

**IV-157 - CÂMARA FLUTUANTE PARA MEDIÇÃO DE FLUXOS DE CO₂
CONSTRUÍDA COM ANALISADOR DE BAIXO CUSTO**

Rodrigo Gimenes da Silva⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental e Sanitarista (UFPR). Técnico em Eletromecânica (IFPR). Técnico Operacional Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR.

Fernando Augusto Silveira Armani⁽²⁾

Docente da Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná - Centro de Estudos do Mar.

Luiz Ricardo Adriano Ferreira⁽³⁾

Engenheiro Ambiental e Sanitarista (UFPR).

Suelen Ramos Chagas⁽⁴⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista (UFPR). Especialista em Gestão Ambiental (IFPR).

Endereço⁽¹⁾: Rua da Fonte, 264 - Centro - Matinhos - Pr - CEP: 83260-000 - Brasil - Tel: (41) 99947-46648 - e-mail: rsilva@sanepar.com.br

Endereço⁽²⁾: Rua Rio Grande do Norte, S/N, Campus Mirassol - Pontal do Paraná - CEP 83255000

Endereço⁽³⁾: Rua Rocha Pombo, 690 - Porto dos Padres - Paranaguá - Pr - CEP 832221-330 - Brasil - Tel: (41) 99573-1953 - e-mail: luizferreiraeas@gmail.com

Endereço⁽⁴⁾: Av. Curitiba, 3351 - Bom Retiro - Matinhos - Pr - CEP 83260-000 - Brasil - Tel: (41) 99821-7309 - e-mail: suelenrchagas@gmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta um protótipo de uma câmara flutuante desenvolvida para medição de fluxos de gás carbono sobre corpos hídricos. Na sua construção, utilizou-se dispositivos eletrônicos de baixo custo, acoplados a um controlador Arduino. O equipamento foi utilizado para medição de fluxos sobre o Rio Guaraguaçu, do município de Pontal do Paraná, em quatro situações distintas: uma para medição de fluxos de CO₂ da superfície de água, e outras três para medição de fluxos de diferentes espécies de macrófitas. Os fluxos obtidos apresentaram as mesmas ordens de grandeza reportadas na literatura, sendo os fluxos medidos sobre vegetação predominantemente negativos, enquanto que os fluxos obtidos sobre a superfície do corpo hídrico apresentaram valores positivos.

PALAVRAS-CHAVE: Sensor de baixo custo; câmara flutuante; dióxido de carbono; medidor de fluxo.

INTRODUÇÃO

Há crescentes evidências de mudanças substanciais no clima global ao longo do próximo século devido ao aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, o que tem gerado uma grande demanda por pesquisas que identificam as fontes e os sumidouros desses gases (ARMANI, 2014; RASERA, 2005).

Os rios têm sido relatados na literatura como possíveis fontes de dióxido de carbono (NOAA, 2022; PERRIN, 2021; ARMANI, 2014; RASERA, 2005; COLE, 2001). Há diversas metodologias de quantificação de fluxos de CO₂ entre um corpo hídrico e a atmosfera, mas uma das mais empregadas, principalmente devido à sua simplicidade de operação, é a da Câmara Flutuante (Lansdown *et al.*, 2011). A câmara flutuante é acomodada sobre a superfície de um corpo hídrico, onde a concentração na câmara é monitorada. O perfil de contração obtido é convertido em fluxo de gás carbônico.

Apesar da simplicidade do método, o elevado custo dos medidores e sensores de CO₂ atualmente disponíveis no mercado, acaba por restringir os estudos sobre o balanço do carbono em corpos hídricos (SCHAEFFER, 2004; MALDONADO; GAMARO, 2013). Entre os 3 sensores comerciais (GMP-252, Modbus RTU EE872 e CDT-2D40) cotados e o sensor de baixo custo utilizado neste trabalho (MG811), este último apresenta o menor valor, sendo também um dos mais baratos sensores disponíveis no mercado.

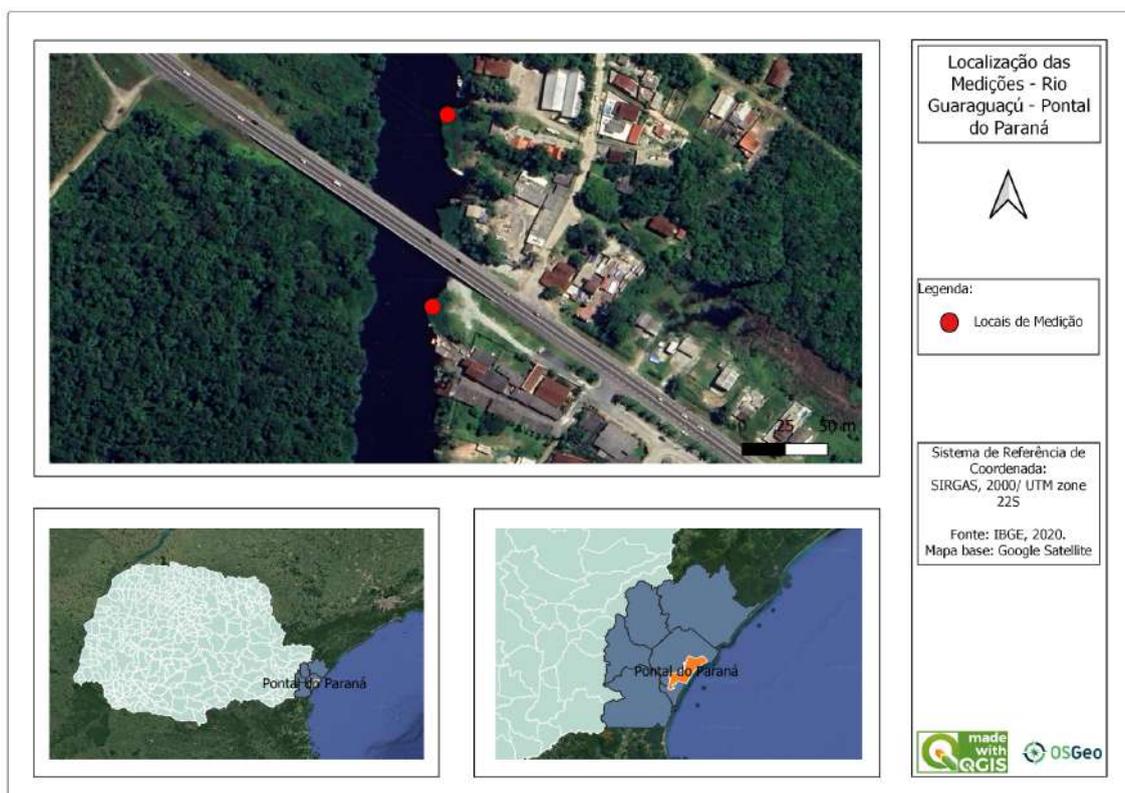
Diante da demanda de tornar as metodologias de obtenção de fluxos de CO₂ sobre corpos hídricos mais acessíveis, promovendo assim o seu uso, foi construído um modelo de câmara flutuante baseado na literatura. O modelo mediu concentrações de dióxido de carbono no Rio Guaraguaçu, na cidade de Pontal do Paraná, sendo este um importante rio da região e um dos principais rios que compõem a bacia hidrográfica litorânea. As medições foram então analisadas com o intuito de se explorar a viabilidade do uso de um sensor de baixo custo para este fim.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCAL DE ESTUDO

O local escolhido para teste do protótipo do medidor de CO₂ de baixo custo foi o Rio Guaraguaçu, localizado no município de Pontal do Paraná. Este rio é o maior rio do município, e é um dos principais rios que compõem a bacia hidrográfica litorânea (SEDEST, 2020). O canal do Rio Guaraguaçu é uma das unidades geomorfológicas que compõem a Estação Ecológica de Guaraguaçu. É um rio meandrante que possui influência da maré em quase todo seu curso (IAT, 2020; SEDEST, 2020), e nele contém áreas de manguezais, próximas às suas margens, em boa parte de sua extensão (SEDEST, 2020). A Figura 1 apresenta os pontos de medição no Rio Guaraguaçu.

FIGURA 1: PONTOS DE MEDIÇÃO NO RIO GUARAGUAÇÚ

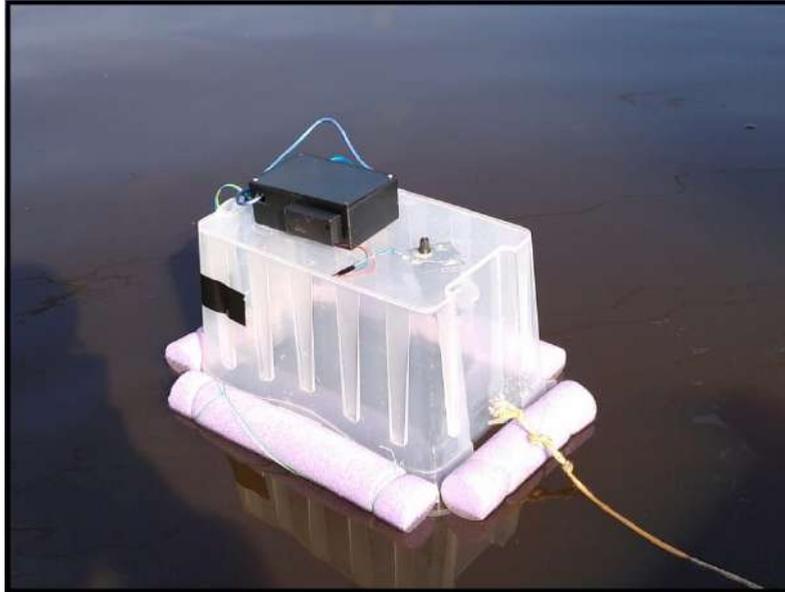


Elaboração: Os autores.

3.2 CONSTRUÇÃO DA CÂMARA FLUTUANTE

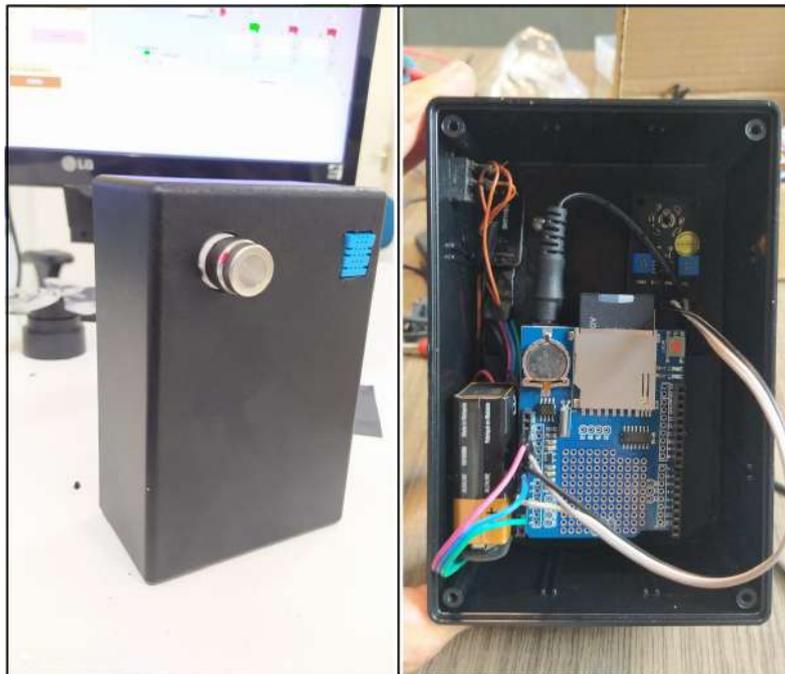
A construção da câmara flutuante foi construída com uma caixa plástica transparente do tipo “caixa organizadora”, com sua abertura voltada para baixo, a fim de medir a concentração de CO₂ no interior da caixa, e consequentemente identificar se está havendo emissão ou absorção de CO₂ pelo rio. O recipiente foi envolto por uma bóia na região de contato com a superfície, com a finalidade de garantir a sua flutuação (Figura 2). Adicionou-se uma caixa de montagem de circuitos para armazenar as baterias e demais dispositivos eletrônicos, entre eles, uma placa microcontroladora Arduino, um *Data Logger* para o armazenamento de dados, e o módulo sensor de CO₂ MG811 (Figura 3). Ainda na parte superior da câmara foi instalado um *cooler* com um potenciômetro para realizar a homogeneização do ar no interior da câmara. Na Figura 4 é possível verificar a estrutura da câmara flutuante (sem a bóia).

FIGURA 2: RECIPIENTE ENVOLTO À BÓIA PARA FLUTUAÇÃO



Fonte: Arquivo pessoal dos autores.

FIGURA 3: CAIXA DE MONTAGEM DOS CIRCUITOS



Fonte: Arquivo pessoal dos autores.

FIGURA 4: ESTRUTURA DA CÂMARA FLUTUANTE



Fonte: Arquivo pessoal dos autores.

A área gerada pelo contato da câmara com a superfície é de 0,095 m², e tem o volume de 20 L, conferindo uma relação A/V de 0,00475 m⁻¹.

O processo de obtenção de fluxo ocorreu da seguinte forma: primeiramente o sensor foi mantido por alguns minutos em local acima da superfície da água até seu aquecimento e ganho de estabilidade em sua leitura (conforme preconiza o manual do equipamento); após o aquecimento, a câmara então foi acondicionada na superfície do corpo hídrico.

A medição é interrompida quando se estabiliza a concentração da câmara, que indica o equilíbrio na concentração dos gases entre água e ar interno à câmara, que é no tempo aproximado de 15 minutos, dependendo do local de medição (Frankignoulle, 1988). Para se obter um novo fluxo, a câmara era retirada do contato com a superfície até a renovação do ar interior da câmara.

3.3 CÁLCULO DO FLUXO

Os fluxos de CO₂ foram calculados de acordo com a equação 2 (Frankignoulle, 1988).

$$F_{CO_2} = \left(\frac{d(pCO_2)}{dt} \right) \left(\frac{V}{RT_k S} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

F : é o fluxo (mol CO₂ m⁻² s⁻¹);

$d(pCO_2)/dt$: é a inclinação da acumulação de CO₂ na câmara (ppm s⁻¹);

V : é o volume da câmara (m³);

T_k : é a temperatura do ar (em graus Kelvin, K);

S : é a superfície área da câmara na superfície da água (m²); e

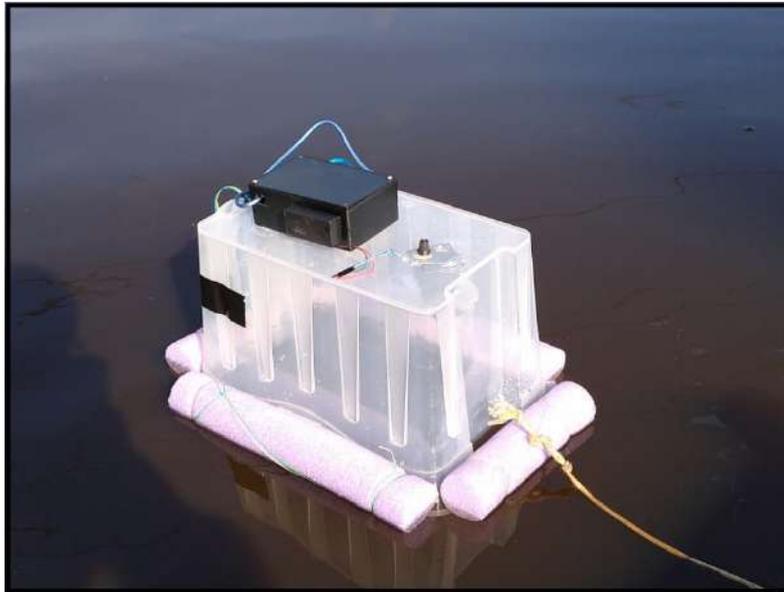
R : é a constante do gás (atm m³K⁻¹mol⁻¹).

Foram realizadas leituras em um intervalo de 12 segundos durante 10 a 15 minutos. A partir das séries de dados foram ajustadas regressões lineares sobre os dados de concentração de CO₂ em função do tempo, onde as equações resultantes foram derivadas para se obter o fluxo conforme a Equação 2 (Frankignoulle, 1988).

Os fluxos foram obtidos de 4 condições distintas: (A) medição com o protótipo diretamente sobre a superfície da água (Figura 5); (B) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de aguapés (*Eichhornia*

crassipes) (Figura 6); (C) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de braquiárias (*Urochloa arrecta*) (Figura 7); e (D) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de alfaces d'água (*Pistia stratiotes*) (Figura 8).

FIGURA 5: MEDIÇÃO A



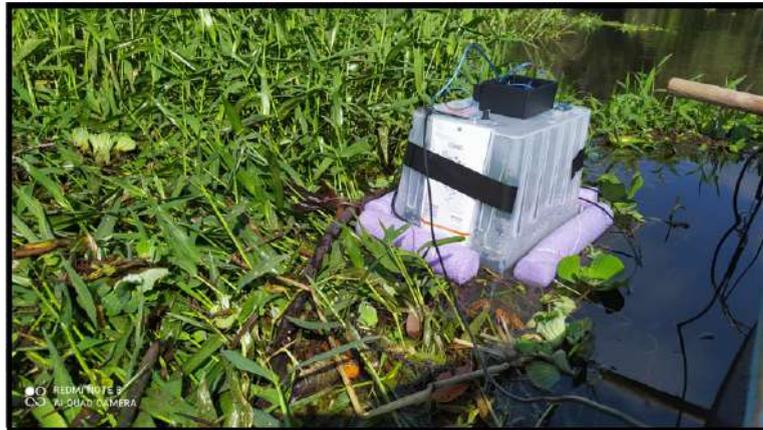
Fonte: Arquivo pessoal dos autores.

FIGURA 6: MEDIÇÃO B



Fonte: Arquivo pessoal dos autores.

FIGURA 7: MEDIÇÃO C



Fonte: Arquivo pessoal dos autores.

FIGURA 8: MEDIÇÃO D



Fonte: Arquivo pessoal dos autores.

3.4 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

Para cada série de dados foram calculados os coeficientes de variação (CV) das amostras de acordo com a equação:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$

(Equação 3)

Onde s e \bar{x} são o desvio padrão e a média de cada amostra, respectivamente. Com isso foram adotados os intervalos sugeridos por Gomes (1990):

Baixo: $CV < 10\%$;

Médio: $10\% < CV \leq 20\%$;
 Alto: $20\% < CV \leq 30\%$;
 Muito alto: $CV > 30\%$.

A Tabela 2 mostra as medições A, B, C e D, com data, hora, média aritmética (\bar{x}) desvio-padrão (S) e o coeficiente de variação (CV) das séries obtidas em campo.

Tabela 2: Seleção das amostras.

Amostra	Medição	Dia	Horário	\bar{x}	S	CV
1	D	30/06/22	14h20	386,39	71,54	18,51%
2	D	30/06/22	14h56	441,24	28,83	6,53%
3	B	30/06/22	15h15	249,18	20,30	8,15%
4	B	05/07/22	16h45	210,70	31,61	15,00%
5	C	05/07/22	14h41	457,11	29,47	6,45%
6	A	07/05/22	15h00	356,05	6,94	1,95%
7	C	05/07/22	15h47	407,08	12,55	3,08%
8	A	07/05/22	16h10	209,59	31,86	15,20%
9	A	19/07/22	10h25	234,28	4,06	1,73%
10	A	20/07/22	10h55	248,67	16,61	6,68%
11	C	20/07/22	12h20	312,85	16,55	5,29%

(A) medição com o protótipo diretamente sobre a superfície da água;

(B) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de aguapés;

(C) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de braquiárias;

(D) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de alfaces d'água.

Elaboração: Os autores.

Quanto menor o CV , menor é a flutuação da série em torno da média, uma condição desejável de operação da câmara, pois o sequestro ou acúmulo de gás na câmara ocorre de forma gradativa, em resposta ao ciclo do carbono no corpo hídrico. Assim, selecionou-se somente as amostras com o coeficiente de variação baixo ($CV < 10\%$). Nota-se na Tabela 2 que as amostras 1, 4 e 8 possuem coeficientes de variação superiores à 10%, destarte, foram excluídas para as análises dos fluxos.

RESULTADOS

A Tabela 4 mostra os fluxos obtidos para as amostras selecionadas.

Observa-se um balanço de fluxo positivo para as amostras 2, 3, 5, 7, 9 e 10 e fluxo negativo para as amostras 11 e 6. A ordem de grandeza dos fluxos é semelhante à encontrada na literatura (VALE *et al*, 2017; RASERA, 2010).

As diferenças encontradas nas amostras se deu devido às condições do ambiente de medição, que variam significativamente com a distância das margens, com a maré (que implica na intensidade da correnteza), com o local de medição (foram feitas medições sobre vegetação e sobre o rio), bem como devido a perturbações nos sedimentos promovidas pela embarcação utilizada na medição.

Tabela 4: Fluxos obtidos.

Amostra	Medição	Dia	Horário	Fluxo [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
2	D	30/06/22	14h56	94,74
3	B	30/06/22	15h15	63,16
5	C	05/07/22	14h41	126,32
6	A	07/05/22	15h00	-21,05
7	C	05/07/22	15h47	52,63
9	A	19/07/22	10h25	10,53
10	A	20/07/22	10h55	94,74
11	C	20/07/22	12h20	-73,68

(A) medição com o protótipo diretamente sobre a superfície da água;

(B) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de aguapés;

(C) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de braquiárias;

(D) medição com o protótipo sobre a superfície contendo espécies de alfaces d'água.

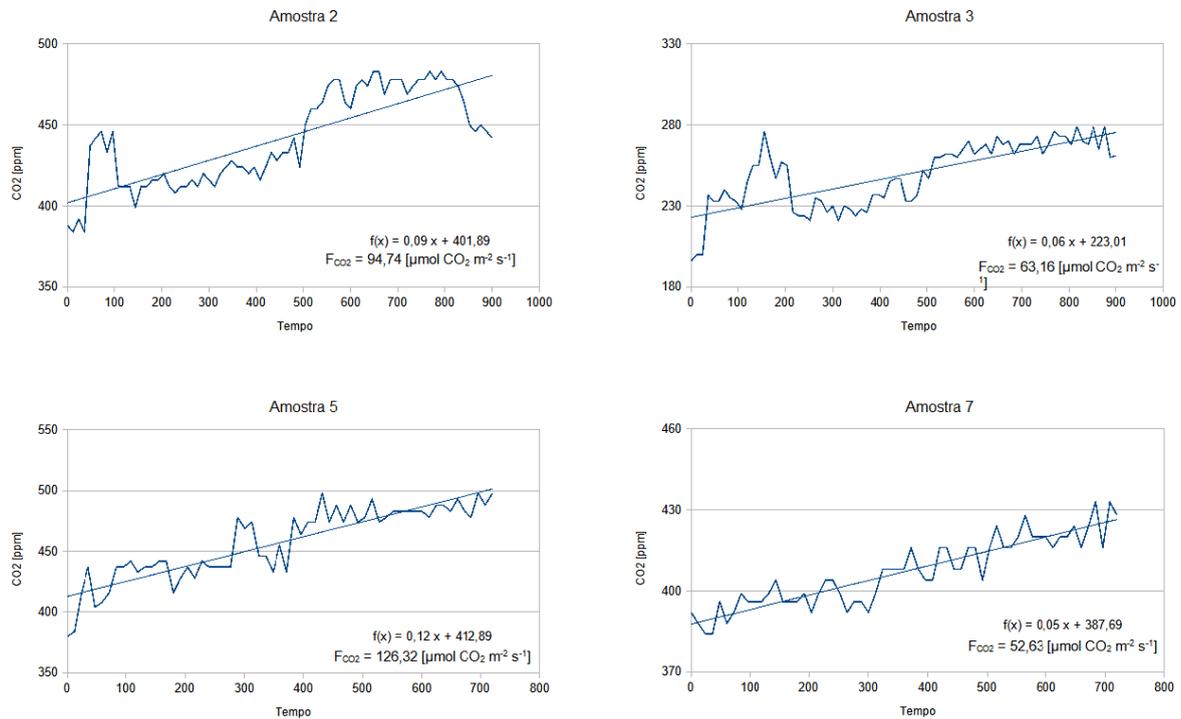
Elaboração: Os autores.

Fluxos negativos podem ser considerados como uma prevalência de absorção de CO_2 em relação a liberação do gás pelo rio. Embora o foco deste trabalho não tenha sido avaliar variáveis ambientais que poderiam interferir nos resultados, estudos mostram que plantas aquáticas têm alta capacidade de sequestro de carbono (HERNANDEZ, 2010; ANDRADE *et al.*, 2007; SEGNINI *et al.*, 2007; BODDEY *et al.*, 2001). Desta forma, o balanço do fluxo negativo de CO_2 pode ser fortemente influenciado pela presença destas hidrófitas. No entanto, os resultados encontrados não podem confirmar tal relação, pois foram obtidos apenas dois fluxos negativos, sendo um com a presença de braquiárias e outro sem a presença de vegetação emersa.

Vale ressaltar que a variação de temperatura, a convecção penetrativa, a salinidade e o vento, são fatores que levam a oscilação do fluxo de CO_2 (VALE, 2017; ARMANI, 2014; RASERA, 2010). Logo, a simples mudança de horário, infligindo sombra no local, pode ser condição suficiente para a mudança do fluxo.

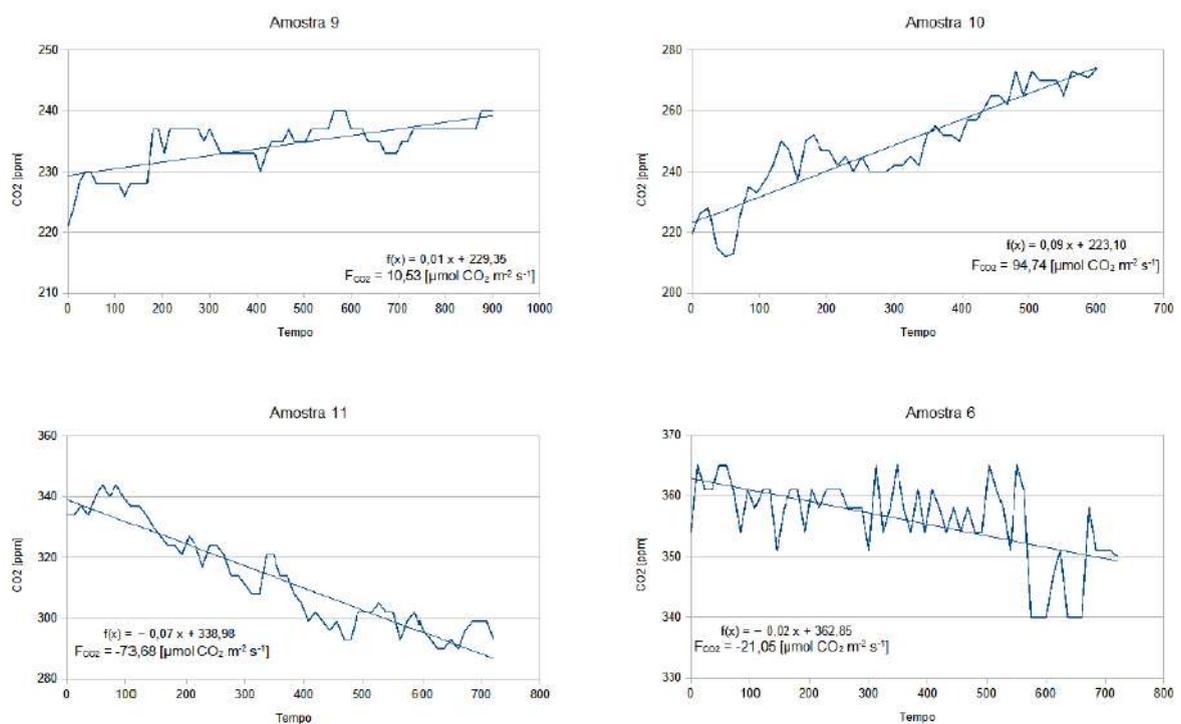
As figuras 9 e 10 mostram a variação das concentrações das amostras selecionadas. É possível notar algumas oscilações na obtenção das concentrações. Essas variações podem ter origem em vários fatores, tais como umidade, sendo esta uma característica do local onde foi realizado o estudo, nas ondulações geradas por outras embarcações que passavam pelo local no momento da coleta de dados, gerando turbulência e movimentando tanto do equipamento como do leito do rio.

FIGURA 9: PRESSÕES PARCIAIS DE CO₂.



Elaboração: Os autores.

FIGURA 10: PRESSÕES PARCIAIS DE CO₂.



Elaboração: Os autores.

O sensor utilizado realiza leitura em uma faixa bastante ampla, que vai de 0 a 10000 ppm, mas seu funcionamento ocorre em uma curta faixa de tensão, a qual é transmitida para a placa controladora e assim convertida na leitura de ppm. Desta forma, interferências mínimas podem causar alterações bruscas na transmissão desta tensão e, conseqüentemente, nos dados gerados.

Cabe ainda ressaltar que não há um consenso na literatura quanto à correta tensão de trabalho do sensor MG811 (ALLDATASHEET, 2022; DFROBOT, 2022). Algumas fontes indicam 5v, sendo esta a tensão utilizada para o presente trabalho, outras 6v. A tensão pode interferir no funcionamento do sensor, assim como a corrente fornecida, sendo esta responsável pelo aquecimento da resistência interna presente no equipamento e conseqüentemente necessária para o bom funcionamento, alterações destes parâmetros podem gerar oscilações indesejadas nos dados. Desta forma, outros ensaios deverão considerar a possibilidade de se aprimorar a estabilidade da tensão do sistema.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um protótipo de uma câmara flutuante com analisadores de baixo custo, construído para medição de fluxo de CO₂ em corpos hídricos. Os resultados obtidos revelaram fluxos com ordem de grandeza semelhante ao encontrado em outros estudos. Os resultados obtidos em ambientes onde hidrófitas estavam presentes apresentaram tanto fluxos positivos quanto negativos. Embora a literatura traga o potencial de plantas aquáticas na retenção de carbono e conseqüente influência da diminuição deste gás na atmosfera, perturbações nos sedimentos do rio podem gerar concentrações maiores na coluna d'água, superando a absorção de CO₂ pelo vegetal, e conseqüentemente gerando fluxos positivos. Outro tópico importante a se considerar é a variação da concentração de CO₂ na câmara. Algumas variáveis podem causar alterações nos dados gerados, como a tensão utilizada e a corrente fornecida ao equipamento. Estudos posteriores deverão considerar estes fatores para uma melhora na obtenção dos dados.

Por fim, vale salientar que mais estudos devem ser realizados com os sensores de baixo custo, a fim de identificar as variáveis que possam gerar qualquer tipo de inconsistência nos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLDATASHEET. MG811 - CO₂ Sensor. Disponível em: <<https://www.alldatasheetpt.com/view.jsp?Searchword=%20MG811%20DATASHEET>>. Acesso em 19 jul. 2022.
2. ANDRADE, L. J., *et al.* El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. Bol. Soc. Bot. Méx. 81 p: 37-50. 2007. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/577/57708102.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2022.
3. ARMANI, F. A. S. Medição e análise de fluxos de CO₂ no reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu com o Método de Covariâncias Turbulentas. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFPR_fc96b259bd3d29dde3790cd43f974005>. Acesso em: 29 dez. 2021.
4. BODDEY, R.M.; *et al.* 2001. Potencial para acumulação e seqüestro de carbono em pastagens de Brachiaria. In: Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira. Embrapa Meio Ambiente, 2001. Jaguariúna, SP. p.213-229. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/235635492_Potencial_para_acumulacao_e_sequestro_de_carbono_em_pastagens_de_Brachiaria_In_Mudancas_Climaticas_globais_e_a_Agropecuaria_Brasileira>. Acesso em: 05 nov. 2022.
5. COLE, J.J.; CARACO, N.F. Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism. Mar. Freshwater Res., 2001, 52, 101-10. Disponível em: <https://www.caryinstitute.org/sites/default/files/public/reprints/Carbon_in_catchments.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2022

6. DFROBOT. Gravity: Analog CO2 Gas Sensor For Arduino (MG-811 Sensor). Disponível em: <<https://www.farnell.com/datasheets/3176108.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2022.
7. FRANKINOULLE, M. (1988), Field measurements of air-sea CO2 exchange, *Limnology and Oceanography*, 33, 313-322. 1998. Universite de Liege, Laboratoire d'oceanologie, Institut de chimie. Disponível em: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/246255/1/frankignoulle_1988.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2022.
8. HERNANDEZ, M. E. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoam*, Chapingo, v. 28, n. 2, p. 139-147, jun. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000200005&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 02 nov. 2022.
9. IAT - Instituto Água e Terra. Encarte II - Análise regional da EEG. 60 p. 2020. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/ee_guaraguacu_6e2.pdf>. Acesso em 21 abr. 2022.
10. Lansdown, K., & Matson, P. (2011). Ecosystem-scale measurements of carbon, water and energy fluxes from inland waters using the eddy covariance method. *Inland Waters*, 1(1), 47-59. <https://doi.org/10.5268/IW-1.1.351>
11. MALDONADO, L. H., GAMARO, P. E. M. Métodos de correção de vazões em tramos superiores de cruvas-chaves e para o caso de histerese. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - 2013. ISSN 2318-0358. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3362>>. Acesso em: 18 jun. 2020.
12. NOAA - National Ocean Service - National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce. What is the carbon cycle? The carbon cycle is nature's way of recycling carbon atoms. Carbon is the foundation for all life on Earth. 2022. Disponível em: <<https://oceanservice.noaa.gov/facts/carbon-cycle.html>>. Acesso em 12 mar. 2022.
13. PERRIN, S. Rivers and streams emit much more CO2 at night than during the day. EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne. EPFL News. 2021. Disponível em: <<https://actu.epfl.ch/news/rivers-and-streams-emit-much-more-co2-at-night-tha/>>. Acesso em 12 mar. 2022.
14. RASERA, M de F. F. L. Determinação dos fluxos de CO2 e parâmetros físicos envolvidos neste processo em diferentes ambientes fluviais da Amazônia. 2010. 127 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64135/tde-18102010-104445/publico/Doutorado.pdf>>. Acesso em 12 mar. 2022.
15. SCHAEFFER, R. D. Estudo e desenvolvimento de um sensor de CO2 de baixo custo. 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4199/000453557.pdf?sequence>>. Acesso em 12 mar. 2022.
16. SEDEST - Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo. 1º Caderno. 2020. 37 p. Disponível em: <https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2020-03/caderno1_a.pdf>. Acesso em 21 abr. 2022.
17. SEGNINI, *et al*. Potencial de sequestro de carbono em área de pastagem de *Brachiaria decumbens*. XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Gramado - RS. 2007. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPPE/17172/1/PROCIOP2007.00153.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2022.
18. VALE, R. S. *et al*, Concentração e fluxo de CO2 sobre o reservatório hidrelétrico de Balbina (AM). *Eng Sanit Ambient*. v.22 n.1. jan/fev 2017. p. 187-193. DOI: 10.1590/S1413-41522017143032. 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/QM9GpMnkwS6bMkkh7CWJZ5n/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 17 out. 2022