressão poderia influenciar as medições do sensor. Para verificar essa variação, foram realizados testes para avaliar a influência da bomba nas medições. O sensor K30 foi posicionado ao lado de um ventilador e em um ambiente ventilado para medir a concentração de CO₂ atmosférico. O equipamento foi operado por 15 minutos para garantir a estabilização, e foram realizadas três medições a cada 15 segundos. A média dos resultados dos últimos dois minutos de medição foi considerada. O valor encontrado foi de 677,5 ppmv, enquanto os dados da NOAA (2022) indicavam um valor esperado em torno de 400 ppmv. Em seguida, o sensor foi acoplado à bomba e a medição foi repetida, resultando em um valor estabilizado de 924,3 ppmv. A solução para corrigir esses efeitos foi utilizar a calibração interna do sensor, que permite ajustar os valores para 0 ppmv, 400 ppmv e 800 ppmv, realizando um curto-circuito no switch do equipamento no momento da leitura (GABRIEL, 2022).

4.1.2 DESCRIÇÃO DAS CÂMARAS FLUTUANTES

Foram construídas duas câmaras flutuantes, uma das câmaras possui um colar flexível feito com um material resistente enquanto a outra não, sendo possível assim analisar a diferença dos dados que cada câmara irá obter, identificando se houve ou não alteração na medição de fluxo de CO₂. Os testes foram reproduzidos no mesmo ambiente tentando

manter as mesmas condições para que não houvesse a possibilidade de distorção no resultado. Os dois protótipos desenvolvidos possuem dimensões iguais, altura de 13,5 cm, volume de 0,0087 m³ e uma área de 0,0758 m². Por possuírem dimensões pequenas são de fácil logística.

As câmaras flutuantes deste estudo foram desenvolvidas para estimar o fluxo de CO₂, os protótipos desenvolvidos possuem estrutura simples e foram elaborados com materiais comumente encontrados, seguindo as dimensões típicas da literatura e as recomendações de [Lorke et al. \(2015a\)](#), [Paralovo and Mannich \(2017\)](#), [Bastviken et al. \(2015\)](#). A técnica da câmara flutuante é baseada na lei dos gases ideais e na pressão constante, onde a taxa de CO₂ no interior da câmara é proporcional a razão entre o volume e a área da câmara, e inversamente proporcional a temperatura do ar próximo a superfície da água.

O método da câmara flutuante avalia o fluxo dos gases pela análise das taxas de acumulação ou decaimento da concentração ao longo do tempo. O fluxo é calculado com base na área da seção transversal da câmara em contato com a água, no volume do espaço interno da câmara, e na mudança de concentração do gás na câmara ([ABRIL et al., 2005](#); [GOLDENFUM, 2009](#)).

As câmaras funcionam da seguinte forma: primeiro o gás misturado com a água passa pelo filtro para gotas grandes de água, após passa pela sílica para secar as gotículas, após passar pela sílica o gás passa pelo filtro hidrofóbico para impedir a sílica de passar, novamente passa pela sílica para garantir que toda a umidade foi eliminada do sistema (no sistema a umidade cai de 90 para 70, por causa da sílica que diminui a umidade), pela diminuição da umidade o sensor consegue funcionar corretamente, pois a umidade máxima que ele consegue detectar é 85. Após passar por mais dois filtros o gás entra no sensor k30, depois sai, vai para a bomba e volta para a câmara, fazendo assim a recirculação do gás.

A situação mais frequente de medições reportada na literatura é com a câmara ancorada ou fixa em uma posição por outros meios e em muitos trabalhos é apenas citado que a medição é pontual e supõe-se que é uma medição fixa. Mas, segundo ([FRANKIGNOULLE et al., 1996](#)), o sistema ancorado aumenta a turbulência devido aos vórtices formados pelo escoamento nas paredes da câmara. As paredes da câmara abaixo d'água criam turbulência artificial porque a câmara move-se constantemente, mesmo sob condições de baixos ventos e ondas pequenas ([VACHON et al., 2010](#)). De acordo com ([FRANKIGNOULLE et al., 1996](#)) o erro estimado é aproximadamente 25%, sem, contudo, demonstrar a obtenção desta estimativa. [Matthews et al. \(2003\)](#) determinaram a importância da extensão de paredes na câmara abaixo do nível da água (submergência-S), cuja ausência promove emissões maiores do que aquelas comparadas com a presença das paredes.

As taxas de fluxo de água em corpos d'água eram mínimos/ausente e as câmaras

não foram ancoradas e, portanto, livre para flutuar, conforme recomendado por [Lorke et al. \(2015a\)](#).

4.1.3 OPERAÇÃO DAS CÂMARAS

A operação das câmaras em ambiente aquático seguiu a seguinte ordem, as câmaras foram utilizadas uma de cada vez, intercalando as medições entre elas, o procedimento realizado foi o mesmo nas duas. O primeiro passo foi conectar a câmara as mangueiras e por alguns minutos (de 1 a 3 minutos) elas foram deixadas no solo para garantir que o ar atmosférico entrasse dentro das mangueiras, após isso a câmara era desligada e a mangueira conectada a caixa com o sensor, então a câmara era colocada na água e a caixa com o equipamento eletrônico ligada para realizar as medições.

Os dados coletados pelos sensores foram armazenados em um cartão de memória para facilitar a leitura de dados. Os dados foram programados de maneira relativamente simples, para que a coleta das informações fosse de fácil compreensão.

As medições ocorreram entre os meses de setembro de 2022 e maio de 2023, durante as medições o tempo influenciou nos resultado dos dados coletados, em alguns dias estava chovendo, em outros o vento estava mais forte e isso pode ocasionar uma alteração no resultado final. Além disso alguns testes realizados foram descartados, devido ao resultado obtido ser inconsistente, demonstrando que as câmaras apresentaram não estar calibradas corretamente, os testes foram realizados com o tempo de 10 minutos para cada câmara.

4.1.4 CÁLCULO DO FLUXO DO GÁS

O estudo do fluxo de gases na interface água-ar envolve a compreensão dos processos de transferência de gases entre a água e a atmosfera. Esse fenômeno é governado pela Lei de Fick, que descreve a difusão molecular como o principal mecanismo de transferência de gases nessa interface.

A Lei de Fick estabelece que o fluxo de um gás é proporcional ao gradiente de concentração e à área de transferência. Isso significa que a taxa de fluxo de um gás na interface água-ar será maior quanto maior for a diferença de concentração entre a água e o ar, e quanto maior for a área disponível para a transferência. No caso específico da interface água-ar, a área de transferência (A) é frequentemente utilizada para representar a superfície onde ocorre a troca de gases. Assim, a equação da Lei de Fick para a interface água-ar pode ser escrita como:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{\Delta}{A} \quad (4.1)$$

Onde:

- F é o fluxo de gás na interface água-ar
- Δ coeficiente de difusão do gás na água A área de transferência entre a água e o ar

Essa equação descreve como o fluxo de gás é influenciado pela difusão do gás na água, pela área de transferência entre a água e o ar e pelo gradiente de concentração do gás na interface.

A quantificação do fluxo de gases na interface água-ar é essencial para entender os ciclos biogeoquímicos e as interações entre os ecossistemas aquáticos e a atmosfera. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas e utilizadas para medir e estimar o fluxo de gases, como câmaras de fluxo, técnicas micrometeorológicas e sensores específicos para gases. As câmaras de fluxo consistem em estruturas que são colocadas na superfície da água, permitindo a medição direta do fluxo de gases. Essas câmaras são projetadas para minimizar as perdas de gás para o ambiente e permitir a coleta de amostras representativas. As técnicas micrometeorológicas são baseadas na medição das trocas de gases na interface água-ar utilizando sensores de fluxo e medições de velocidade e direção do vento. Essas técnicas levam em consideração o efeito da turbulência e das condições atmosféricas na transferência de gases.

Além disso, sensores específicos para gases têm sido desenvolvidos para fornecer medições precisas e contínuas das concentrações de gases na água e no ar. Esses sensores permitem monitorar o fluxo de gases ao longo do tempo e avaliar as variações sazonais e diurnas. Em resumo, o estudo do fluxo de gases na interface água-ar é fundamental para compreender os processos biogeoquímicos e as interações entre os ecossistemas aquáticos e a atmosfera. A aplicação da Lei de Fick e o uso de técnicas e sensores específicos permitem a quantificação e o monitoramento preciso desses fluxos, contribuindo para a compreensão dos ciclos de gases e o manejo sustentável dos recursos hídricos.

Nessa pesquisa, para realizar o cálculo do fluxo de CO_2 nas câmaras flutuantes foi utilizado o método que envolve a determinação da taxa de variação da concentração de CO_2 ao longo do tempo. Utilizando a derivada dos pontos para estimar a taxa de mudança da concentração de CO_2 e, assim, determinar o fluxo de CO_2 .

4.1.5 ÁREA DE ESTUDO

Os testes com as câmaras flutuantes foram todos realizados no Lago do Campus Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), que é uma área de estudo e de grande importância tanto para a comunidade acadêmica quanto para a conservação ambiental. O lago é um ecossistema único que abriga uma rica diversidade de vida

aquática e terrestre, oferecendo um ambiente propício para diversas pesquisas científicas. Apesar de sua origem artificial, o lago foi projetado com características que permitem o desenvolvimento de um ecossistema equilibrado e diversificado.

A precisão das informações de velocidade do vento durante as medições foi enriquecida pela localização estratégica da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), próxima ao Lago do Botânico. Essa proximidade permitiu um monitoramento mais preciso e detalhado das correntes atmosféricas que interagem com as câmeras flutuantes, resultando em dados mais confiáveis e uma compreensão mais aprofundada dos efeitos do vento nas câmeras flutuantes.

Figura 6 – Mapa de localização das medições



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS

5.1.1 COMPONENTES DAS CÂMARAS FLUTUANTES

A base estrutural das câmaras flutuantes foi realizada com duas bacias de plástico com dimensões iguais. Esse material foi escolhido por ser mais resistente e por possuir um preço mais acessível. Utilizou-se também duas boias do tipo espaguete para fazer com que as câmaras flutuassem, para o colar flexível usou-se uma lona leve, resistente e transparente e para colar esse material foi utilizado cola-quente. Além disso, alguns cuidados importantes foram tomados em relação as câmaras, utilizando como base a literatura, de acordo com [Duchemin et al. \(1999\)](#). A temperatura é um parâmetro importante e mudanças podem causar problemas nas medições, porque pode alterar a pressão, a solubilidade do gás e a difusividade. Para evitar mudanças de temperatura no interior da câmara devido à radiação solar as paredes devem ser revestidas com um material isolante e refletivo ([LAMBERT; FRÉCHETTE, 2005a](#)), assim seguindo a recomendação, as câmaras foram cobertas com papel alumínio. É possível verificar o processo de montagem das câmaras.

Figura 7 – Resultado final da câmara flutuante sem o colar



A escolha dos materiais usados na montagem das câmaras, ocorreu pelo fato dos mesmos serem mais leves, terem maior qualidade, serem mais resistentes e serem acessíveis, abaixo é possível conferir as câmaras flutuantes prontas.

Figura 8 – Resultado final da câmara flutuante sem o colar



Figura 9 – Resultado final da câmara flutuante com o colar flutuante



As duas câmaras flutuantes possuem as mesmas dimensões e estrutura, a única diferença é que em uma delas foi adicionado um colar flexível para verificar a possível interferência na turbulência. Após a montagem das mesmas, foi realizado um teste em campo para analisar a funcionalidade delas.

5.1.2 TESTES

As medições foram realizadas no período entre setembro de 2022 e maio de 2023. Foram conduzidos testes utilizando câmaras flutuantes para a realização de medições de

CO₂ na interface água-ar, uma versão da câmara possuía um colar flutuante e outra versão não.

Os testes foram realizados em várias fases. Inicialmente, foi realizada uma avaliação do desempenho das câmaras flutuantes, observando resultados preliminares e verificando o funcionamento do equipamento. Durante essa etapa, foram identificadas áreas de aprimoramento, incluindo a redução do tamanho do colar, o aumento da distância entre a câmara e a borda do lago e uma atenção especial às condições climáticas. Essas observações e ajustes iniciais visaram otimizar o desempenho das câmaras flutuantes e garantir a precisão dos resultados e dos testes subsequentes. A implementação dessas melhorias permitiu a realização de medições mais precisas e confiáveis.

As primeiras medições foram conduzidas de maneira estruturada. Inicialmente, vários testes foram realizados com uma câmara flutuante antes de se prosseguir com os testes usando a outra. No entanto, a fim de garantir uma maior confiabilidade e fidelidade dos resultados, foi tomada a decisão de intercalar esses testes. Por exemplo, no primeiro teste, a câmara flutuante foi utilizada sem a presença do colar, no segundo teste, a mesma câmara flutuante foi empregada, mas desta vez com o colar. Essa abordagem permitiu uma análise mais precisa dos dados coletados, possibilitando identificar qualquer variação no resultado final com maior precisão.

Com o objetivo de preservar a integridade dos equipamentos e garantir a confiabilidade dos testes, optou-se por realizar as medições em dias de clima ameno, evitando chuvas que poderiam interferir nos resultados. Na Figura abaixo pode-se verificar o teste realizado.

Figura 10 – Teste da câmara



5.1.3 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados teve início após a realização dos primeiros testes, com o propósito de compreender os procedimentos de análise e os métodos empregados. Inicialmente, foram realizados gráficos preliminares com base nos dados coletados. Durante essa etapa, observou-se que o sensor demandava alguns minutos para efetuar as medições. Portanto, optou-se por desconsiderar esses primeiros minutos (conforme detalhado no apêndice A).

Após a coleta e análise dos dados, o segundo passo foi a elaboração dos gráficos para uma avaliação mais detalhada. Durante essa análise, observou-se um padrão crescente nos gráficos, com um atraso de aproximadamente 3 a 5 minutos na inicialização das medições, seguido de um crescimento antes que os dados se estabilizassem.

Durante a coleta de dados do fluxo de CO_2 , foi desconsiderado o início do período de medição devido ao tempo necessário para que o sensor começasse a registrar o fluxo de maneira precisa. Nessa fase inicial, é comum que o sensor demande um tempo de resposta ou estabilização antes de fornecer leituras confiáveis. Portanto, os primeiros pontos do gráfico foram excluídos da análise, a fim de obter resultados mais confiáveis e representativos do fluxo de gás na interface água-ar. Essa prática visa garantir a precisão e a consistência dos dados obtidos.

As tendências observadas no gráfico estão em conformidade com as conclusões apresentadas, o que fortalece a validade e a consistência dos resultados obtidos. A con-

sistência com os achados da tese de (MANNICH, 2013) respalda a compreensão atual do comportamento do fluxo de gás na interface água-ar e contribui para a confiabilidade dos dados coletados neste estudo.

Os dados obtidos pelo sensor no teste inicial incluíam informações sobre a data, o horário das medições e a concentração de ($p\text{CO}_2$) (dióxido de carbono parcial) na amostra. Para facilitar a visualização e análise dos resultados, os horários foram convertidos para minutos.

Conforme citado anteriormente os primeiros pontos em vermelho no gráfico foram descartados, e os pontos em rosa foram utilizados para realizar a derivada em relação ao ponto. Nos gráficos os pontos em vermelho indicam quando a medição da concentração de CO_2 estava no início, os pontos em rosa foram os pontos selecionados para realizar os cálculos de derivada. Após a realização das tabelas e dos gráficos, foi realizada a derivada dos pontos para estimar a taxa de mudança da concentração de CO_2 e, assim, determinar o fluxo de CO_2 . Conforme detalha as Figuras abaixo.

Figura 11 – Exemplo do teste n°1 - Câmara sem o colar

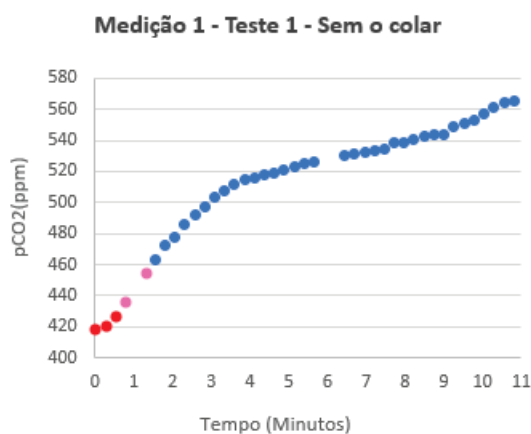
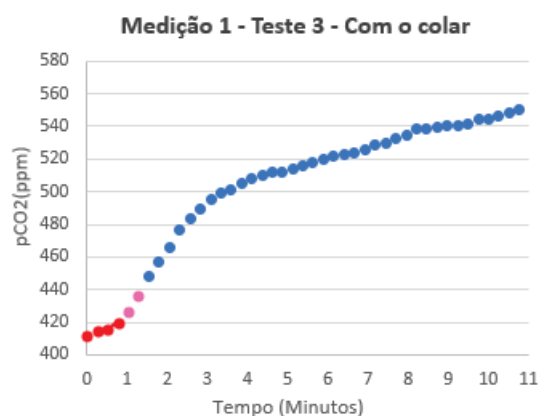


Figura 12 – Exemplo do teste n°1 - Câmara com o colar



Em seguida os resultados obtidos foram organizados em uma tabela, que mostra

as informações referentes aos testes, como o tipo de câmara, com colar (C) e sem colar (P), a velocidade do vento no dia do teste, o número de testes realizados, o fluxo de CO_2 e o resultado da derivada em relação ao ponto da medição.

Para efetuar os cálculos, primeiramente procedeu-se à obtenção da média dos fluxos registrados na câmara com colar (C). Em seguida, realizou-se o mesmo procedimento para os fluxos medidos nas câmaras sem o colar (P). Posteriormente, efetuou-se a divisão (C)/(P) para a obtenção dos resultados. Entretanto, foi observado que o denominador dessa divisão gerou valores >1 , o que demanda atenção e uma análise minuciosa para assegurar a validade do resultado esperado na câmara com colar. Este resultado >1 pode ter implicações significativas na interpretação dos fluxos gasosos na interface água-ar, tornando necessária uma investigação mais aprofundada para elucidar as possíveis causas subjacentes a esse resultado inesperado.

Tabela 2 – Resultado final dos testes

Medição	Teste	Câmara	q	u (m/s)	n
1	1	P	35,62	2,55	1,26
	2	P	28,00		
	3	C	40,00		
	4	C	44,00		
	5	C	36,00		
2	6	P	12,00	2,5	1,50
	7	P	12,00		
	8	P	16,00		
	9	C	15,00		
	10	C	32,00		
	11	C	15,00		
	12	C	15,00		
3	13	P	15,00	0,4	1,15
	14	C	22,50		
	15	P	18,75		
	16	C	15,00		
	17	P	11,25		
	18	C	14,12		
4	19	P	14,12	0,45	1,14
	20	C	22,5		
	21	P	22,5		
	22	C	11,25		
	23	P	10,59		
	24	C	18,75		
	25	P	14,12		
5	26	P	17,65	1,45	0,98
	27	C	22,5		
	28	P	18,75		
	29	C	30		
	30	P	41,25		

Nos cálculos realizados, ficou evidente que as medições efetuadas com as câmaras sem e com colar não apresentaram os valores esperados, revelando uma complexidade não previamente considerada nas condições experimentais e na turbulência do ambiente aquático. A complexidade encontrada se dá pelo fato de serem muitos dados a serem analisados e por possuírem uma grande possibilidade de métodos e cálculos que aprofundam ainda mais a pesquisa e pode leva-la para vários caminhos diferentes.

Ao comparar os resultados obtidos com as câmaras flutuantes com colar (C) e sem colar (P), buscou-se identificar se a presença ou ausência do colar influencia significativamente as medições do fluxo de gases na interface água-ar. Essa análise é fundamental para a compreensão da confiabilidade e consistência das medições realizadas com câmaras flutuantes e contribui para o avanço do conhecimento nessa área de pesquisa.

Nessa primeira avaliação dos resultados foi identificado que não houve uma diferença expressiva entre a câmara com colar e sem o colar, o uso do colar a princípio não resultou na diminuição da turbulência.

Com o intuito de aprofundar a compreensão dos resultados dos testes, foi realizado o cálculo da razão entre as medições da câmara com o colar e aquelas realizadas sem o colar da derivada no ponto, de forma individual. Essa análise visa identificar possíveis variações nos resultados, oferecendo informações importantes para a interpretação dos dados.

Abaixo é possível visualizar o resultado dos cálculos.

Tabela 3 – Razão entre C e P - Medição 1

Medição 1		
C (pCO_2)	P (pCO_2)	C/P
40	28	1,428
44	35,625	1,2350

Tabela 4 – Razão entre C e P - Medição 2

Medição 2		
C (pCO_2)	P (pCO_2)	C/P
15	16	0,937
32	12	2,666
15	12	1,250

Tabela 5 – Razão entre C e P - Medição 3

Medição 3		
<i>C</i> (<i>pCO</i> ₂)	<i>P</i> (<i>pCO</i> ₂)	<i>C/P</i>
22,5	15	1,500
15	18,75	0,800
14,12	11,25	1,254

Tabela 6 – Razão entre C e P - Medição 4

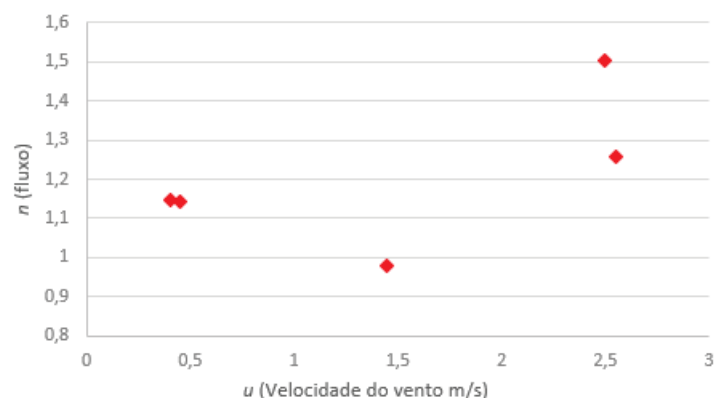
Medição 4		
<i>C</i> (<i>pCO</i> ₂)	<i>P</i> (<i>pCO</i> ₂)	<i>C/P</i>
22,5	14,11	1,590
11,25	22,5	0,500
10,58	18,75	0,560

Tabela 7 – Razão entre C e P - Medição 5

Medição 5		
<i>C</i> (<i>pCO</i> ₂)	<i>P</i> (<i>pCO</i> ₂)	<i>C/P</i>
22,5	17,65	1,270
30	18,75	1,600

Foi realizado um gráfico que relacionou o fluxo de CO₂ na interface água-ar com a velocidade média do vento na hora da medição. Surpreendentemente, os resultados indicaram que as medições com as mesmas velocidades médias mostraram que o fluxo ofertou resultados próximos, podendo ser associado que a velocidade média do vento de alguma forma pode ter influenciado nas medições. A velocidade do vento, em teoria, não deveria ter uma influência significativa na medição do CO₂, e essa descoberta inesperada está levantando questões importantes sobre os fatores que podem afetar a transferência de CO₂ na interface e sua relação com o vento. Isso ressalta a necessidade de uma análise mais aprofundada para compreender os motivos por trás dessa tendência e como ela pode impactar futuras medições de CO₂ em corpos d'água.

Figura 13 – Relação do fluxo com a velocidade do vento (m/s)



Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que estes não estiveram em conformidade com as expectativas previamente estabelecidas. Inicialmente, antecipava-se que o colar flutuante contribuiria para a redução da turbulência na câmara, refletindo-se em valores inferiores a 1 no cálculo da razão entre as medições das câmaras com e sem o colar. Porém o resultado final indicou que o modo como foi realizada as medições e o formato que foi executado os testes não se obteve o resultado esperado.

Nesse contexto, pesquisas futuras podem explorar mais profundamente as medições, conduzindo-as em diferentes lagos e em ambientes de laboratório controlados. Essa abordagem permitirá a identificação dos fatores específicos que contribuem para as variações observadas nas medições, enriquecendo a compreensão desse tema de pesquisa.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONCLUSÃO

A partir dos dados coletados durante o estudo das câmaras flutuantes utilizadas para medir o fluxo de CO_2 no lago do campus Jardim Botânico, foi possível concluir se houve ou não alteração em relação à turbulência das diferentes câmaras (com colar e sem colar). A análise desses resultados revela que o colar presente em uma das câmaras não causou alterações significativas na turbulência observada. As derivadas em relação ao ponto obtidas em ambos os casos apresentaram valores próximos, indicando que a presença do colar não influenciou significativamente a turbulência medida. Esses resultados são de grande importância para a compreensão do comportamento do fluxo de CO_2 em corpos de água, pois fornecem informações valiosas sobre os fatores que podem afetar a turbulência nesse contexto.

Além disso, essa pesquisa contribuiu para o desenvolvimento de metodologias mais precisas na medição e quantificação do fluxo de CO_2 em lagos. No entanto, é importante ressaltar que este estudo se baseou em uma amostra específica e em condições controladas, o que limita sua generalização para outros ambientes ou situações. Portanto, investigações adicionais são necessárias para confirmar esses resultados e expandir o conhecimento sobre a influência de outros fatores na turbulência em corpos de água.

Na análise dos resultados obtidos, foi esperado que as medições realizadas com o colar apresentassem valores inferiores, seguindo uma estratégia de comparação direta entre as câmaras com e sem colar. No entanto, os resultados não atenderam às expectativas, demonstrando uma falta de coerência com a hipótese inicial. Essa discrepância entre as medições realizadas com e sem o colar ressalta a complexidade da influência das condições experimentais na turbulência do lago. Dessa forma, sugere-se que futuros estudos considerem uma revisão cuidadosa dos métodos e variáveis envolvidos, a fim de esclarecer as causas subjacentes desses resultados e contribuir para a compreensão mais precisa dos processos relacionados ao fluxo de CO_2 em ambientes aquáticos.

Em conclusão, os resultados obtidos indicam que a presença de um colar em uma das câmaras flutuantes não causou alterações significativas na turbulência medida durante a medição do fluxo de CO_2 em um lago. Essas descobertas contribuem para a compreensão do comportamento do CO_2 em corpos de água e fornecem informações valiosas para estudos futuros nessa área.

7 REFERÊNCIAS

- ABRIL, G.; GUÉRIN, F.; RICHARD, S.; DELMAS, R.; GALY-LACAUX, C.; GOSSE, P.; TREMBLAY, A.; VARFALVY, L.; SANTOS, M. A. D.; MATVIENKO, B. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (petit saut, french guiana). *Global biogeochemical cycles*, v. 19, n. 4, 2005.

ARAÚJO, M. G. d. S. *Variação sazonal de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nítrico (N₂O) no rio Tocantins, à jusante do reservatório da UHE de Tucuruí.* (Doctoral dissertation) — Universidade de São Paulo, 2020.

BANCO MUNDIAL. *Relatório sobre o desenvolvimento mundial 2010: desenvolvimento e mudança climática.* 2010. xxi–418 p.

BASTVIKEN, D.; SUNDGREN, I.; NATCHIMUTHU, S.; REYIER, H.; GÅLFALK, M. Cost-efficient approaches to measure carbon dioxide (co₂) fluxes and concentrations in terrestrial and aquatic environments using mini loggers. *Biogeosciences*, v. 12, n. 12, p. 3849–3859, 2015.

BATTIN, T. J.; KAPLAN, L. A.; FINDLAY, S.; HOPKINSON, C. S.; MARTI, E.; PACKMAN, A. I.; NEWBOLD, J. D.; SABATER, F. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nature geoscience*, v. 1, n. 2, p. 95–100, 2008.

BEAULIEU, J. J.; SHUSTER, W. D.; REBHOLZ, J. A. Controls on gas transfer velocities in a large river. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 117, n. G2, 2012.

BELANGER, T.; KORZUN, E. Critique of floating-dome technique for estimating reaeration rates. *Journal of Environmental Engineering*, v. 117, n. 1, p. 144–150, 1991.

BROECKER, W. S.; PENG, T.-H. Gas exchange rates between air and sea. *Tellus*, v. 26, n. 1-2, p. 21–35, 1974.

CAMPEAU, A.; GIORGIO, P. A. D. Patterns in ch₄ and co₂ concentrations across boreal rivers: Major drivers and implications for fluvial greenhouse emissions under climate change scenarios. *Global change biology*, v. 20, n. 4, p. 1075–1088, 2014.

COLE, J. J.; BADE, D. L.; BASTVIKEN, D.; PACE, M. L.; BOGERT, M. Van de. Multiple approaches to estimating air-water gas exchange in small lakes. *Limnology and Oceanography: Methods*, v. 8, n. 6, p. 285–293, 2010.

COLE, J. J.; PRAIRIE, Y. T.; CARACO, N. F.; MCDOWELL, W. H.; TRANVIK, L. J.; STRIEGL, R. G.; DUARTE, C. M.; KORTELAJINEN, P.; DOWNING, J. A.; MIDDELBURG, J. J. et al. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, v. 10, n. 1, p. 172–185, 2007.

CONEN, F.; DOBBIE, K.; SMITH, K. Predicting n₂o emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biology*, v. 6, n. 4, p. 417–426, 2000.

- CRAWFORD, J. T.; STRIEGL, R. G.; WICKLAND, K. P.; DORNBLASER, M. M.; STANLEY, E. H. Emissions of carbon dioxide and methane from a headwater stream network of interior alaska. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 118, n. 2, p. 482–494, 2013.
- CRUSIUS, J.; WANNINKHOF, R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. *Limnology and Oceanography*, v. 48, n. 3, p. 1010–1017, 2003.
- DEEMER, B. R.; HARRISON, J. A.; LI, S.; BEAULIEU, J. J.; DELSONTRO, T.; BARROS, N.; BEZERRA-NETO, J. F.; POWERS, S. M.; SANTOS, M. A. D.; VONK, J. A. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience*, v. 66, n. 11, p. 949–964, 2016.
- DELSONTRO, T.; BEAULIEU, J. J.; DOWNING, J. A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. *Limnology and Oceanography Letters*, v. 3, n. 3, p. 64–75, 2018.
- DEMARTY, M.; BASTIEN, J.; TREMBLAY, A. Carbon dioxide and methane annual emissions from two boreal reservoirs and nearby lakes in quebec, canada. *Biogeosciences Discussions*, v. 6, n. 2, p. 2939–2963, 2009.
- DUC, N. T.; SILVERSTEIN, S.; WIK, M.; CRILL, P.; BASTVIKEN, D.; VARNER, R. K. Greenhouse gas flux studies: An automated online system for gas emission measurements in aquatic environments. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 24, n. 7, p. 3417–3430, 2020.
- DUCHEMIN, E.; LUCOTTE, M.; CANUEL, R. Comparison of static chamber and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies. *Environmental Science & Technology*, v. 33, n. 2, p. 350–357, 1999.
- DUCHEMIN, E.; LUCOTTE, M.; CANUEL, R.; QUEIROZ, A. G.; ALMEIDA, D. C.; PEREIRA, H. C.; DEZINCOURT, J. Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those from other reservoirs worldwide. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, v. 27, n. 3, p. 1391–1395.
- DUMESTRE, J.; GUÉZENNEC, J.; GALY-LACAUX, C.; DELMAS, R.; RICHARD, S.; LABROUE, L. Influence of light intensity on methanotrophic bacterial activity in petit saut reservoir, french guiana. *Applied and environmental microbiology*, v. 65, n. 2, p. 534–539, 1999.
- EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 5.
- EUGSTER, W.; KLING, G.; JONAS, T.; MCFADDEN, J. P.; WÜEST, A.; MACINTYRE, S.; III, F. S. C. Co₂ exchange between air and water in an arctic alaskan and midlatitude swiss lake: Importance of convective mixing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 108, n. D12, 2003.
- FEARNSIDE, P. M. Gases de efeito estufa em hidrelétricas da amazônia. 2004.
- FRANKIGNOULLE, M.; BOURGE, I.; WOLLAST, R. Atmospheric co₂ fluxes in a highly polluted estuary (the scheldt). *Limnology and Oceanography*, v. 41, n. 2, p. 365–369, 1996.

- FREITAS, J. C. de; SANTOS, J. A. dos; CÂNDIDO, S. M.; RAMOS, D. da P. Energias renováveis, clima e mudanças climáticas. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 4, p. 317–329, 2015.
- GABRIEL, P. G. G. Desenvolvimento de equilibrador para medição de gases dissolvidos em Água. Curitiba - PR, Junho 2022.
- GÅLFALK, M.; BASTVIKEN, D.; FREDRIKSSON, S.; ARNEBORG, L. Determination of the piston velocity for water-air interfaces using flux chambers, acoustic doppler velocimetry, and ir imaging of the water surface. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 118, n. 2, p. 770–782.
- GENEVA, S. Intergovernmental panel on climate change, 2014. *Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Climate Change*, 2013.
- GOLDENFUM, J. A. *UNESCO/IHA Greenhouse Gas (GHG) Research Project*. 2009.
- GRINHAM, A.; ALBERT, S.; DEERING, N.; DUNBABIN, M.; BASTVIKEN, D.; SHERMAN, B.; LOVELOCK, C. E.; EVANS, C. D. The importance of small artificial water bodies as sources of methane emissions in queensland, australia. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, n. 10, p. 5281–5298.
- GUÉRIN, F.; ABRIL, G.; SERÇA, D.; DELON, C.; RICHARD, S.; DELMAS, R.; TREMBLAY, A.; VARFALVY, L. Gas transfer velocities of co₂ and ch₄ in a tropical reservoir and its river downstream. *Journal of Marine Systems*, v. 66, n. 1-4, p. 161–172, 2007.
- HOLGERSON, M. A.; RICHARDSON, D. C.; ROITH, J.; BORTOLOTTI, L. E.; FINLAY, K.; HORNBACH, D. J.; GURUNG, K.; NESS, A.; ANDERSEN, M. R.; BANSAL, S. et al. Classifying mixing regimes in ponds and shallow lakes. *Water Resources Research*, v. 58, n. 7, p. e2022WR032522, 2022.
- JÄHNE, B. Munnichk. O., BosingerR., DutziA., HuberW., and LibnerW, p. 1937–1949, 1987.
- JUNIOR, E. S. O.; BERGEN, T. J. van; NAUTA, J.; BUDIŠA, A.; ABEN, R. C.; WEIDEVELD, S. T.; SOUZA, C. A. de; MUNIZ, C. C.; ROELOFS, J.; LAMERS, L. P. et al. Water hyacinth's effect on greenhouse gas fluxes: A field study in a wide variety of tropical water bodies. *Ecosystems*, p. 1–17, 2020.
- KORTELAJINEN, P.; RANTAKARI, M.; HUTTUNEN, J. T.; MATTSSON, T.; ALM, J.; JUUTINEN, S.; LARMOLA, T.; SILVOLA, J.; MARTIKAINEN, P. J. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large co₂ evasion from small boreal lakes. *Global Change Biology*, v. 12, n. 8, p. 1554–1567, 2006.
- KREMER, J. N.; REISCHAUER, A.; D'AVANZO, C. Estuary-specific variation in the air-water gas exchange coefficient for oxygen. *Estuaries*, v. 26, n. 4, p. 829–836, 2003.
- KUTZBACH, L.; SCHNEIDER, J.; SACHS, T.; GIEBELS, M.; NYKÄNEN, H.; SHURPALI, N.; MARTIKAINEN, P.; ALM, J.; WILMKING, M. Co₂ flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression. *Biogeosciences*, v. 4, n. 6, p. 1005–1025, 2007.

- LAMBERT, M.; FRÉCHETTE, J.-L. Analytical techniques for measuring fluxes of co₂ and ch₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. In: *Greenhouse gas emissions—fluxes and processes*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 37–60.
- LAMBERT, M.; FRÉCHETTE, J.-L. Analytical techniques for measuring fluxes of co₂ and ch₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. In: . [S.l.: s.n.], 2005.
- LISS, P. Processes of gas exchange across an air-water interface. In: *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. [S.l.: s.n.], 1973. v. 20, n. 3, p. 221–238.
- LIVINGSTON, G.; HUTCHINSON, G. Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. *Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water*, v. 51, p. 14–51, 1995.
- LOPES, A. Emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial. *Embrapa Instrumentação-Tese/dissertação (ALICE)*, 2017.
- LORKE, A.; BODMER, P.; NOSS, C.; ALSHBOUL, Z.; KOSCHORRECK, M.; SOMLAI-HAASE, C.; BASTVIKEN, D.; FLURY, S.; MCGINNIS, D. F.; MAECK, A. et al. drifting versus anchored flux chambers for measuring greenhouse gas emissions from running waters. *Biogeosciences*, v. 12, n. 23, p. 7013–7024, 2015.
- LORKE, A.; BODMER, P.; NOSS, C.; ALSHBOUL, Z.; KOSCHORRECK, M.; SOMLAI-HAASE, C.; BASTVIKEN, D.; FLURY, S.; MCGINNIS, D. F.; MAECK, A.; MÜLLER, D.; PREMKE, K. Technical note: drifting versus anchored flux chambers for measuring greenhouse gas emissions from running waters. *Biogeosciences*, v. 12, n. 23, p. 7013–7024, 2015. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/12/7013/2015/>><https://bg.copernicus.org/articles/12/7013/2015/>.
- LOUIS, V. L. S.; KELLY, C. A.; DUCHEMIN, É.; RUDD, J. W.; ROSENBERG, D. M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate: Reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *BioScience*, v. 50, n. 9, p. 766–775, 2000.
- MANNICH, M. Estimativa de emissões de gases de efeito estufa em reservatórios e lagos. 2013.
- MANNICH, M.; FERNANDES, C.; BERNARDO, J.; BLENINGER, T. Daily variation of co₂ fluxes in two brazilian sub-tropical reservoirs. In: *Citation for published version: Wain, D & Bryant, L (eds) 2016, Proceedings of the 19th International Workshop on Physical Processes in Natural Waters: PPNW2016, Bath, UK, 12-15 July 2016. Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath, Bath, UK*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 61.
- MARTIN, J.-L.; MARIS, V.; SIMBERLOFF, D. S. The need to respect nature and its limits challenges society and conservation science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 22, p. 6105–6112, 2016.
- MARTINSEN, K. T.; KRAGH, T.; SAND-JENSEN, K. Carbon dioxide efflux and ecosystem metabolism of small forest lakes. *Aquatic Sciences*, v. 82, n. 1, p. 1–17, 2020.

- MATTHEWS, C. J.; LOUIS, V. L. S.; HESSLEIN, R. H. Comparison of three techniques used to measure diffusive gas exchange from sheltered aquatic surfaces. *Environmental science & technology*, v. 37, n. 4, p. 772–780, 2003.
- MCMAHON, P.; DENNEHY, K. N₂O emissions from a nitrogen-enriched river. *Environmental science & technology*, v. 33, n. 1, p. 21–25, 1999.
- MISKALO, B. B. et al. *Medidor de emissão de CO₂ e CH₄ em reservatório de usinas hidrelétricas nas superfícies aquáticas: contribuição para a extensão de modelo robótico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.
- MORAIS, Y. C. B.; ARAÚJO, M. d. S. Bezerra de; MOURA, M. S. B. de; GALVÍNIO, J. D.; MIRANDA, R. de Q. Análise do sequestro de carbono em áreas de caatinga do semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 585–599, 2017.
- OCAMPO-TORRES, F.; DONELAN, M.; MERZI, N.; JIA, F. Laboratory measurements of mass transfer of carbon dioxide and water vapour for smooth and rough flow conditions. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 46, n. 1, p. 16–32, 1994.
- PARALOVO, S. L.; MANNICH, M. Utilização de câmaras flutuantes para medição de fluxos de gases na interface ar-água: Uma revisão. 2017.
- PODGRAJSEK, E.; SAHLÉE, E.; BASTVIKEN, D.; HOLST, J.; LINDROTH, A.; TRANVIK, L.; RUTGERSSON, A. Comparison of floating chamber and eddy covariance measurements of lake greenhouse gas fluxes. *Biogeosciences*, v. 11, n. 15, p. 4225–4233, 2014.
- PRASAD, P.; THOMAS, J.; NARAYANAN, S. Global warming effects. 2017.
- RASERA, M. d. F. F. L. *Determinação dos fluxos de CO₂ e parâmetros físicos envolvidos neste processo em diferentes ambientes fluviais da Amazônia*. (Doctoral dissertation) — Universidade de São Paulo, 2010.
- RAWITCH, M.; MACPHERSON, G.; BROOKFIELD, A. The validity of floating chambers in quantifying CO₂ flux from headwater streams. *Journal of Water and Climate Change*, 2020.
- RAYMOND, P. A.; HARTMANN, J.; LAUERWALD, R.; SOBEK, S.; MCDONALD, C.; HOOVER, M.; BUTMAN, D.; STRIEGL, R.; MAYORGA, E.; HUMBORG, C. et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, v. 503, n. 7476, p. 355–359, 2013.
- REPO, E.; HUTTUNEN, J.; NAUMOV, A.; CHICHULIN, A.; LAPSHINA, E.; BLEUTEN, W.; MARTIKAINEN, P. Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western siberia. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 59, n. 5, p. 788–796, 2007.
- RIBAS-RIBAS, M.; KILCHER, L. F.; WURL, O.; MILLER, L. A. Sniffle: A step forward to measure in situ CO₂ fluxes with the floating chamber technique. *Elementa: Science of the Anthropocene*, v. 6, 2018.
- SÁ, J. D. S. Fluxo de CO₂ no reservatório da hidroelétrica de curua-una. 2017.

- SAEFL. Climate in danger: Facts and implications of the greenhouse effect. *Chemistry of the Environment*, 1997.
- SAMIOTIS, G.; PEKRIDIS, G.; KAKLIDIS, N.; TRIKOILIDOU, E.; TAOUSANIDIS, N.; AMANATIDOU, E. Greenhouse gas emissions from two hydroelectric reservoirs in mediterranean region. *Environmental monitoring and assessment*, v. 190, n. 6, p. 1–13, 2018.
- SANTOS, M. A.; MATVIENKO, B.; ROSA, L. P.; SIKAR, E. Carbon dioxide and methane emissions from hydroelectric reservoirs in brazil. *Proceedings of International Seminar on Greenhouse Fluxes from Hydro Reservoirs & Workshop on Modeling Greenhouse Gas Emissions from Reservoir at Watershed level.*, v. 6, n. 07, 2005.
- SOUMIS, N.; CANUEL, R.; LUCOTTE, M. Evaluation of two current approaches for the measurement of carbon dioxide diffusive fluxes from lentic ecosystems. *Environmental science & technology*, v. 42, n. 8, p. 2964–2969, 2008.
- SOUZA, W. M. de; AZEVEDO, P. V. de. Avaliação de tendências das temperaturas em recife-pe: mudanças climáticas ou variabilidade? *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v. 6, n. 3, 2009.
- STEPHENS, D. W. Preliminary evaluation of the floating dome method for measuring reaeration rates. *J. Res. US Geol. Surv*, v. 6, p. 547–552, 1978.
- TEODORU, C. R.; BASTIEN, J.; BONNEVILLE, M.-C.; GIORGIO, P. A. del; DEMARTY, M.; GARNEAU, M.; HÉLIE, J.-F.; PELLETIER, L.; PRAIRIE, Y. T.; ROULET, N. T. et al. The net carbon footprint of a newly created boreal hydroelectric reservoir. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 26, n. 2, 2012.
- TING, H.; YING, S. Interpretation of ipcc ar6 on human influence on the climate system. *Advances in Climate Change Research*, v. 17, n. 6, p. 644, 2021.
- TOKORO, T.; WATANABE, A.; KAYANNE, H.; NADAOKA, K.; TAMURA, H.; NOZAKI, K.; KATO, K.; NEGISHI, A. Measurement of air–water co2 transfer at four coastal sites using a chamber method. *Journal of Marine Systems*, v. 66, n. 1-4, p. 140–149, 2007.
- TUNDISI, J. Gerenciamento da qualidade da água de represas. *São Carlos: ILEC*, p. 280, 2000.
- UPSTILL-GODDARD, R. C. Air–sea gas exchange in the coastal zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 70, n. 3, p. 388–404, 2006.
- 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.
- ZAPPA, C. J.; RAYMOND, P. A.; TERRAY, E. A.; MCGILLIS, W. R. Variation in surface turbulence and the gas transfer velocity over a tidal cycle in a macro-tidal estuary. *Estuaries*, v. 26, n. 6, p. 1401–1415, 2003.

ZHANG, J.; XING, Z.; WANG, J. Analysis of co2 emission performance and abatement potential for municipal industrial sectors in jiangsu, china. *Sustainability*, v. 8, n. 7, p. 697, 2016.

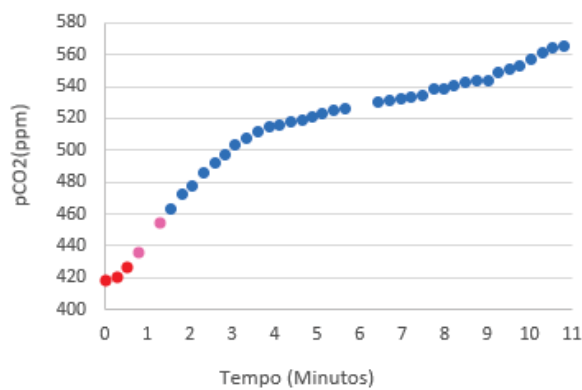
ZHAO, Y.; SHERMAN, B.; FORD, P.; DEMARTY, M.; DELSONTRO, T.; HARBY, A.; TREMBLAY, A.; ØVERJORDET, I. B.; ZHAO, X.; HANSEN, B. H. et al. A comparison of methods for the measurement of co2 and ch4 emissions from surface water reservoirs: Results from an international workshop held at three gorges dam, june 2012. *Limnology and Oceanography: Methods*, v. 13, n. 1, p. 15–29, 2015.

Apêndices

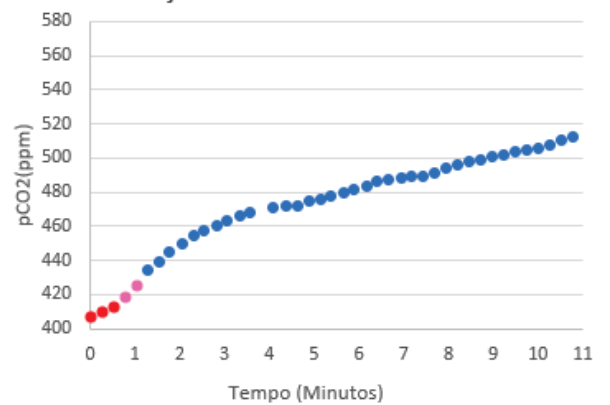
APÊNDICE A – APÊNDICES

A.1 MEDIÇÃO 1

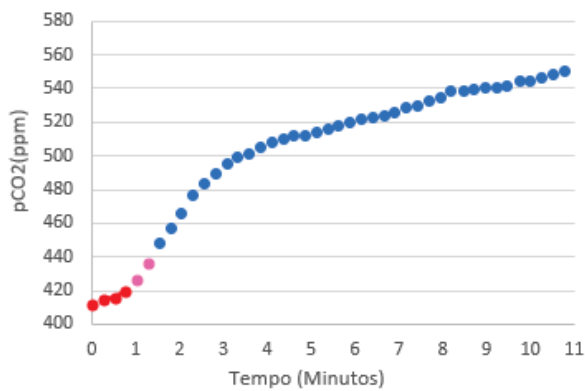
Medição 1 - Teste 1 - Sem o colar



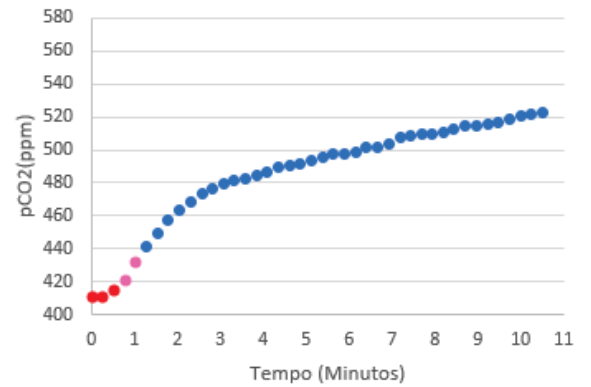
Medição 1 - Teste 2 - Sem o colar



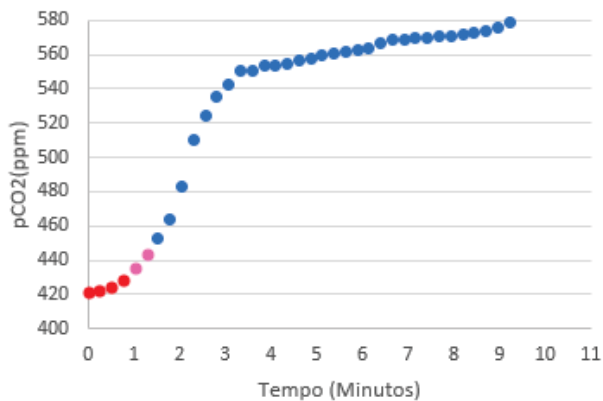
Medição 1 - Teste 3 - Com o colar



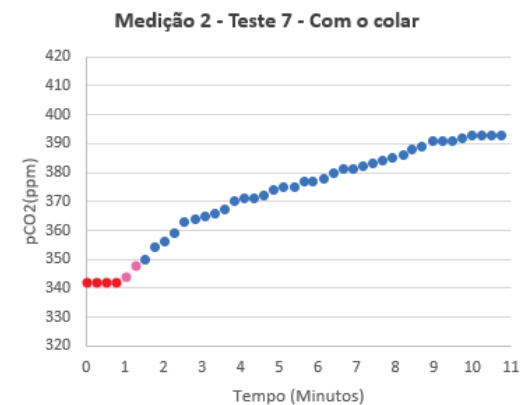
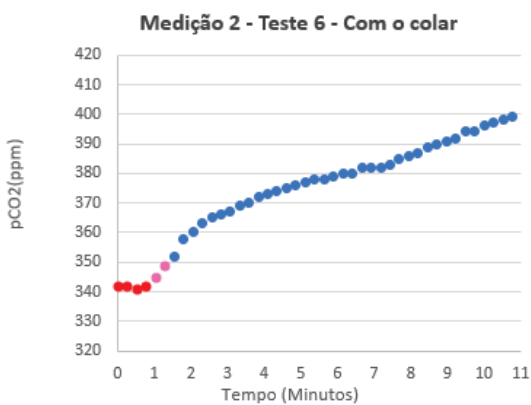
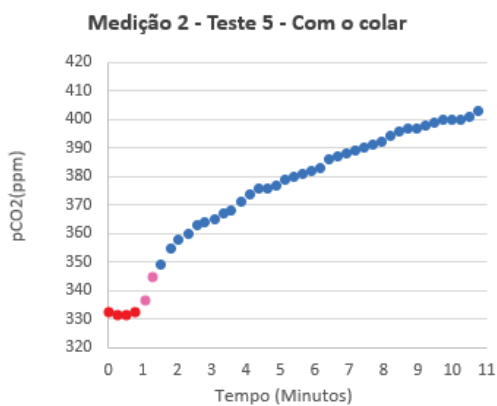
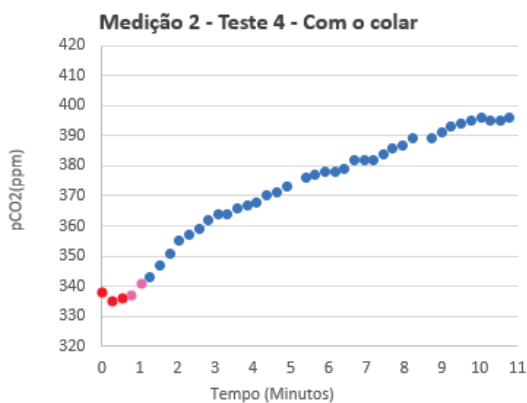
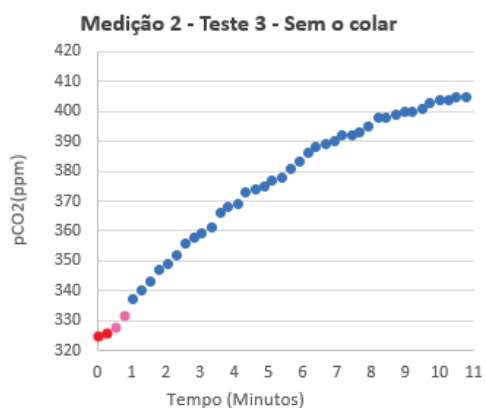
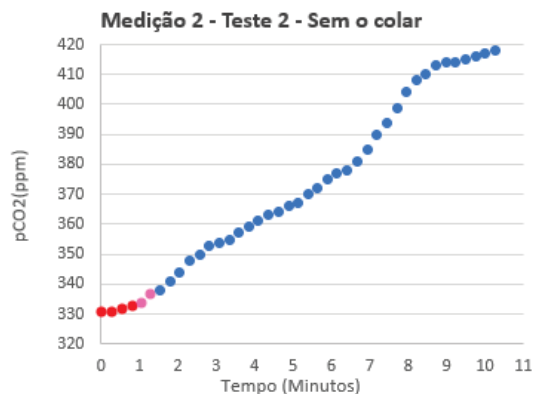
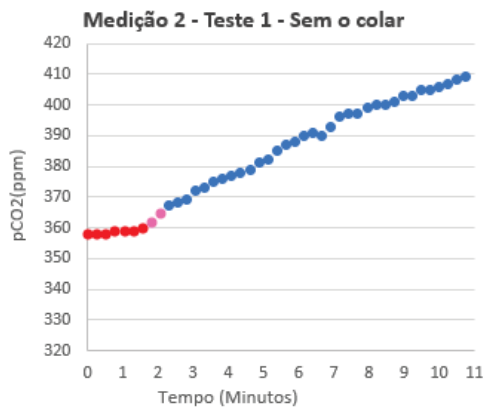
Medição 1 - Teste 4 - Com o colar



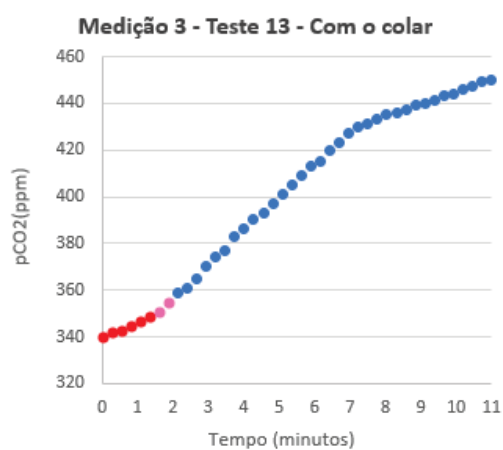
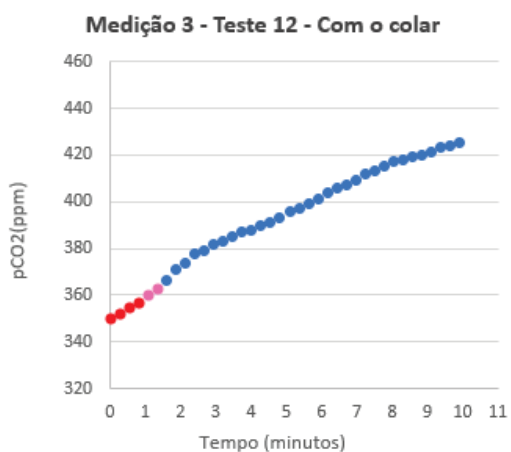
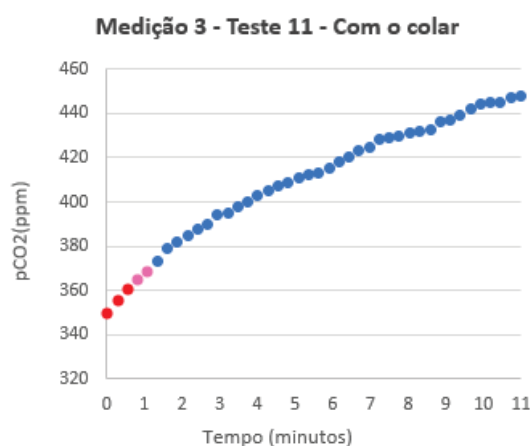
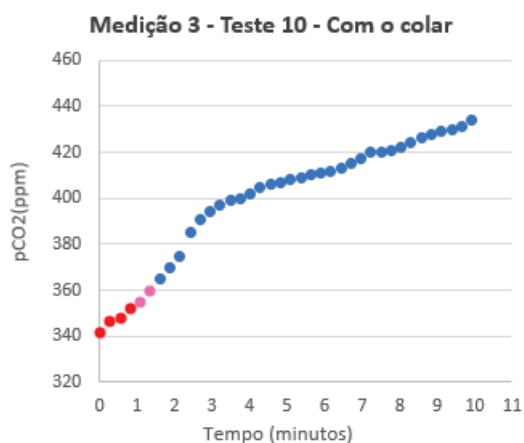
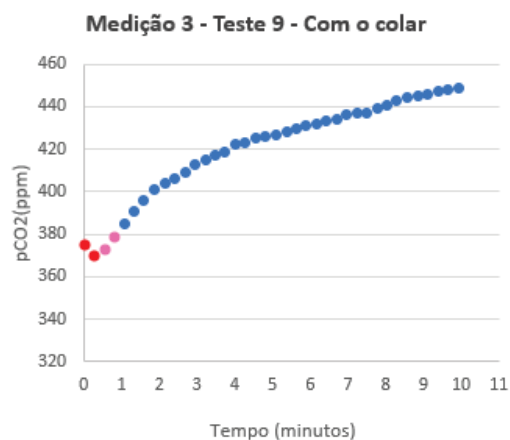
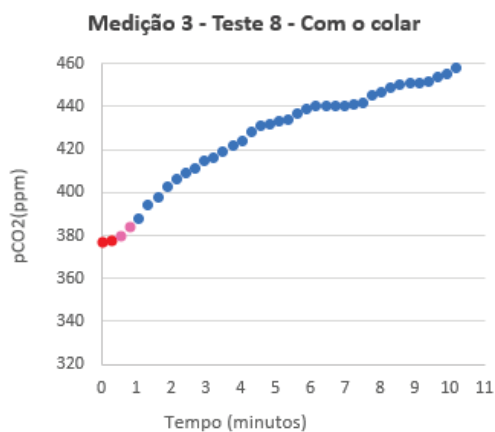
Medição 1 - Teste 5 - Com o colar



A.2 MEDIÇÃO 2

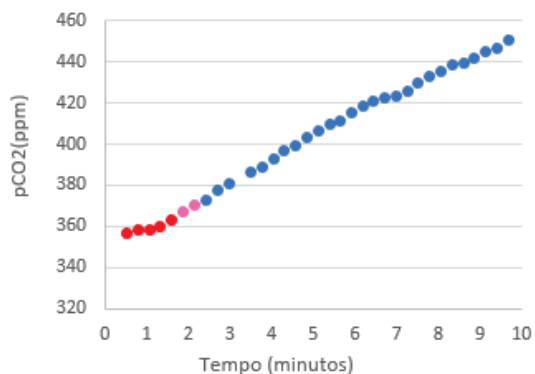


A.3 MEDIÇÃO 3

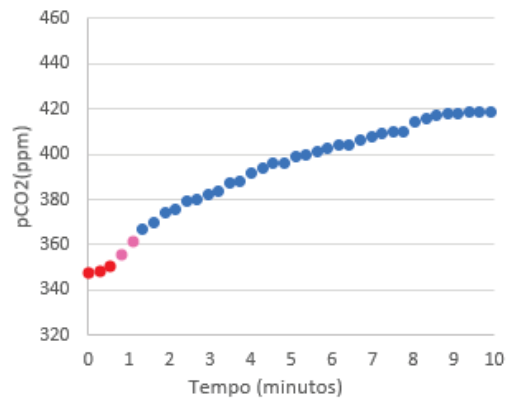


A.4 MEDIÇÃO 4

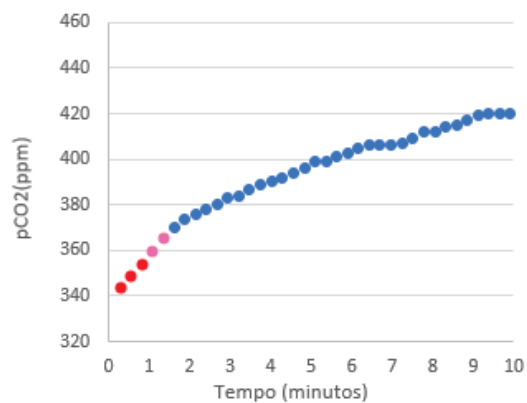
Medição 4 - Teste 14 - Sem o colar



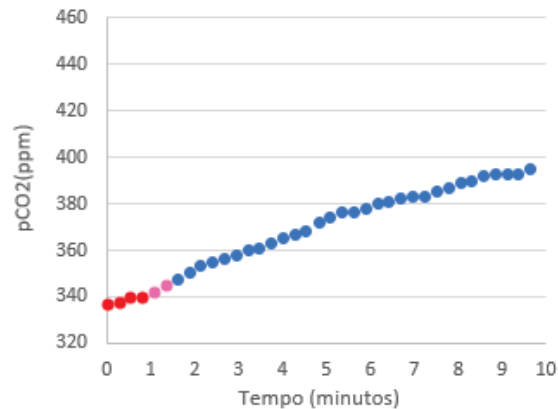
Medição 4 - Teste 15 - Com o colar



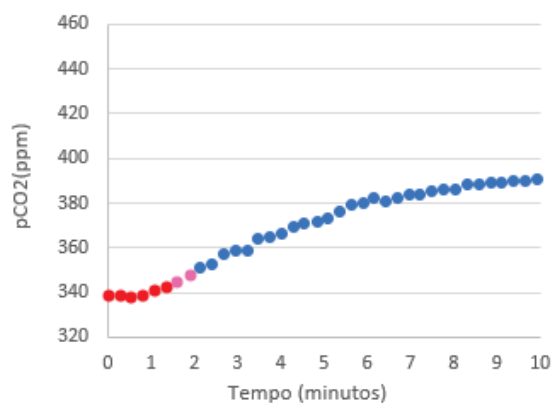
Medição 4 - Teste 16 - Sem o colar



Medição 4 - Teste 17 - Com o colar



Medição 4 - Teste 18 - Sem o colar



Medição 4 - Teste 19 - Com o colar

