



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

THAÍS LOPES PINHEIRO

EFEITOS DA REINUNDAÇÃO DE SEDIMENTOS EXPOSTOS POR SECAS
PROLONGADAS SOBRE AS EMISSÕES DE CARBONO EM
RESERVATÓRIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA

NATAL - RN

2019

THAÍS LOPES PINHEIRO

**EFEITOS DA REINUNDAÇÃO DE SEDIMENTOS EXPOSTOS POR SECAS
PROLONGADAS SOBRE AS EMISSÕES DE CARBONO EM
RESERVATÓRIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientadora: Prof. Dr.^a Vanessa Becker

Co-orientador: Prof. Dr. André Megali Amado

NATAL - RN

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por ter me permitido chegar até aqui. Ele, que sempre me guiou pelos caminhos mais virtuosos, foi a minha fonte inesgotável de força em todos os momentos.

A Nossa Senhora da Candelária (“Luz que nos guia e ampara; Luz que ilumina e conduz”), minha fiel intercessora, a Nossa Senhora de Fátima e aos Santos Pastorinhos (Lúcia, Francisco e Jacinta), agradeço pela graça alcançada.

Aos meus pais, Ney e Célia, pelo exemplo de perseverança e dedicação. Essa conquista eu devo, em grande parte, a eles, que sempre foram meus maiores incentivadores. Agradeço por sempre acreditarem em mim e por nunca me deixarem desistir dos meus sonhos. Agradeço, também, a minha irmã Milena, minha pessoa, minha alma gêmea, pela parceria de vida. Eu amo vocês mais que tudo nessa vida. A todos os familiares, em especial ao meu avô Francisco Lopes Torquato (*in memoriam*) que partiu recentemente para a morada eterna, agradeço por acreditarem em mim e por vibrarem comigo a cada conquista.

Ao meu noivo (quase marido) Renan, agradeço por ter sido meu combustível de amor diário e um dos meus maiores incentivadores. Desde sempre, apoiou todos os meus planos de vida e sonhou comigo cada detalhe desta conquista. Obrigada por caminhar junto comigo. Te amo.

A minha orientadora, Vanessa Becker, por ter depositado em mim toda a confiança para a realização deste trabalho e por todos os ensinamentos no decorrer desses dois anos. Muito do que me tornei devo a ela, pelo grande exemplo de profissional (professora e pesquisadora) e pessoa que tive à frente. Agradeço, também, ao meu co-orientador, André Megali Amado, por ter me apresentado o fantástico mundo do “carbono”. Agradeço por ter entrado de cabeça nesse projeto, por ter me acolhido em seu laboratório e por sempre me estimular a dar o meu melhor. A eles, minha gratidão.

À CAPES pela concessão de bolsa de mestrado.

Ao CNPQ pelo financiamento da pesquisa através do Projeto “Qualidade da disponibilidade hídrica e técnicas de mitigação frente os eventos extremos de seca na região semiárida brasileira” (CNPq/Universal Processo nº 407783/2016-4).

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, ao Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental e, em especial, ao ELISA (Estudos Limnológicos do Semiárido), meu grupo

de pesquisa. Cada pessoa que passou pelo ELISA durante esses dois anos em que estive envolvida no projeto tem uma importância singular na minha formação. Agradeço por terem me ensinado o verdadeiro significado de “pesquisa” e por, mesmo diante das dificuldades, não deixarem de acreditar num futuro melhor para nós, pesquisadores.

Agradeço ao Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal de Juiz de Fora por ter cedido toda a estrutura e todo o material necessários para a realização deste trabalho. Agradeço a todas pessoas com as quais tive oportunidade de conviver durante a minha estadia em Juiz de Fora pela amizade, pelo carinho e, sobretudo, pela acolhida.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho. Muito obrigada.

“Eu asseguro que, se vocês tiverem a fé do tamanho de um grão de mostarda, poderão dizer a este monte: ‘Vá daqui para lá’, e ele irá. Nada será impossível para vocês”

Mt, 17:20

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
APRESENTAÇÃO	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT	12
INTRODUÇÃO GERAL	14
CAPÍTULO 1 - CO₂ AND CH₄ FLUX IN DRYLAND RESERVOIRS OF THE SEMIARID REGION AFTER AN EXTREME DROUGHT EVENT	18
ABSTRACT	18
1. INTRODUCTION.....	19
2. MATERIALS AND METODS	20
2.1. Study Area	20
2.2. Sampling and incubation	22
2.3. Analytical procedures	23
2.4. Statistical analyzes.....	24
3. RESULTS.....	24
4. DISCUSSION.....	28
5. CONCLUSION	30
6. REFERENCES	32
CAPÍTULO 2 - EFEITOS DO CICLO SECA-REINUNDAÇÃO NAS EMISSÕES DE CO₂ E CH₄ EM SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIO COM CULTIVOS AGRÍCOLAS.....	37
RESUMO	37
ABSTRACT	38
1. INTRODUÇÃO.....	39
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
2.1. Área de estudo	41
2.2. Amostragem dos sedimentos e incubação	42
2.3. Procedimentos analíticos	43
2.4. Análises estatísticas	44
3. RESULTADOS	45
4. DISCUSSÃO.....	50
5. CONCLUSÃO.....	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59

CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Localização dos reservatórios.	16
Fig. 2. Location of the reservoirs included in this study.	21
Fig. 3. (a) CO ₂ and (b) CH ₄ flux observed in headspace of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the fluxes between treatments, controls and reservoirs ($p < 0.05$).	25
Fig. 4. CO ₂ and CH ₄ concentrations observed in the water column of the sediment pipes of the reservoirs of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU). The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0,05$).	26
Fig. 5. Average concentration of dissolved oxygen (DO) of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0,05$).	26
Fig. 6. Average concentration of (a) Dissolved organic carbon – DOC, (b) Total nitrogen – TN, (c) Soluble Reactive Phosphorus – SRP, (d) Total phosphorus – TP, in the re-inundated sediment of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0,05$).	27
Fig. 7. Average values of sediment (a) Organic carbon – OC(s), (b) Total nitrogen – TN(s), (c) Total phosphorus – TP(s), (d) Moisture in Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0.05$).	28
Fig. 8. Localização do reservatório Dourado, no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil.	41
Fig. 9. Fluxos de (a) CO ₂ e (b) CH ₄ no headspace nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S).	46
Fig. 10. Concentração de (a) CO ₂ e (b) CH ₄ na água nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S).	47
Fig. 11. (a) Oxigênio dissolvido – OD, (b) Carbono orgânico no sedimento – CO(s), (c) Nitrogênio total no sedimento – NT(s), (d) Fósforo total no sedimento – FT(s), (e) Fósforo reativo solúvel na água – FRS, (f) Fósforo total na água – PT, (g) Carbono orgânico	

dissolvido na água – COD, (h) Nitrogênio total na água – NT, (i) umidade nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S) ($\pm$ SE). As letras diferentes indicam diferenças estatísticas entre os dois ambientes ($p < 0,05$). 48

Fig. 12. (a) Fluxo médio de CO₂, (b) Fluxo médio de CH₄, (c) Concentração de CO₂ na água, (d) Concentração de CH₄ na água nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S) ($\pm$ SE). As letras diferentes indicam diferenças estatísticas entre os dois ambientes ($p < 0,05$). 49

Fig. 13. Análise de componentes principais (PCA). (a) Condutividade elétrica (CE), temperatura (T), concentração de CH₄ na água (CH₄.a.), fluxo de CH₄ (CH₄), fluxo de CO₂ (CO₂), concentração de CO₂ na água (CO₂.a.), oxigênio dissolvido (OD), (b) Ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S). 50

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação, intitulada “EFEITOS DA REINUNDAÇÃO DE SEDIMENTOS EXPOSTOS POR SECAS PROLONGADAS SOBRE AS EMISSÕES DE CARBONO EM RESERVATÓRIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA”, é apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O trabalho foi realizado no Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRN, em parceria com o Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal de Juiz de Fora, sob orientação da Prof.^a Dr.^a. Vanessa Becker e co-orientação do Prof. Dr. André Megali Amado. Esta pesquisa foi parte integrante do projeto “Qualidade da disponibilidade hídrica e técnicas de mitigação frente os eventos extremos de seca na região semiárida brasileira”, financiado pelo CNPq (CNPq/Universal Processo nº 407783/2016-4).

A dissertação é composta por dois capítulos em formato de artigo científico, cada qual contendo resumo, abstract, introdução, materiais e métodos, resultados, discussão, conclusões e referências bibliográficas. Ambos os capítulos abordam a emissão de carbono de sedimentos expostos de reservatórios da região semiárida brasileira após experimento de reinundação. O primeiro capítulo tem como tema “FLUXOS DE CO₂ E CH₄ EM SEDIMENTOS SECOS DE RESERVATÓRIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA APÓS EVENTO DE SECA EXTREMA” e o segundo capítulo tem como tema “EFEITOS DO CICLO SECA-REINUNDAÇÃO NAS EMISSÕES DE CO₂ E CH₄ EM SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIO COM CULTIVOS AGRÍCOLAS”.

EFEITOS DA REINUNDAÇÃO DE SEDIMENTOS EXPOSTOS POR SECAS PROLONGADAS SOBRE AS EMISSÕES DE CARBONO EM RESERVATÓRIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA

RESUMO

O aumento da ocorrência e da intensidade dos eventos de seca nas regiões semiáridas tem contribuído consideravelmente para a exposição regular e prolongada dos sedimentos dos reservatórios à atmosfera. Este cenário hidrológico extremo pode afetar o processamento da matéria orgânica e alterar as taxas de emissão de gases do efeito estufa (GEE) nos reservatórios, uma vez que esses ecossistemas aquáticos têm papel essencial na ciclagem do carbono (C). Além disso, na região semiárida brasileira, durante eventos de seca extrema, os sedimentos expostos dos reservatórios são utilizados para cultivos agrícolas devido à grande quantidade de fósforo estocado. Esta prática define novas áreas bioquimicamente ativas, que podem influenciar nas taxas de emissão de dois GEE, o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Para determinar como os eventos de reinundação atuam nas taxas de emissão de C, estimamos, experimentalmente, os fluxos de CO₂ e CH₄ em sedimentos expostos da área de drenagem de quatro reservatórios da região semiárida brasileira (Marechal Dutra – Gargalheiras, Passagem das Traíras, Ministro João Alves – Boqueirão de Parelhas e Cruzeta) com diferentes propriedades físico-químicas após simulação de reinundação e comparamos sua resposta com as emissões nos sedimentos secos. A intensidade das emissões de C variou fortemente entre todos os reservatórios. Os fluxos de CO₂ e CH₄ observados variaram de 10-40 mg C m⁻² dia⁻¹ e 0,7-1,3 mg C m⁻² dia⁻¹ nos sedimentos secos e de 3-78 mg C m⁻² dia⁻¹ e 0,4-13,5 mg C m⁻² dia⁻¹ nos sedimentos reidratados, respectivamente. As concentrações de nutrientes e os teores de carbono orgânico impulsionaram o fluxo de CO₂ e nenhuma variável mostrou forte relação com o fluxo de CH₄. No reservatório de Dourado, comparamos as respostas dos fluxos de CO₂ e CH₄ após simulação de reinundação dos sedimentos expostos com e sem cultivos agrícolas. Os fluxos de CO₂ e CH₄ nas áreas com cultivos agrícolas foram cerca de três e duas vezes maiores que os fluxos nas áreas sem cultivos agrícolas, respectivamente. O teor de carbono orgânico e a concentração de nutrientes (nitrogênio e fósforo) na água e no sedimento mostraram ser impulsionadores do fluxo de CO₂ e CH₄. A compreensão dos fluxos de GEE em reservatórios que experimentam o ciclo secagem-reinundação é fundamental para o desenvolvimento de

estratégias de manejo desses ambientes. Assim, as emissões de C de sedimentos expostos e reinundados devem ser explicitamente consideradas nas emissões totais das redes fluviais, particularmente sob cenários previstos de mudanças climáticas globais, que devem aumentar a temporalidade e a espacialidade das precipitações.

Palavras-chave: Dióxido de carbono. Metano. Mudanças climáticas. Reservatórios artificiais. Áreas secas.

EFFECTS OF REINUNDATING SEDIMENTS EXPOSED BY EXTREME DROUGHT EVENTS ON THE CARBON EMISSION FROM RESERVOIRS IN SEMIARID REGION

ABSTRACT

The increased occurrence and intensity of drought events in the semiarid regions has contributed considerably to the regular and prolonged exposure of reservoir sediment to the atmosphere. This extreme hydrological scenario may affect the processing of organic matter and alter greenhouse gas (GHG) emission rates in reservoirs, as these aquatic ecosystems play an essential role in carbon cycling (C). In addition, during extreme drought events in the Brazilian semi-arid region, exposed sediment from the dry reservoir drainage area are transformed into agricultural cultivation sites due to the large amount of stored phosphorus. This practice defines new biochemically active areas that may influence the emission rates of two GHGs, carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄). To determine how re-flooding events act on C emission rates, we experimentally estimated CO₂ and CH₄ flux in exposed sediment from the drainage area of four reservoirs in the Brazilian semiarid region (Marechal Dutra - Gargalheiras, Passagem das Traíras, Ministro João Alves - Boqueirão de Parelhas and Cruzeta) with different physicochemical properties after re-flooding simulation and compared their response with emissions in dry sediment. The intensity of C emissions varied strongly in and among all reservoirs. The observed CO₂ and CH₄ fluxes ranged from 10-40 mg C m⁻² day⁻¹ and 0.7-1.3 mg C m⁻² day⁻¹ in dry sediment and from 3-78 mg C m⁻² day⁻¹ and 0.4-13.5 mg C m⁻² day⁻¹ in rehydrated sediments, respectively. Nutrient concentrations and organic matter contents boosted CO₂ flux and no variable showed a strong relationship with CH₄ flux. In Dourado reservoir, we compared the responses of CO₂ and CH₄ flux after re-flooding simulation in exposed sediment with and without agricultural cultivation. CO₂ and CH₄ flux in cultivated areas were about three and two times higher than the flux in the non-cultivated areas, respectively. Organic matter content and nutrient concentration (nitrogen and phosphorus) in water and sediment in cultivated areas were found to be drivers of CO₂ and CH₄ flux. Understanding GHG flux in reservoirs that experience the drying and re-flooding cycle is fundamental for the development of management strategies for these environments. Thus, C emissions from exposed and re-flooded sediment should be explicitly considered in the total emissions from river networks, particularly under

predicted scenarios of global climate change, which should increase the temporality and spatiality of rainfall.

Keywords: Carbon Dioxide. Methane. Climate Change. Man-made reservoirs. Dry areas.

INTRODUÇÃO GERAL

Reservatórios artificiais são compartimentos construídos em larga escala nas regiões semiáridas para armazenar água e controlar enchentes, em detrimento da grande espacialidade e temporalidade das precipitações (WCD, 2001). A construção de barragens, por sua vez, pode causar mudanças significativas nas características físico-químicas do ambiente, inundando solos e vegetações. Há uma preocupação crescente com as emissões de gases do efeito estufa (GEE) de reservatórios artificiais, uma vez que a inundação de grandes estoques de matéria orgânica pode desencadear pulsos de respiração microbiana, convertendo o carbono orgânico em dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) (DEEMER et al., 2016; MACKLIN et al., 2018).

Nas regiões semiáridas, a alta variabilidade das precipitações expõe os reservatórios a flutuações sazonais no nível da água (BARBOSA et al., 2012), expondo os sedimentos de fundo à atmosfera. Esses ecossistemas experimentam crescentes perturbações hidrológicas, refletindo as mudanças climáticas, com períodos de secas mais frequentes e duradouros (MARENGO et al., 2010). Dessa forma, a exposição dos sedimentos das áreas de drenagem dos reservatórios pode afetar a acumulação de matéria orgânica, alterando o fluxo de C (KOSTEN et al., 2018), uma vez que o carbono presente no sedimento exposto pode ser remineralizado, resultando na emissão de GEE para a atmosfera (AMORIM; SANTOS; CAMARGO, 2019; BEAULIEU et al., 2018; GALLO et al., 2014a; SKINNER et al., 2014).

A exposição prolongada dos sedimentos também permite que a população interfira na paisagem natural. Na região semiárida do Brasil, os sedimentos expostos das áreas de drenagem dos reservatórios vêm sendo utilizados como locais de intensa atividade agrícola para o cultivo de espécies vegetais. A conversão das áreas naturais em áreas de cultivo pode alterar a estrutura do ambiente em níveis ecossistêmicos e pode implicar no aumento da carga de nutrientes (FURLANETTO et al., 2018; KAUSHAL et al., 2014), alterando o fluxo do carbono, pois o incremento de biomassa vegetal pode subsidiar os processos de decomposição microbiana.

Embora se espere que secas prolongadas ocorram com maior frequência em parte do mundo (IPCC, 2014), pouco se sabe sobre como a duração e a intensidade das secas afetarão o processamento de C nos sedimentos expostos dos reservatórios (JIN et al., 2016). Mais do que isso, pouco se sabe sobre como eventos de precipitação após longos períodos de seca podem afetar o metabolismo aquático e do sedimento, especialmente no

que diz respeito às respostas das plantas inundadas nos sedimentos cultivados. Ainda que estudos anteriores tenham mostrado que as emissões de GEE variam durante um ciclo de secagem e reidratação (FROMIN et al., 2010; FURLANETTO et al., 2018; JACINTHE, 2015; KOSTEN et al., 2018), nenhuma das avaliações foi realizada em sistemas localizados em regiões semiáridas.

Levando em consideração que os reservatórios das regiões semiáridas estão propensos a ciclos recorrentes de secagem-reinundação, devido às suas características climáticas, torna-se bastante relevante estudar os efeitos desses ciclos nos fluxos de CO₂ e o CH₄. Neste estudo, nós investigamos a importância da secagem e reinundação nas emissões de GEE de sedimentos de reservatórios com base em medições de emissões diárias de CO₂ e CH₄ após simulação de reinundação em escala experimental. Também, avaliamos o impacto do uso de sedimentos expostos de reservatórios artificiais para práticas agrícolas na emissão de CO₂ e CH₄ após sua reinundação, comparando as respostas de sedimentos com e sem cultivos agrícolas.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado nos reservatórios artificiais Marechal Dutra (Gargalheiras), no município de Acari (6°26'15"S; 36°41'15"W), Cruzeta, no município de Cruzeta (6°26'15"S; 36°48'45"W), Ministro João Alves (Boqueirão de Parelhas), no município de Parelhas (6°41'42.7"S; 36°39'18.8"W), Passagem das Traíras, no município de São José do Seridó (6°30'55"S; 36°56'32"W) e Dourado, no município de Currais Novos (6°14'14.15"S; 36°30'19.43"W) (Fig. 01). Os reservatórios estão inseridos na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açú (43.682 km²), sub-bacia do Rio Seridó, região semiárida do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil (Fig. 1).

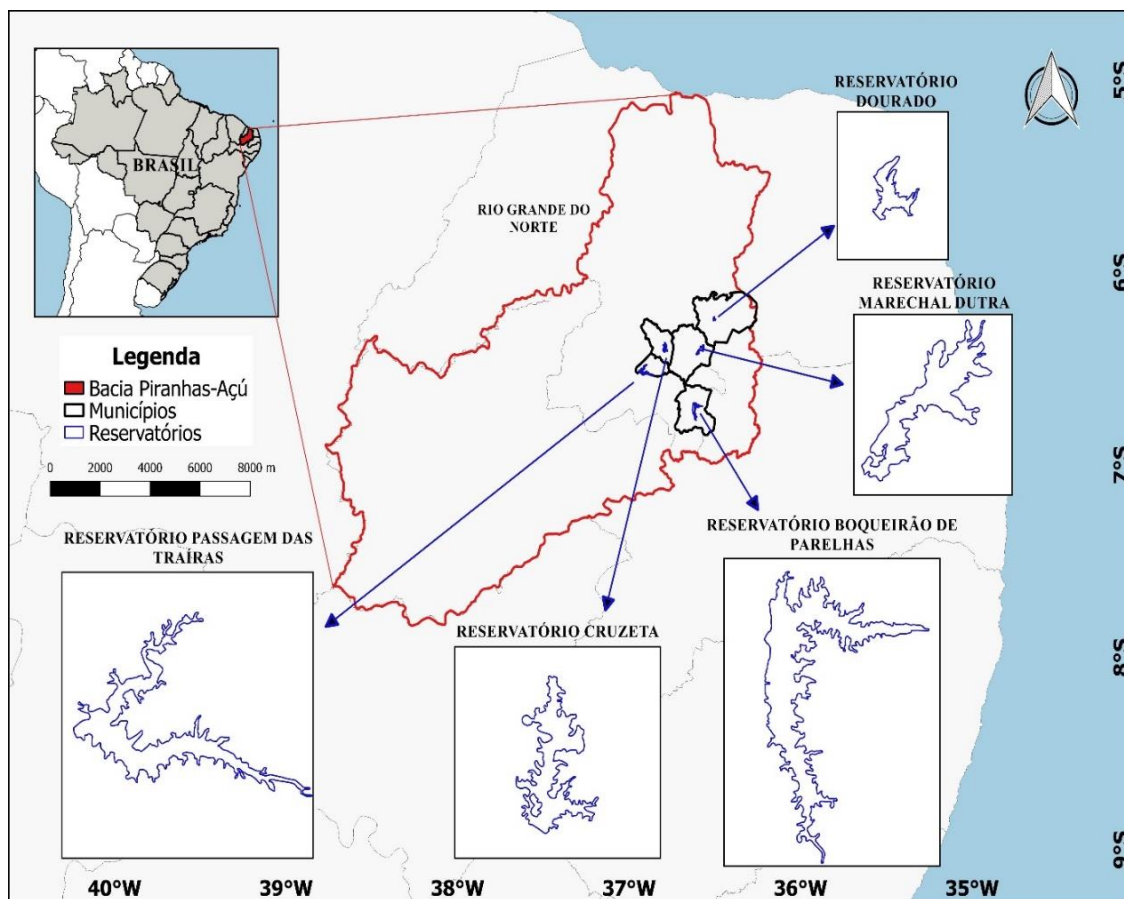


Fig. 1. Localização dos reservatórios.

O clima da região é classificado como semiárido tropical (BSh), caracterizado por ser quente e seco, de acordo com classificação proposta por Köppen (ALVARES et al., 2013). As elevadas temperaturas médias anuais (27,5°C) e as altas taxas de evapotranspiração (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007) acarretam um déficit no balanço hídrico durante grande parte do ano. A precipitação média normal é de 580 mm/ano e o período chuvoso compreende os meses de fevereiro a maio. Entretanto, a região semiárida potiguar enfrentou um prolongado período de seca que se iniciou em 2012 e durou até 2018, com chuvas abaixo da média, que levaram à diminuição brusca dos volumes dos reservatórios.

A composição dos solos nas bacias dos reservatórios difere entre si. Na bacia dos reservatórios Passagem das Traíras e Cruzeta predomina a composição de luvisolos crômicos (rasos, de cores vivas, constituídos por material mineral com prevalência de areia no horizonte A e alta concentração de argila no horizonte B) (EMBRAPA, 2006; FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016). No entorno do reservatório Dourado predominam os neossolos litólicos (rasos, pouco desenvolvidos, assentados diretamente sobre rochas) de textura argilo-arenosa, com prevalência da fração granulométrica areia

nos primeiros centímetros de solo (EMBRAPA, 2006; OLIVEIRA, 2012). Nas bacias dos reservatórios Marechal Dutra e Ministro João Alves, por sua vez, podem ser encontrados os dois tipos de solo (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007).

CAPÍTULO 1

CO₂ AND CH₄ FLUX IN DRYLAND RESERVOIRS OF THE SEMIARID REGION AFTER AN EXTREME DROUGHT EVENT

FLUXOS DE CO₂ E CH₄ EM SEDIMENTOS SECOS DE RESERVATÓRIOS DA
REGIÃO SEMIÁRIDA APÓS EVENTO DE SECA EXTREMA

ABSTRACT

The increase in the occurrence and intensity of drought events in semi-arid regions has contributed considerably to higher frequency and prolonged exposure of reservoir sediment to the atmosphere. This extreme hydrological scenario can affect the processing of organic matter and change the emission rates of greenhouse gases (GHG). In this study, we investigated carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) flux in exposed sediment of Brazilian reservoirs after simulation of inundation on an experimental scale. The intensity of carbon (C) emissions varied between all reservoirs. The observed CO₂ and CH₄ flux ranged from 10 to 40 mg C m⁻² day⁻¹ and from 0,7 to 1,3 mg C m⁻² day⁻¹ in dry sediment and from 3 to 78 mg C m⁻² day⁻¹ and from 0,4 to 13,5 mg C m⁻² day⁻¹ in the rehydrated sediment, respectively. High organic carbon contents and nutrient concentrations boosted CO₂ flux and no variable showed a strong relation with CH₄ flux. The understanding of GHG fluxes in reservoirs that experience the drying-inundation cycle is fundamental for the development of management strategies of these environments. The carbon emissions of exposed and inundated sediment should be explicitly considered in the total emissions of reservoirs and global carbon budgets. Because of the high spatial variability of GHG emissions in the re-inundated sediment, future works should investigate the extent and regulation of this variability to better estimate the contribution of this mechanism to the carbon cycling on Earth.

Keywords: Carbon dioxide. Methane. Flux of greenhouse gases. Sediment. Man-made reservoirs. Semi-arid.

1. INTRODUCTION

Carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) are two of the main greenhouse gases present in the atmosphere (FORSTER, 2007). The effect caused by the emission and sequestration of these gases has been widely studied and must be seen as a precursor to climate change, since the global stabilization of the Earth's temperature in the next few centuries should only be achieved if emissions are close to zero (MATTHEWS; CALDEIRA, 2008). Therefore, quantifying the emission and absorption rates of the global carbon budget is an essential part of mitigating climate change.

In the last few years, continental aquatic ecosystems (rivers, lakes and reservoirs) have been recognized as important regulators of the global carbon cycle (C) (BATTIN et al., 2008; HOLGERSON; RAYMOND, 2016; RAYMOND et al., 2013), although they occupy only a small surface area on Earth (VERPOORTER et al., 2014). These systems transport, transform and store considerable amounts of C and can be considered as sinks of organic carbon or sources of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) to the atmosphere (TRANVIK et al., 2009). CO₂ and CH₄ may originate from the heterotrophic metabolism of the microorganisms present in the environment (RAYMOND et al., 2013), and CH₄ is produced only under anoxic conditions, through the process of methanogenesis (BASTVIKEN et al., 2004).

Artificial reservoirs (dams) are structures built on a large scale in semi-arid regions to store water and control floods (WCD, 2001). The implantation of these compartments causes significant changes in the natural landscapes at ecosystem levels, especially when it is related to the accumulation of organic and inorganic terrestrial matter (COLE et al., 2007; TRANVIK et al., 2009). Furthermore, these reservoirs were recently recognized as important players in the carbon emission to the atmosphere (JUNGER et al., 2019). There is a growing concern about greenhouse gas (GHG) emissions from man-made reservoirs, once the flood of large stocks of organic matter can feed microbial decomposition by converting carbon to CO₂ and CH₄ (DEEMER et al., 2016; GUÉRIN et al., 2006).

In semi-arid regions, high rainfall variability exposes reservoirs to recurrent water level fluctuations (BARBOSA et al., 2012). These ecosystems experience increasing hydrological disturbances, reflecting as climate changes, with more frequent and longer droughts and more severe and less-predictable floodings (MARENGO et al., 2010). Dry periods may result in exposure of previously submerged sediment, releasing stored organic material and altering C flux due to changes in biogeochemical processes

(KOSTEN et al., 2018; WILLIAMSON et al., 2009). The carbon content in the exposed sediment can be mineralized, resulting in GHG emission to the atmosphere (AMORIM; SANTOS; CAMARGO, 2019; BEAULIEU et al., 2018; GALLO et al., 2014b; SKINNER et al., 2014).

Recent increases in drought intensity, such as in the Brazilian semi-arid region, were due to global warming (IPCC, 2014). Although much attention has been given to the impacts of artificial reservoirs construction on GHG emissions, only few studies investigate how drought affects the carbon balance in these systems. To examine the impacts of drought in the semi-arid region on GHG emissions from tropical reservoirs, we performed laboratory measurements of CO₂ and CH₄ flux from four reservoirs that had their sediment exposed due to a prolonged drought event. We compared, on an experimental scale, the CO₂ and CH₄ emissions of the four reservoirs after the inundation, and found that there is great variability of these GHG emissions during the drying-inundation cycle.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study Area

We performed experiments with sediment sampled in August 2018 from four artificial reservoirs of the Piranhas-Açu River watershed: Marechal Dutra – Gargalheiras (GAR) (6°26'15"S; 36°41'15"W), Passagem das Traíras (PT) (6°30'55"S; 36°56'32"W), Ministro João Alves – Boqueirão de Parelhas (BOQ) (6°41'42.7"S; 36°39'18.8"W) e Cruzeta (CRU) (6°26'15"S; 36°48'45"W) (Fig. 2). The reservoirs are located in the sub-basin of Seridó River, a semi-arid region of Rio Grande do Norte, northeast of Brazil, and are used mainly for human supply, irrigation, animal watering and recreation.

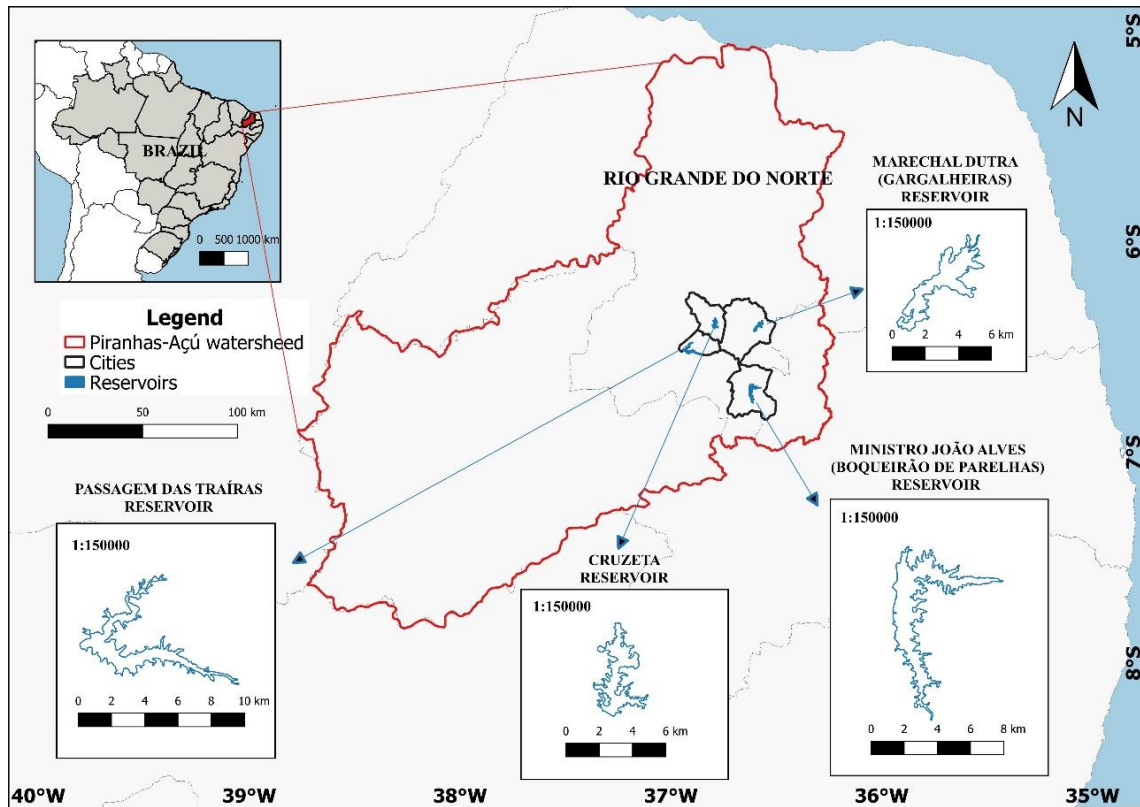


Fig. 2. Location of the reservoirs included in this study.

The climate of the region is classified as tropical semiarid (BSh), characterized by being warm and dry, according to the classification proposed by Köppen (ALVARES et al., 2013). The high annual average temperatures of 27.5°C and the high evapotranspiration rates (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007) lead to a deficit in the annual water balance of the reservoirs. The average normal rainfall is 580 mm/year and the rainy season comprises the months of February to May (IDEMA, 2012). However, the Brazilian semi-arid region faced a prolonged period of drought that began in 2012 and lasted until 2018, with below average rainfall, which led to a sudden decrease in the volumes of the reservoirs and consequent exposure of the sediment to the atmosphere.

At the sampling time, the total volume of left water in each reservoir were: Gargalheiras – 0,04% (17,500.00 m³); Cruzeta – 0,34% (79,343.00 m³); Boqueirão – 37,21% (31,549,077.00 m³); Passagem das Traíras – 3.36% (1,668,512.00 m³) of their maximum capacity.

The characteristics of the sediment vary according to the geology, morphology and surrounding areas of aquatic ecosystems. Near the Passagem das Traíras and Cruzeta reservoirs, the composition of chromatic luvisols (shallow, brightly colored, composed of Franco-sandy mineral material) is predominant. (EMBRAPA, 2006; FERREIRA, 2015;

MEDEIROS, 2016). In the surroundings of the reservoirs Gargalheiras and Boqueirão, we can find litholic neosols (shallow, less developed, settled directly on rocks) of sand-clay texture and chromic luvisols (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007).

2.2. Sampling and incubation

Sediment sampling and conditioning were done in Polyvinyl chloride (PVC) tubes of 30 cm in length and 10 cm in diameter, with no visible disturbance of the sediment. In each reservoir five samples were collected ($n = 05$), representing four replicates to simulate inundated sediment and one for control (dry sediment), with profiles of 10 cm of sediment in each tube. The samplings were performed in the exposed sediment near the remaining water reservoirs. They were transported to the laboratory after collection and were kept at a temperature of 27 °C for a period of 24 days before the start of incubation. In the laboratory, 15 cm (1,2 liters) of distilled water were added to the four replicates of each reservoir (controls remained only with sediment), aiming to simulate the flood of the exposed sediment, leaving around 5 cm of internal atmosphere in each tube (headspace). The water was added with the help of a laboratory wash bottle and the application rate was adjusted to avoid resuspension of the sediment.

The incubation lasted 49 days. During this time, the tubes remained open at the upper end at a temperature of 27 °C (± 3 °C), aiming to replicate ambient conditions. The water level kept constant in the replicates throughout the incubation period (adding distilled water daily) to compensate for losses due to evaporation, so that the volume of water in the tubes remained the same during the daily gas measurements.

During the incubation period, measurements of CO₂ and CH₄ fluxes were performed daily in the headspace and the concentration of CO₂ and CH₄ dissolved in the water above the sediment. Dissolved oxygen (DO), pH, electrical conductivity (EC), temperature (T) and water turbidity were also measured. Weekly, concentrations of total phosphorus (TP), soluble reactive phosphorus (SRP), dissolved organic carbon (DOC) and total nitrogen (TN) were measured in the water. At the end of the incubation period, the water was carefully withdrawn from the tubes with a hose connected to a suction pump. After the water withdrawal, sediment samples were collected for analysis of water content (moisture), TP, TN and organic carbon content.

2.3. Analytical procedures

For daily measurements of CO₂ fluxes, the cores were closed at the upper end with gas-tight PVC caps for a period of 9 minutes. The cover had an input and output connector coupled to an infrared gas analyzer (IRGA; PPSystems, EGM-4). The concentration of CO₂ in the headspace was registered every 3 minutes. For measurements of CH₄ fluxes, the cores were also closed for 9 minutes with PVC caps which had a "T" type connector. Every 3 minutes, the connector was opened and a sample of air from the headspace was withdrawn with a syringe. The air samples were analyzed on a gas chromatography (Bruker Corporation 450-GC), with flame ionization detector (FID). The chromatography was calibrated with certified standard ultrapure gas. The daily diffusive rates of the gases in the headspace were estimated through linear regression of the gas concentration vs. incubation time, taking headspace volume into consideration (ALMEIDA et al., 2016).

To evaluate the CO₂ and CH₄ concentrations in the water after reinundation, 10 mL of water and 10 mL of headspace air of each sample were extracted daily. The syringes were shaken so that the dissolved gases in the water would equilibrate and be released to the headspace. Air samples from the headspace were analyzed with the infrared gas analyzer (IRGA; PPSystems, EGM-4) and by gas chromatography (Bruker Corporation 450-GC) to record CO₂ and CH₄ concentrations in water, respectively.

Concentration measurements of DO, pH, EC, T and water turbidity were performed with the aid of a monitoring sonde (YSI 6920 V2). SRP and TP were analyzed through spectrophotometry (MURPHY, J.; RILEY, 1962) and DOC and TN through a total organic carbon analyzer (Shimadzu, TOC-L) to evaluate possible releases of phosphorus, carbon, and nitrogen from sediment to water. The SRP, DOC and TN samples were filtered with glass microfiber filters with a pore size of 0.6 µm (25mm, Sartorius Stedim).

Sediment samples were dried and homogenized to estimate nutrient content (TP and TN) and organic carbon content. The moisture content was calculated by the relation between the weight of the water and the weight of the dry sediment. The analyzes of TP and TN were performed by the persulfate digestion method (VALDERRAMA, 1981). The organic C content was determined by catalytic oxidation at a temperature of 900 °C using a total organic carbon analyzer (Shimadzu, SSM5000A).

2.4. Statistical analyzes

The differences in average fluxes of CO₂ and CH₄ between the exposed and re-inundated sediment of each reservoir and between the reservoirs were tested with a two-way ANOVA followed by Tukey's range test ($p < 0,05$). Concentrations of DO and nutrients of reservoirs after inundation and carbon, nitrogen and phosphorus contents in sediment after water withdrawal were tested with a one-way ANOVA followed by Tukey's range Test ($p < 0,05$) to identify possible statistical differences between the reservoirs. All analyzes were performed with R i386 Software 3.5.3.

3. RESULTS

The average flux of CO₂ and CH₄ varied between the reservoirs after the start of the incubation period. In Gargalheiras reservoir, CO₂ and CH₄ flux ($78 \pm 89 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $1 \pm 1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively) were higher in the re-inundated sediment than in the control. In Passagem das Traíras and Boqueirão, CO₂ flux ($45 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $10 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively) were higher in the controls and CH₄ flux were higher in the re-inundated sediment ($13 \pm 22 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $2 \pm 3 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively). In the reservoir of Cruzeta, CO₂ and CH₄ flux were higher in the controls ($10 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively) (Figs. 3a, b).

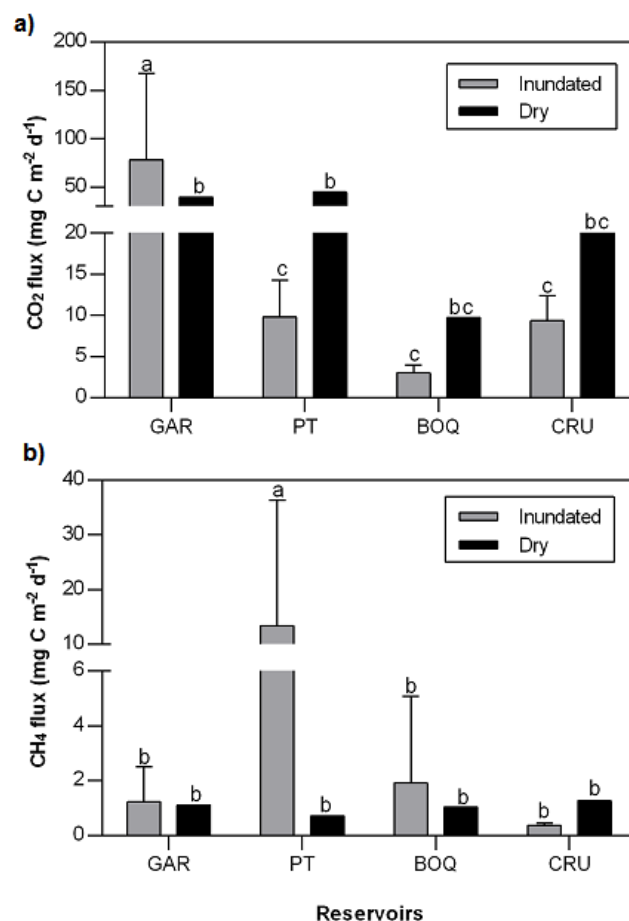


Fig. 3. (a) CO₂ and (b) CH₄ flux observed in headspace of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the fluxes between treatments, controls and reservoirs ($p < 0.05$).

Average CO₂ fluxes varied from 10 to 40 mg C m⁻² day⁻¹ in the exposed sediment and from 3 to 78 mg C m⁻² day⁻¹ in the rehydrated sediment. Average CH₄ emissions, on the other hand, varied from 0,7 to 1,3 mg C m⁻² day⁻¹ in the exposed sediment and from 0,4 to 13,5 mg C m⁻² day⁻¹ in the rehydrated sediment.

The total CO₂ emission in the controls was slightly (about 1.2 times) higher than the total CO₂ emission in the re-inundated sediment (2.911 mg C m⁻² and 2.508 mg C m⁻², respectively). On the other hand, the total flux of CH₄ in the inundated sediment were about 4.1 times higher than the total flux in the controls (373,3 mg C m⁻² and 91,2 mg C m⁻², respectively).

After the re-inundation, CO₂ and CH₄ concentrations in the water were significantly higher in Gargalheiras reservoir ($1.763,88 \pm 265,06$ ppm and $17,91 \pm 6,17$ ppm, respectively) (Fig. 4a, b).

The DO concentrations in the water column were lower in Gargalheiras reservoir than in the others ($p < 0,001$) (Fig. 5). Gargalheiras also presented higher concentrations

of DOC, TN, SRP and TP in the water (Figs. 6a, b, c, d). There was a general trend on increasing DOC, TN, SRP, and TP after rehydration of the sediment (Fig. 6). Higher carbon, nitrogen, phosphorus and moisture averages were also observed in the sediment of the Gargalheiras reservoir in relation to the others (Fig. 7).

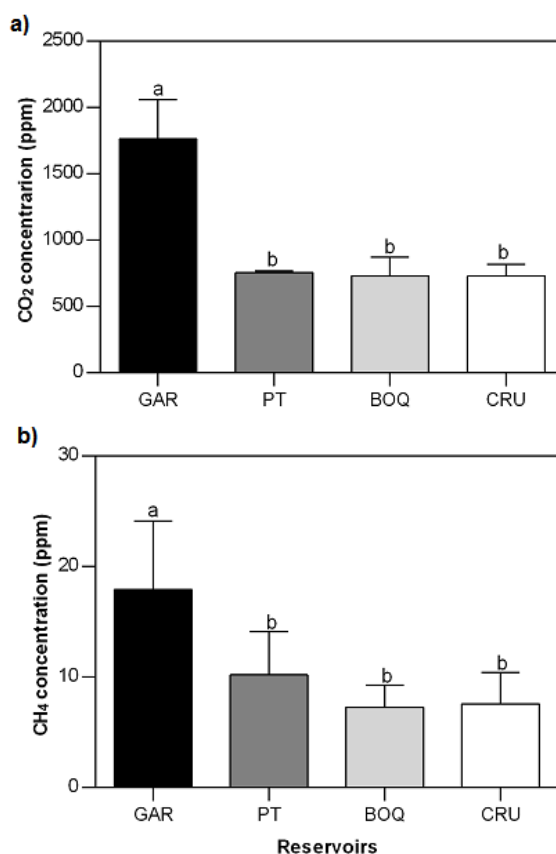


Fig. 4. CO₂ and CH₄ concentrations observed in the water column of the sediment pipes of the reservoirs of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU). The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0,05$).

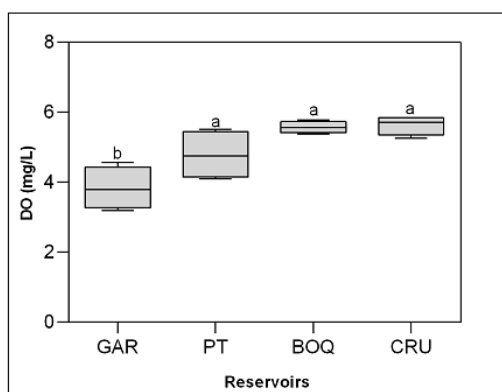


Fig. 5. Average concentration of dissolved oxygen (DO) of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0,05$).

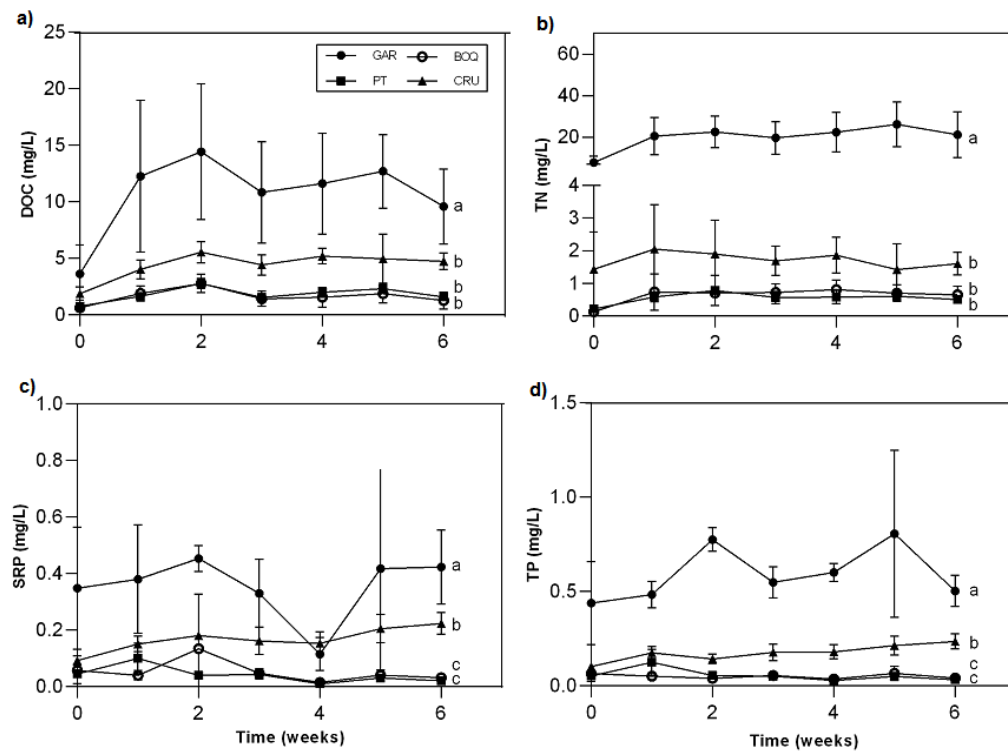


Fig. 6. Average concentration of (a) Dissolved organic carbon – DOC, (b) Total nitrogen – TN, (c) Soluble Reactive Phosphorus – SRP, (d) Total phosphorus – TP, in the re-inundated sediment of Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0,05$).

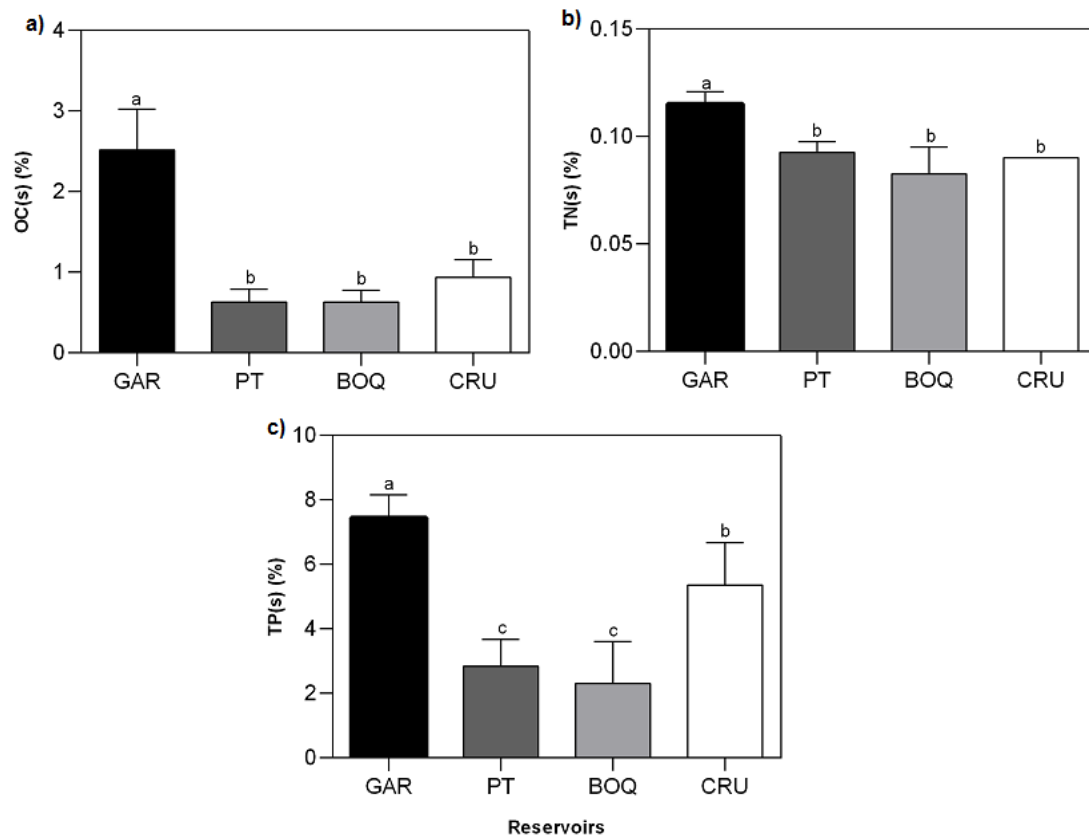


Fig. 7. Average values of sediment (a) Organic carbon – OC(s), (b) Total nitrogen – TN(s), (c) Total phosphorus – TP(s) in Gargalheiras (GAR), Passagem das Traíras (PT), Boqueirão (BOQ) and Cruzeta (CRU) reservoirs. The different letters indicate statistical differences between the reservoirs ($p < 0.05$).

4. DISCUSSION

The drying-inundation cycle of four reservoirs tested in this study indicates that water level fluctuation has a direct impact on CO₂ and CH₄ emissions from sediment to the atmosphere, as already documented in other studies (ACUÑA et al., 2018; GALLO et al., 2014b; KOSTEN et al., 2018). Sediment rehydration after prolonged exposure periods can induce microbial respiration pulses and release of CO₂ (BIRCH, 1958), caused by the renewal of the availability of easily decomposable products for the microorganisms metabolism (BORKEN; MATZNER, 2009). However, in this study, three of the four reservoirs analyzed (Passagem das Traíras, Boqueirão e Cruzeta) presented higher rates of CO₂ production in the dry sediment compared to the sediment of the same reservoirs that were re-flooded. Thus, it is important to highlight that the effects of drying and reinundating sediment are not straightforward, contrasting to previous studies that recorded higher emissions in reservoirs after rehydration (FROMIN et al., 2010; KOSTEN et al., 2018)

The relatively low rates of CO₂ production in re-flooded sediment may be the result of the absence of turbulence caused by the wind, which considerably increases the exchange of gases between water and air (JIN et al., 2016). On the other hand, the higher CO₂ emission rates in the exposed sediment may be related to the air intrusion in the porous spaces of the sediment. Although it has been reported that the microbial activity decreases when the water content in the sediment decreases (GÓMEZ-GENER et al., 2016; KOSTEN et al., 2018), the increase of oxygenation caused by the absence of water contributes to the metabolic activity of the microorganisms responsible for the degradation of the available organic matter, resulting in CO₂ emissions (SOBEK et al., 2009). Taking into consideration that the diffusion of gases in the air is thousands of times faster than in water (LIDE, 2009), gas exchange between the sediment and the atmosphere may increase with the disappearance of water. Furthermore, we must take into account that the laboratory moisture condition (wetter than in situ) may have been sufficient to initiate microbial activity in the dry sediment tubes (controls) even the microcosms were not flooded.

Among the four reservoirs, Gargalheiras was the only that exhibited the highest CO₂ flux rates in the re-flooded sediments. The higher CO₂ emissions after the experimental moistening indicate a water-stimulating effect on the gas release into the atmosphere (NAVARRO-GARCÍA; CASERMEIRO; SCHIMEL, 2012; UNGER et al., 2010). In addition to mitigating water limitation in sediments, rehydration can cause the rupture of macroaggregates, releasing previously protected substrates and increasing the accessibility of biodegradable material for microbial attack (BORKEN; MATZNER, 2009). Gargalheiras presented significantly higher concentrations of DOC, TN, SRP and TP in the water after rehydration than the other reservoirs, which indicates that there was greater release of nutrients and organic matter from the sediment to the water column. In the same way, Gargalheiras sediment showed higher values of carbon, nitrogen and phosphorus. This demonstrates that the availability of organic matter and nutrients is fundamental for microbial processes, like heterotrophic respiration and consequent release of CO₂ (GÓMEZ-GENER et al., 2016; SHI et al., 2014).

Regarding the production of CH₄, three reservoirs (Gargalheiras, Passagem das Traíras and Boqueirão) presented higher average emissions in the rehydrated sediments. Although Cruzeta reservoir presented higher flux in the exposed sediments, the values did not differ significantly from the flux in the rehydrated sediments. In this case, sediment rehydration has led to an increase in CH₄ emissions. Many factors can influence

the emission of CH₄. The production of this gas is the last stage of anaerobic decomposition and its emission results from a net balance between production, consumption and transport (BRIDGHAM et al., 2013; TANG et al., 2016), that's why there is a small variation between the reservoirs. It is probable that, in the exposed sediments, the oxidation of CH₄ (methanotrophia) occurred due to the greater availability of oxygen at the sediment-atmosphere interface (ARONSON; ALLISON; HELLIKER, 2013), which would explain the lower flux values found in these sediments. On the other hand, the water column in the rehydrated sediments may have allowed the formation of anoxic sites, resulting in greater flux of CH₄ to the atmosphere (KIM et al., 2012).

The CO₂ and CH₄ flux showed heterogeneous responses in the analyzed reservoirs. Our study attested that inundation increased CH₄ emissions and acted in contrasting ways for CO₂ emissions in semiarid region reservoirs. In three reservoirs, inundation reduced CO₂ emissions, so the sediments that remained exposed emitted more CO₂ into the atmosphere than those that were re-flooded. Only one reservoir (Gargalheiras) presented higher fluxes in the re-flooded sediments and the biochemical characteristics (organic carbon content, nutrients) of the water and the sediment showed to be important boosters of the CO₂ flux in this specific reservoir. Our results demonstrate that precipitation will not always stimulate CO₂ fluxes and confirm that it can intensify CH₄ fluxes in previously exposed sediments (JIN et al., 2016; KOSTEN et al., 2018) in semiarid region reservoirs.

Although some studies have already explored the potential effects of the drying-inundation cycle on C balance in aquatic ecosystems (HARRISON et al., 2017; JIN et al., 2016; KOSTEN et al., 2018; YANG et al., 2012), no measurement of GHG emission rates from exposed and re-flooded sediments in semiarid regions had been reported. Extreme weather events should occur more frequently in the coming years (IPCC, 2014), affecting C balances in aquatic ecosystems (WATTENBACH et al., 2013). The results of this study show the importance of considering the CO₂ and CH₄ emissions of exposed sediments during extreme drought events, indicating that they should be considered in future assessments of the carbon balance of reservoirs. Likewise, the results also emphasize the relevance of CO₂ and CH₄ flux after reservoir inundation.

5. CONCLUSION

Our study estimated the CO₂ and CH₄ emissions of dry and inundated sediments from four reservoirs located in the Brazilian semi-arid region that had their sediments

exposed due to an extreme drought event. Available evidence suggests that the contribution of dry sediment to CO₂ and CH₄ emissions should not be ignored and should also be investigated in other regions. The more frequent occurrence of severe droughts is expected to increase the relevance of GHG emissions from exposed sediments around the world. Also, the drying-inundation cycle proved to be an important booster of the CO₂ and CH₄ flux into the atmosphere in semiarid region reservoirs.

6. REFERENCES

- ACUÑA, V. et al. Does the severity of non-flow periods influence ecosystem structure and function of temporary streams? A mesocosm study. **Freshwater Biology**, v. 63, n. 7, p. 613–625, 2018.
- ALMEIDA, R. M. et al. High primary production contrasts with intense carbon emission in a eutrophic tropical reservoir. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, n. MAY, p. 1–13, 2016.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMORIM, M.; SANTOS, M. A. DOS; CAMARGO, J. M. R. DE. Methane diffusive fluxes from sediment exposed in a Brazilian tropical reservoir drawdown zone. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 90, p. 463–470, 2019.
- ARONSON, E. L.; ALLISON, S. D.; HELLIKER, B. R. Environmental impacts on the diversity of methane-cycling microbes and their resultant function. **Frontiers in Microbiology**, v. 4, n. AUG, p. 1–15, 2013.
- BARBOSA, J. E. DE L. et al. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 103–118, 2012.
- BASTVIKEN, D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, n. 4, p. 1–12, 2004.
- BASTVIKEN, D. et al. the Continental Carbon Sink. **Science**, v. 331, n. Table 1, p. 50, 2011.
- BATTIN, T. J. et al. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. **Nature Geoscience**, p. 95–100, 2008.
- BEAULIEU, J. J. et al. Effects of an Experimental Water-level Drawdown on Methane Emissions from a Eutrophic Reservoir. **Ecosystems**, v. 21, n. 4, p. 657–674, 2018.
- BEZERRA JÚNIOR, J. G. O.; SILVA, N. M. DA. Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó Oriental do Rio Grande do Norte. **Holos**, v. 23, n. 2, p. 78–91, 2007.
- BIRCH, H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. **Plant and Soil**, v. 10, n. 1, p. 9–31, 1958.
- BORKEN, W.; MATZNER, E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. **Global Change Biology**, v. 15, n. 4, p. 808–824, 2009.
- BRIDGHAM, S. D. et al. Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. **Global Change Biology**, v. 19, n. 5, p. 1325–1346, 2013.
- COLE, J. J. et al. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 171–184, 2007.
- CURIEL YUSTE, J. et al. Soil heterotrophic CO₂ emissions from tropical high-elevation ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture

- fluctuations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 110, p. 8–11, 2017.
- DEEMER, B. R. et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. **BioScience**, v. 66, n. 11, p. 949–964, 2016.
- EMBRAPA, E. B. D. P. A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.: s.n.].
- FERREIRA, R. S. **Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- FORSTER, P. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing (IPCC 2007). In: **Climate Change**. [s.l.: s.n.]. v. 30p. 129–234.
- FROMIN, N. et al. Impact of seasonal sediment desiccation and rewetting on microbial processes involved in greenhouse gas emissions. **Ecohydrology**, v. 3, n. April, p. 238–245, 2010.
- FURLANETTO, L. M. et al. Potential Carbon Gas Production in Southern Brazil Wetland Sediments: Possible Implications of Agricultural Land Use and Warming. **Wetlands**, v. 38, n. 3, p. 485–495, 2018.
- GALLO, E. L. et al. Physical and biological controls on trace gas fluxes in semi-arid urban ephemeral waterways. **Biogeochemistry**, v. 121, n. 1, p. 189–207, 2014a.
- GALLO, E. L. et al. Physical and biological controls on trace gas fluxes in semi-arid urban ephemeral waterways. **Biogeochemistry**, v. 121, n. 1, p. 189–207, 2014b.
- GÓMEZ-GENER, L. et al. When Water Vanishes: Magnitude and Regulation of Carbon Dioxide Emissions from Dry Temporary Streams. **Ecosystems**, v. 19, n. 4, p. 710–723, 2016.
- GUÉRIN, F. et al. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 21, p. 1–6, 2006.
- HARRISON, J. A. et al. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 1267–1277, 2017.
- HOLGERSON, M. A.; RAYMOND, P. A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 3, p. 222–226, 2016.
- HUANG, G.; LI, Y.; SU, Y. G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 83, p. 52–56, 2015.
- HUXMAN, T. E. et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, n. 2, p. 254–268, 2004.
- IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary**. [s.l.: s.n.].
- JACINTHE, P. A. Carbon dioxide and methane fluxes in variably-flooded riparian forests. **Geoderma**, v. 241–242, p. 41–50, 2015.

- JIN, H. et al. Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 12, 2016.
- JUNGER, P. C. et al. Effects of seasonality, trophic state and landscape properties on CO₂ saturation in low-latitude lakes and reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 664, p. 283–295, 2019.
- KAUSHAL, S. S. et al. Land use and climate variability amplify carbon, nutrient, and contaminant pulses: A review with management implications. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 3, p. 585–614, 2014.
- KIM, D. G. et al. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: A review of current literature and suggestions for future research. **Biogeosciences**, v. 9, n. 7, p. 2459–2483, 2012.
- KIM, S. Y. et al. Combined effects of carbon, nitrogen and phosphorus on CH₄ production and denitrification in wetland sediments. **Geoderma**, v. 259–260, p. 354–361, 2015.
- KOSTEN, S. et al. Extreme drought boosts CO₂ and CH₄ emissions from reservoir drawdown areas. **Inland Waters**, v. 0, n. 0, p. 1–12, 2018.
- LIDE, D. R. ET AL. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed. Edited by David R. Lide, Editor-in-Chief, and W. M. “Mickey” Haynes, Associate Editor (National Institute of Standards and Technology). **Journal of the American Chemical Society**, v. 131, n. 35, p. 12862–12862, 2009.
- LLOYD, C. R.; REBELO, L. M.; MAX FINLAYSON, C. Providing low-budget estimations of carbon sequestration and greenhouse gas emissions in agricultural wetlands. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, 2013.
- MACKLIN, P. A. et al. Carbon dioxide dynamics in a lake and a reservoir on a tropical island (Bali, Indonesia). **Plos One**, 2018.
- MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 6, p. 1089–1113, 2010.
- MATTHEWS, H. D.; CALDEIRA, K. Stabilizing climate requires near-zero emissions. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 4, p. 1–5, 2008.
- MEDEIROS, C. E. B. F. DE S. **Os impactos do uso e ocupação e evento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manancial tropical do semiárido**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.
- NAVARRO-GARCÍA, F.; CASERMEIRO, M. Á.; SCHIMEL, J. P. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 44, n. 1, p. 1–8, 2012.
- OLIVEIRA, J. N. P. **A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical**. [s.l.]

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 25, n. 3, p. 341–351, 2013.

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

SABATER, S. et al. Stream Biofilm Responses to Flow Intermittency: From Cells to Ecosystems. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. March, p. 1–10, 2016.

SANZ-COBENA, A. et al. Do cover crops enhance N₂O, CO₂ or CH₄ emissions from soil in Mediterranean arable systems? **Science of The Total Environment**, v. 466–467, p. 164–174, 2013.

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

SCHULZ, S.; CONRAD, R. Influence of temperature on pathways to methane production in the permanently cold profundal sediment of Lake Constance. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 20, n. 1, p. 1–14, 1996.

SHI, W. Y. et al. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest-grassland transition zone of the Loess Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 7, p. 854–863, 2011.

SHI, W. Y. et al. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. **Atmospheric Environment**, v. 88, p. 74–82, 2014.

SKINNER, D. et al. Extreme water level decline effects sediment distribution and composition in Lake Alexandrina, South Australia. **Limnology**, v. 15, n. 2, p. 117–126, 2014.

SMITH, A. P. et al. Shifts in pore connectivity from precipitation versus groundwater rewetting increases soil carbon loss after drought. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2017.

SMITH, K. A. et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 10–20, 2018.

SOBEK, S. et al. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6, p. 2243–2254, 2009.

SPONSELLER, R. A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. **Global Change Biology**, v. 13, n. 2, p. 426–436, 2007.

STANLEY, E. H. . The ecology of methane in streams and rivers: patterns, controls, and global significance. v. 86, n. 2, p. 146–171, 2016.

TANG, K. W. et al. Methane production in oxic lake waters potentially increases aquatic methane flux to air. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 3, n. 6, p. 227–233, 2016.

THOMAS, A. D.; HOON, S. R. Carbon dioxide fluxes from biologically-crusts Kalahari Sands after simulated wetting. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 1, p. 131–139, 2010.

THOMAS, A. D.; HOON, S. R.; DOUGILL, A. J. Soil respiration at five sites along the Kalahari Transect: Effects of temperature, precipitation pulses and biological soil crust cover. **Geoderma**, v. 167–168, p. 284–294, 2011.

TRANVIK, L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6 PART 2, p. 2298–2314, 2009.

TRANVIK, L. J.; COLE, J. J.; PRAIRIE, Y. T. The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. **Limnology and Oceanography Letters**, v. 3, n. 3, p. 41–48, 2018.

UNGER, S. et al. The influence of precipitation pulses on soil respiration - Assessing the “ Birch effect” by stable carbon isotopes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 10, p. 1800–1810, 2010.

VALDERRAMA, J. C. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. **Marine Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 109–122, 1981.

VERPOORTER, C. et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 18, p. 6396–6402, 2014.

WALLENSTEIN, M. D. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216–234, 2012.

WATTENBACH, M. et al. Climate extremes and the carbon cycle. **Nature**, v. 500, n. 7462, p. 287–295, 2013.

WCD. Dams and development : a new framework for decision-making : overview of the report by the World Commission on Dams. **108**, n. December, p. 17 p, 2001.

WILLIAMSON, C. E. et al. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6 PART 2, p. 2273–2282, 2009.

YANG, L. et al. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 10, p. 1–11, 2012.

CAPÍTULO 2

EFEITOS DO CICLO SECA-REINUNDAÇÃO NAS EMISSÕES DE CO₂ E CH₄ EM SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIO COM CULTIVOS AGRÍCOLAS

RESUMO

Durante eventos de seca extrema, os reservatórios da região semiárida brasileira secam e são transformados em locais de cultivos agrícolas. Este cenário define novas áreas bioquimicamente ativas, que podem influenciar nas taxas de emissão de dois poderosos gases causadores do efeito estufa (GEE), o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Para determinar como eventos de reinundação atuam nas taxas de emissão de carbono (C) nesses compartimentos, estimamos experimentalmente os fluxos de CO₂ e CH₄ derivados de sedimentos secos da área de drenagem de um reservatório da região semiárida, comparando as respostas dos sedimentos com e sem cultivos agrícolas. Os fluxos de CO₂ e CH₄ nas áreas com cultivos agrícolas foram cerca de três e duas vezes maiores que os fluxos nas áreas sem cultivos agrícolas, respectivamente. O teor de matéria orgânica e a concentração de nutrientes (nitrogênio e fósforo) na água e no sedimento mostraram ser impulsionadores do fluxo de CO₂ e CH₄. A compreensão dos fluxos de GEE em reservatórios onde há prática de atividades agrícolas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo desses ambientes. Assim, as emissões de C desses compartimentos devem ser explicitamente consideradas nas emissões totais das redes fluviais, uma vez que essas práticas estão se tornando cada vez mais comuns em decorrência de secas mais prolongadas, que mantêm os sedimentos dos reservatórios expostos por longos períodos.

Palavras-chave: Fluxo de carbono. Mudanças climáticas. Sedimento. Agricultura. Semiárido.

ABSTRACT

During extreme drought events, reservoirs in the Brazilian semi-arid region dry up and are transformed into agricultural cultivation sites. This scenario defines new biochemically active areas that may influence the emission rates of two powerful greenhouse gases (GHG), carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄). To determine how reinundation events act on carbon (C) emission rates in these compartments, we experimentally estimated the CO₂ and CH₄ fluxes from dry sediments from the drainage area of a semi-arid reservoir, comparing sediment responses with and without agricultural crops. The fluxes of CO₂ and CH₄ in the cropped areas were about three and two times higher than the flows in the non-cropped areas, respectively. Organic matter content and nutrient concentration (nitrogen and phosphorus) in water and sediment were found to be boosters of the flux of CO₂ and CH₄. Understanding GHG fluxes in reservoirs where agricultural activities are practiced is fundamental for the development of management strategies for these environments. Therefore, C emissions from these compartments should be explicitly considered in total river network emissions, as these practices are becoming increasingly common due to longer droughts that keep reservoir sediments exposed for longer periods.

Keywords: Carbon flux. Climate changes. Sediment. Agriculture. Semiarid.

1. INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) são dois dos principais gases causadores do efeito estufa (GEE) (FORSTER, 2007). Eles desempenham um papel importante no equilíbrio térmico da atmosfera terrestre e o potencial de contribuição de cada um para o aquecimento global vem sendo amplamente discutido nos últimos anos (IPCC, 2014). Por isso, a quantificação das taxas de emissão e absorção do orçamento global do carbono (C) é parte essencial da mitigação das mudanças climáticas.

Os ecossistemas aquáticos continentais (rios, lagos e reservatórios), apesar de ocuparem apenas uma pequena área na superfície da Terra (VERPOORTER et al., 2014), apresentam um importante papel como componentes ativos e reguladores do ciclo global do carbono (COLE et al., 2007; TRANVIK; COLE; PRAIRIE, 2018). Esses sistemas transportam, processam e armazenam quantidades consideráveis de carbono (TRANVIK et al., 2009). Em geral, os ecossistemas de água doce podem atuar como fontes de CO₂ e CH₄ para a atmosfera ou podem ser considerados sumidouros de C, sendo os sedimentos desses compartimentos os principais sítios de acumulação de carbono (BASTVIKEN et al., 2011; RAYMOND et al., 2013; STANLEY, 2016).

Nas regiões semiáridas, os ecossistemas aquáticos secam sazonalmente em consequência dos longos períodos de estiagem a que são submetidos e experimentam flutuações recorrentes do nível de água (BARBOSA et al., 2012). Essas regiões, já naturalmente estressadas pela baixa disponibilidade de água (MARENGO et al., 2010), experimentam profundas mudanças nos padrões de temperatura e precipitação devido ao aumento na frequência e magnitude das secas projetado pelo IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014). Atualmente, busca-se entender e quantificar o papel de sedimentos expostos durante períodos de estiagem nos fluxos de CO₂ e CH₄ para sua inclusão nos balanços globais de carbono.

Dentre os sistemas aquáticos localizados nessas regiões estão os reservatórios artificiais (barragens), que são compartimentos construídos em larga escala para armazenar água e controlar enchentes (WCD, 2001). Em virtude do aumento da ocorrência e da intensidade dos eventos de seca, grandes áreas dos reservatórios têm ficado expostas à atmosfera por longos períodos, o que tem possibilitado a modificação dos usos da terra. Nesses locais, os sedimentos são utilizados para os cultivos de vegetações, a fim de atender às crescentes demandas da população. Estas conversões podem alterar a estrutura do ecossistema, promovendo mudanças nos serviços ecossistêmicos, que podem implicar no aumento da carga de nutrientes (KAUSHAL et

al., 2014) e na alteração do fluxo do carbono (e.g. incorporação de biomassa no sedimento pela produção primária de cultiváveis).

Do mesmo modo, eventos de reumedecimento após longos períodos de seca podem ocasionar mudanças significativas nas características físico-químicas do ambiente, afetando o metabolismo aquático e do sedimento, podendo resultar no aumento dos fluxos de CO_2 e CH_4 em resposta à reinundação de sedimentos anteriormente expostos (KOSTEN et al., 2018; THOMAS; HOON; DOUGILL, 2011). Além disso, eventos de precipitação acarretam uma série de respostas das plantas e do solo (SPONSELLER, 2007), através do revolvimento do sedimento, e podem influenciar na emissão de GEE para a atmosfera (JACINTHE, 2015). Levando em consideração que os sistemas aquáticos das regiões semiáridas estão propensos a ciclos recorrentes de secagem-reinundação, devido às suas características climáticas, torna-se bastante relevante estudar os efeitos desses ciclos nos fluxos de CO_2 e CH_4 .

A substituição do ambiente natural pela prática agrícola e sua implicação na emissão dos GEE é bem documentada em wetlands de todo o mundo (FURLANETTO et al., 2018; LLOYD; REBELO; MAX FINLAYSON, 2013). No entanto, os efeitos da implementação de práticas agrícolas em sedimentos expostos de reservatórios sobre processos aquáticos (e.g. produção e emissão de GEE) após eventos de precipitação permanecem desconhecidos. Por exemplo, o incremento de biomassa vegetal sobre o solo (sedimento seco) deve subsidiar os processos de decomposição no sedimento, aumentando a produção de gases como CO_2 e CH_4 após a reinundação.

Dessa forma, nosso objetivo foi avaliar o impacto do uso de sedimentos expostos de reservatórios artificiais para práticas agrícolas na emissão de CO_2 e CH_4 após sua reinundação. Além disso, buscamos determinar as principais variáveis ambientais que impulsionam o fluxo destes gases. Nossa hipótese é que os sedimentos com cultivos agrícolas apresentem maiores emissões de CO_2 e CH_4 para atmosfera. Aqui, investigamos o fluxo de CO_2 e CH_4 em sedimentos expostos de um reservatório artificial da região semiárida tropical, após simulação de reinundação em escala experimental, comparando as respostas de sedimentos com e sem cultivos agrícolas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado no reservatório artificial Dourado, localizado no município de Currais Novos ($6^{\circ}15'47''\text{S}$; $36^{\circ}31'4''\text{W}$), de onde amostras de sedimentos expostos (área seca) foram retiradas em agosto de 2018 para realização de experimentos em laboratório. Este reservatório está inserido na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (43.682 km^2), sub-bacia do Rio Seridó, região semiárida do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil (Fig. 8).

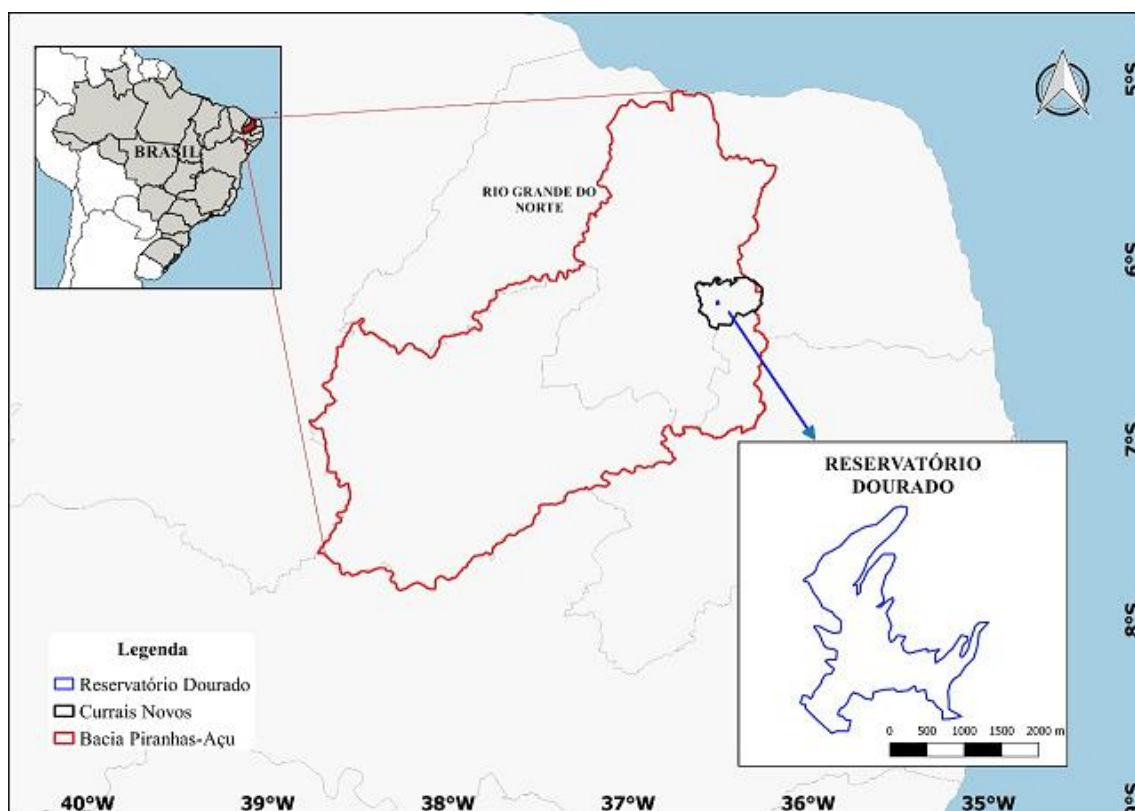


Fig. 8. Localização do reservatório Dourado, no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil.

O clima da região é classificado como semiárido tropical (BSh), caracterizado por ser quente e seco, de acordo com classificação proposta por Köppen (ALVARES et al., 2013). As elevadas temperaturas médias anuais ($27,5^{\circ}\text{C}$) e as altas taxas de evapotranspiração (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007) acarretam um déficit no balanço hídrico durante grande parte do ano. A precipitação média normal é de 580 mm/ano e o período chuvoso compreende os meses de fevereiro a maio. Entretanto, a região semiárida potiguar enfrentou um prolongado período de seca que se iniciou em 2012 e durou até 2018, com chuvas abaixo da média, que levaram à diminuição brusca do volume do

reservatório. Em agosto de 2018, quando a amostragem dos sedimentos foi realizada, o reservatório estava completamente seco (com 0% da sua capacidade total de acumulação).

No entorno do reservatório predominam os neossolos litólicos (rasos, pouco desenvolvidos, assentados diretamente sobre rochas) de textura argilo-arenosa, com prevalência da fração granulométrica areia nos primeiros centímetros de solo (EMBRAPA, 2006; OLIVEIRA, 2012). Com relação aos teores de matéria orgânica (MO) encontrados nas zonas ripárias, o reservatório apresenta porcentagens médias de MO de 3,8% nas camadas mais superficiais em decorrência das atividades de pecuária e agricultura praticadas nas áreas adjacentes (OLIVEIRA, 2012).

A porcentagem de cobertura vegetal nos sedimentos expostos do reservatório Dourado é, até então, desconhecida. No entanto, é perceptível que uma parcela considerável do reservatório foi tomada para plantação de espécies vegetais, em sua maioria por *Pennisetum purpureum*, Schum (capim elefante comum) – gramínea utilizada na alimentação de animais. No espaço entre as plantações estão os sedimentos completamente expostos à atmosfera. Dessa forma, os sedimentos do reservatório foram divididos, neste estudo, em sedimentos com vegetação (sob plantas) – DOU-C e sedimentos sem vegetação (espaço entre as plantações) – DOU-S.

2.2 Amostragem dos sedimentos e incubação

A amostragem e o acondicionamento dos sedimentos foram feitos em tubos de Policloreto de Vinila (PVC) de 30cm de comprimento e 10cm de diâmetro, sem perturbação visível dos sedimentos. A coleta se dividiu em dois pontos do reservatório: com cultivos agrícolas e sem cultivos agrícolas. Em cada um dos pontos foram coletados, aleatoriamente, 4 tubos, cada um com perfis 10 cm de sedimento. As amostras foram transportadas até o laboratório após a coleta e foram mantidas a temperatura ambiente por um período de 24 dias antes do início da incubação. No laboratório, foram adicionados 15cm (1,2 litros) de água destilada nas quatro réplicas de cada ambiente (DOU-C – 01, 02, 03, 04 e DOU-S – 01, 02, 03, 04) deixando cerca de 5 cm de atmosfera interna em cada tubo (*headspace*). A água foi adicionada com auxílio de uma pisseta e a taxa de aplicação foi ajustada para minimizar o revolvimento total dos sedimentos.

Os microcosmos foram incubados por 49 dias, abertos, a uma temperatura de 27°C (± 3 °C), visando replicar as condições ambientes. O nível de água foi mantido constante durante todo o período de incubação (adicionando água destilada diariamente) para

compensar as perdas devido à evaporação, de forma que o volume de água nos tubos permanecesse o mesmo durante a medição diária dos gases.

Durante o período de incubação, foram realizadas medições das concentrações de CO₂ e CH₄ no *headspace* e na água sobrenadante (espaço localizado acima do sedimento), tendo sido feita a primeira medição imediatamente após a reinundação dos sedimentos nos tubos. Também foram medidos oxigênio dissolvido (OD), pH, condutividade elétrica (CE), temperatura e turbidez da água. Semanalmente, foram feitas medições de fósforo total (PT), fósforo reativo solúvel (FRS), carbono orgânico dissolvido (COD) e nitrogênio total (NT) na água sobrenadante. No final do período de incubação, a água foi retirada dos tubos cuidadosamente com o auxílio de uma mangueira conectada a uma bomba de sucção. Após a água ter sido removida, foram coletadas amostras de sedimento para análise de teor de água (umidade), PT(s), NT(s) e teor de carbono orgânico.

2.3. Procedimentos analíticos

Fluxos de CO₂ e CH₄ no *headspace*

Para as medições diárias dos fluxos de CO₂ no *headspace*, os microcosmos foram fechados na extremidade superior com tampas de PVC estanque ao gás por um período de 9 minutos. A tampa tinha um conector de entrada e saída acoplado a um analisador de gás por ondas infravermelho (IRGA; PPSystems, EGM-4). A cada 3 minutos, obtinha-se uma concentração de gás no *headspace*. Para as medições dos fluxos de CH₄, os núcleos foram fechados, também por 9 minutos, com tampas de PVC que possuíam uma mangueira de ar acoplada fechada com um conector tipo “T” de 1cm de diâmetro. A cada 3 minutos, abria-se o conector e retirava-se uma amostra de dois mililitros de ar do *headspace* com uma seringa de ar. As amostras de ar das seringas foram imediatamente analisadas através de cromatografia gasosa em um cromatógrafo a gás (Bruker Corporation 450-GC), com um detector de ionização de chama (FID). O cromatógrafo foi calibrado com gás padrão certificado de alta pureza. Dessa forma, em cada núcleo, foram feitas quatro medições diárias de concentração de dióxido de carbono e metano (0, 3, 6 e 9 minutos). As taxas difusivas diárias dos gases foram determinadas através do aumento linear da concentração dos gases ao longo do período total de incubação diário (9 minutos), tomando o volume do *headspace* em conta (ALMEIDA et al., 2016).

Concentração de CO₂ e CH₄ na água

Para avaliar a possível liberação de CO₂ e CH₄ do sedimento para a água sobrejacente após a reinundação, foram extraídas diariamente 10 mL de amostra de água de cada tubo utilizando uma seringa de 20 mL. Juntamente com os 10 mL de água eram extraídos também 10 mL de ar do *headspace*. As seringas eram agitadas por um período de um minuto para que os gases dissolvidos na água se desprendessem e fossem liberados para o *headspace*. As amostras de ar do *headspace* foram então analisadas com o analisador de gás infravermelho (IRGA) e por cromatografia gasosa (Bruker Corporation 450-GC) para registrar as concentrações de CO₂ e CH₄ na água, respectivamente.

Química da água, OD, temperatura e pH

As medições de concentração de oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica, temperatura e turbidez na água sobrenadante foram realizadas com auxílio de sonda de monitoramento (YSI 6920 V2) diariamente. Semanalmente, amostras da água sobrejacente eram retiradas cuidadosamente com o auxílio de uma seringa para a leitura das concentrações de FRS e PT através de espectrofotometria (MURPHY, J.; RILEY, 1962) e COD e NT através de um analisador de carbono orgânico total (Shimadzu, TOC-L) para avaliar possíveis liberações de fósforo, carbono e nitrogênio do sedimento para a água sobrenadante. As amostras de FRS, COD e NT foram filtradas antes das análises com filtros de microfibras de vidro de tamanho de poro 0,6 µm (25mm, Sartorius Stedim).

Química do sedimento

Para as análises de PT(s), NT(s) e teor de carbono orgânico dos sedimentos após a retirada da água dos tubos, foram separadas aproximadamente 7 g de amostras de cada tubo, que foram secas a 60 °C por 48 horas. As amostras foram homogeneizadas e cerca de 0,3 g foram separadas e dissolvidas em água para as análises de PT e NT pelo método da digestão com persulfato (VALDERRAMA, 1981). Para determinar o conteúdo de C restante no sedimento após a retirada da água foi utilizado o método de oxidação catalítica em alta temperatura (900 °C) de 0,3 g de amostras de sedimento utilizando um analisador de carbono orgânico total (Shimadzu, SSM5000A).

2.4. Análises estatísticas

As diferenças entre as emissões totais de CO₂ e CH₄ no *headspace* e a concentração dos gases na água sobrenadante, bem como os teores de matéria orgânica e

as concentrações de nutrientes dos tubos com cultivos agrícolas e sem cultivos agrícolas após a reinundação foram testadas com o test t de Student não pareado utilizando o R Software R i386 3.5.3.

Para resumir e facilitar a visualização de dados coletados nos dois ambientes (DOU-C e DOU-S) utilizou-se a análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) com uma matriz de correlação com médias de alguns parâmetros medidos no *headspace* e na água sobrenadante.

3. RESULTADOS

As emissões médias de CO₂ e CH₄ nos tubos com vegetação (DOU-C) durante o período de incubação foram de 33,92 ($\pm$ 10,08) mg C m⁻² d⁻¹ e 0,64 ($\pm$ 0,64) mg C m⁻² d⁻¹, respectivamente, e nos tubos sem vegetação (DOU-S) foram de 12,87 ($\pm$ 4,58) mg C m⁻² d⁻¹ e 0,28 ($\pm$ 0,14) mg C m⁻² d⁻¹, respectivamente. As emissões dos tubos com vegetação variaram consideravelmente ao longo do período de incubação (Figs. 9a, b). O pico de emissão de CO₂ nos núcleos com vegetação ocorreu no dia 14, com valor de 83,63 mg C m⁻² d⁻¹ (Fig. 9a) e o pico de emissão de CH₄ aconteceu no décimo dia de incubação (7,19 mg C m⁻² d⁻¹) (Fig. 9b). Nos tubos sem vegetação, as emissões de CO₂ e CH₄ não variaram de forma considerável ao longo dos 49 dias. Houve um pico de emissão de CO₂ de 50,56 mg C m⁻² d⁻¹ nos primeiros dias com posterior queda e estabilização (Fig. 9a). Os fluxos de CH₄ também atingiram o valor máximo (0,90 mg C m⁻² d⁻¹) nos primeiros dias, permanecendo constantes durante o período experimental (Fig. 9b). Dessa forma, as taxas de emissão de CO₂ e CH₄ dos núcleos com vegetação foram 2,6 e 2,3 vezes maiores que as taxas de emissão dos tubos sem vegetação, respectivamente.

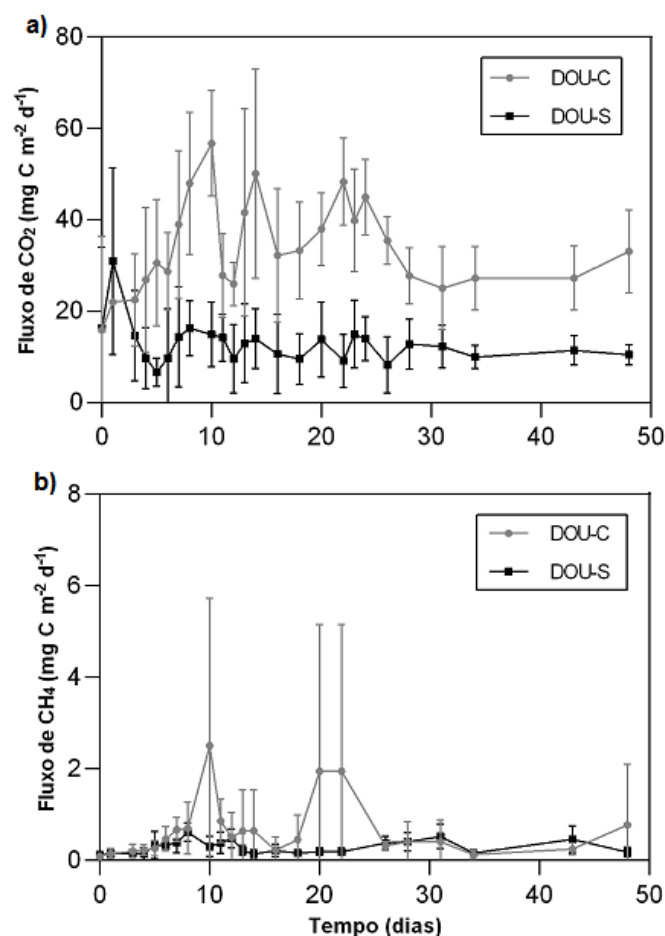


Fig. 9. Fluxos de (a) CO₂ e (b) CH₄ no *headspace* nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S).

Nos tubos com vegetação, as concentrações médias de CO₂ e CH₄ na água foram de 1.777,34 ppm e 55,43 ppm, respectivamente. As concentrações de CO₂ aumentaram linearmente nos primeiros dias e permaneceram altas durante todo o período de incubação, tendo ocorrido um pico na metade do experimento (Fig. 10a). No caso do metano, o pico ocorreu no 10º dia de experimento e, a partir disso, as concentrações diminuíram consideravelmente (Fig. 10b). Nos tubos sem vegetação, as concentrações médias foram de 1073,03 ppm e 8,5 ppm de CO₂ e CH₄, respectivamente. As concentrações de CO₂ variaram muito durante o período de incubação e o pico ocorreu no dia 13 (Fig. 10a). Já as concentrações de CH₄ permaneceram constantes (Fig. 10b). As concentrações de CO₂ e CH₄ na água foram 1,6 e 6,5 vezes maiores nos tubos com presença de vegetação, respectivamente.

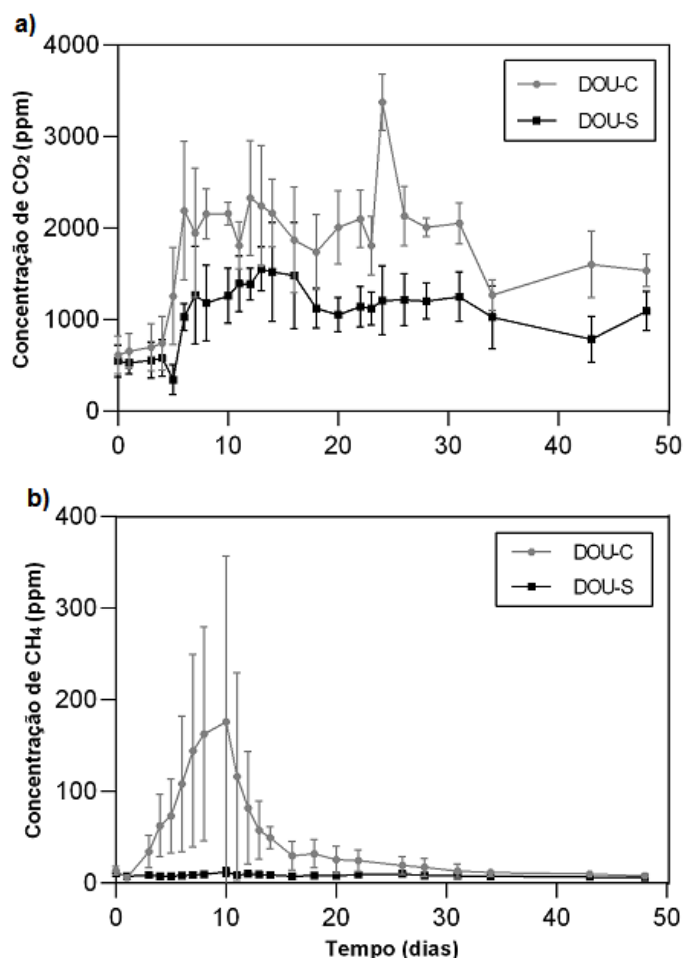


Fig. 10. Concentração de (a) CO₂ e (b) CH₄ na água nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S).

Alguns fatores importantes destacam as diferenças entre os ambientes com e sem cultivos agrícolas. Primeiro, as concentrações de oxigênio dissolvido na coluna d'água foram menores nas áreas com vegetação ($p < 0,0001$). Em segundo lugar, as áreas com vegetação apresentaram maiores médias de carbono ($p = 0,044$), nitrogênio ($p = 0,005$) e fósforo ($p = 0,032$) no sedimento. Assim como no sedimento em si, os tubos com vegetação também apresentaram maior liberação de FRS ($p = 0,006$) e PT ($p = 0,019$) do sedimento para a coluna d'água. As concentrações de COD e NT na água sobrenadante e a porcentagem de umidade nos sedimentos não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os dois ambientes (Fig. 11).

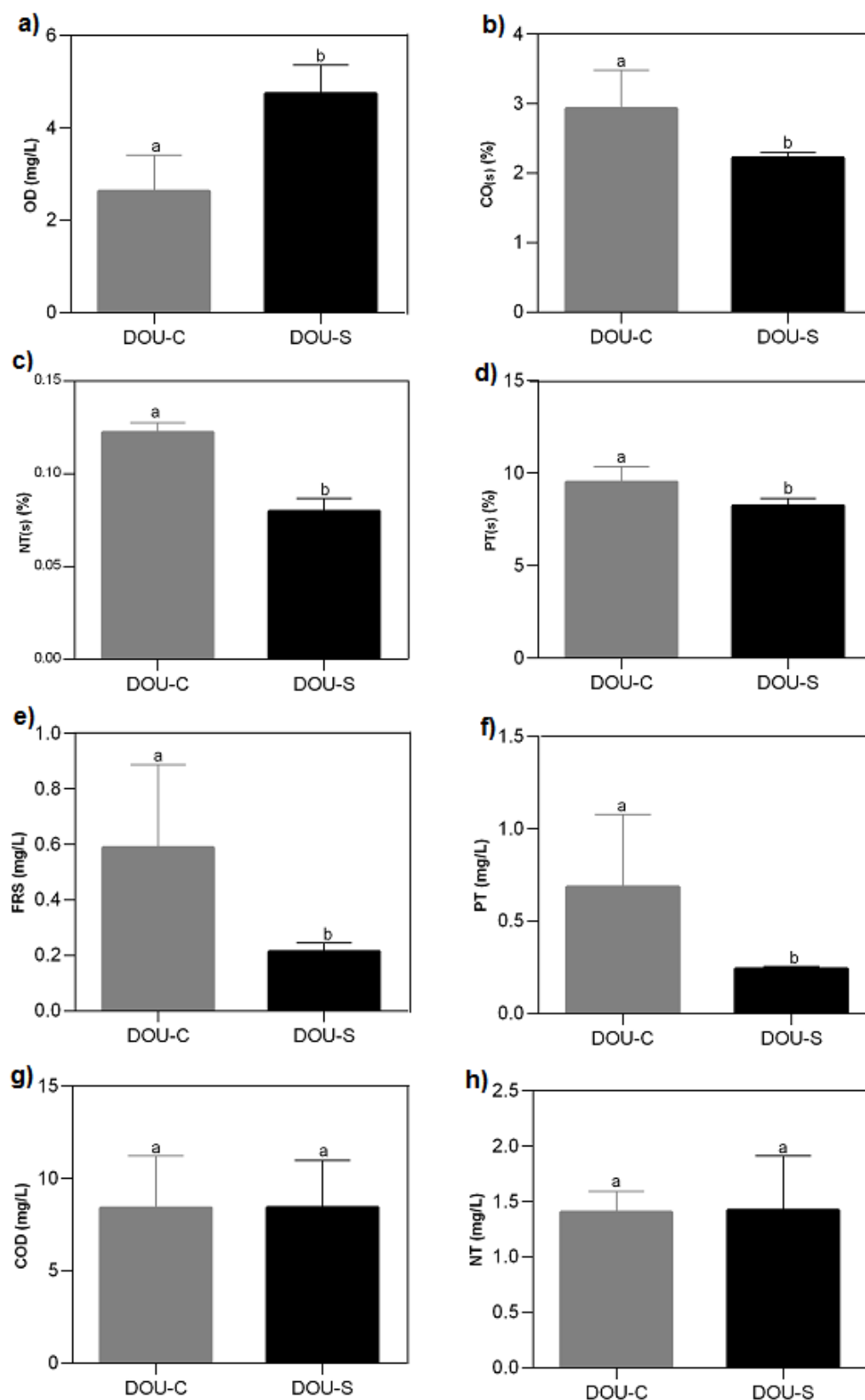


Fig. 11. (a) Oxigênio dissolvido – OD, (b) Carbono orgânico no sedimento – CO(s), (c) Nitrogênio total no sedimento – NT(s), (d) Fósforo total no sedimento – FT(s), (e) Fósforo reativo solúvel na água – FRS, (f) Fósforo total na água – PT, (g) Carbono orgânico dissolvido na água – COD, (h) Nitrogênio total na água – NT nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S) ($\pm$ SE). As letras diferentes indicam diferenças estatísticas entre os dois ambientes ($p < 0,05$).

No *headspace*, os fluxos de CO₂ ($p < 0,001$) e CH₄ ($p = 0,012$) dos ambientes com cultivos foram significativamente maiores que nos ambientes sem vegetação (Fig. 12a, b). Com relação às concentrações de CO₂ e CH₄ na água sobrenadante, os ambientes com vegetação também apresentaram valores significativamente maiores ($p < 0,001$) do que os ambientes sem vegetação (Fig 12c, d).

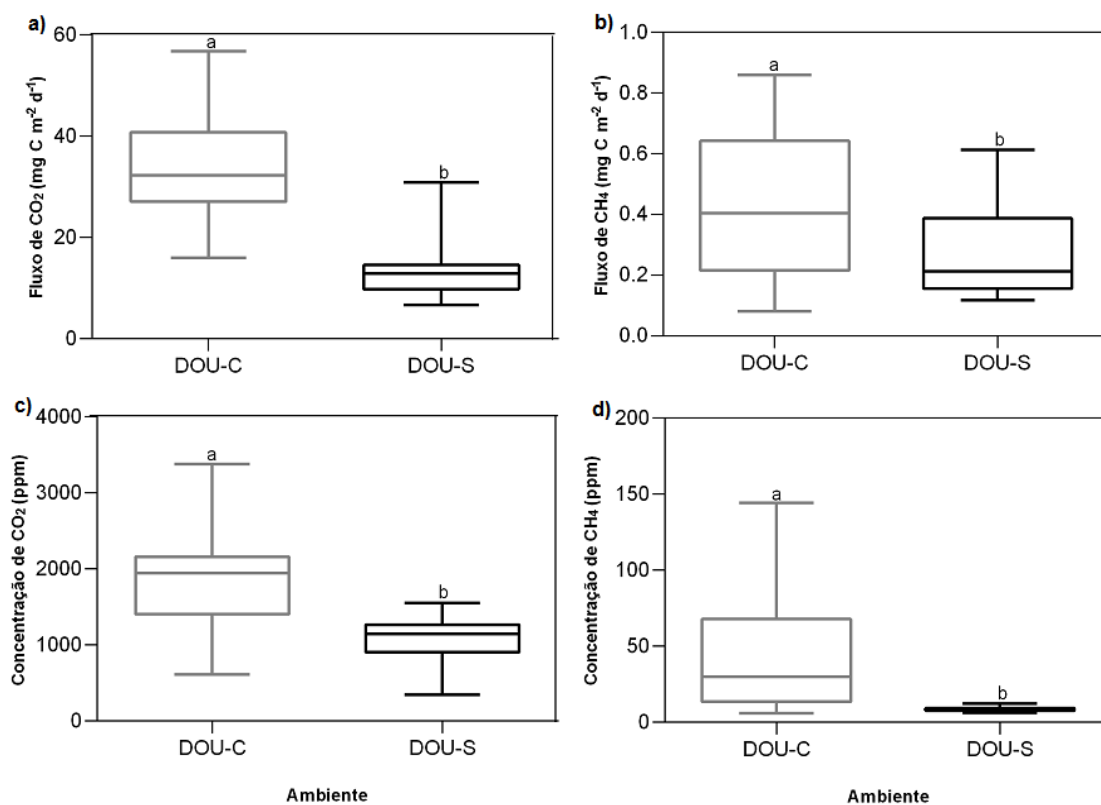


Fig. 12. (a) Fluxo médio de CO₂, (b) Fluxo médio de CH₄, (c) Concentração de CO₂ na água, (d) Concentração de CH₄ na água nos ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S) ($\pm$ SE). As letras diferentes indicam diferenças estatísticas entre os dois ambientes ($p < 0,05$).

Quando as emissões de CO₂ e CH₄ foram relacionadas às variáveis ambientais na PCA, o primeiro (45,7%) e o segundo (26,6%) componentes explicaram 72,3% da variação (Fig. 13). O primeiro componente correspondeu a condutividade elétrica da água, temperatura da água, concentração de CH₄ na água, fluxo de CH₄ no *headspace*, fluxo de CO₂ no *headspace*, concentração de CO₂ na água e concentração de OD na água (com maior contribuição). Os pontos do ambiente DOU-C apareceram, majoritariamente, no sentido contrário à reta de concentração de OD, o que indica que a concentração de oxigênio dissolvido foi muito menor nesses pontos. O segundo componente correspondeu a maior contribuição de turbidez e pH. Os pontos de DOU-C apresentaram maior

dispersão em relação aos pontos de DOU-S e alguns pontos, dos dois ambientes, não apresentaram relação significativa com os componentes principais.

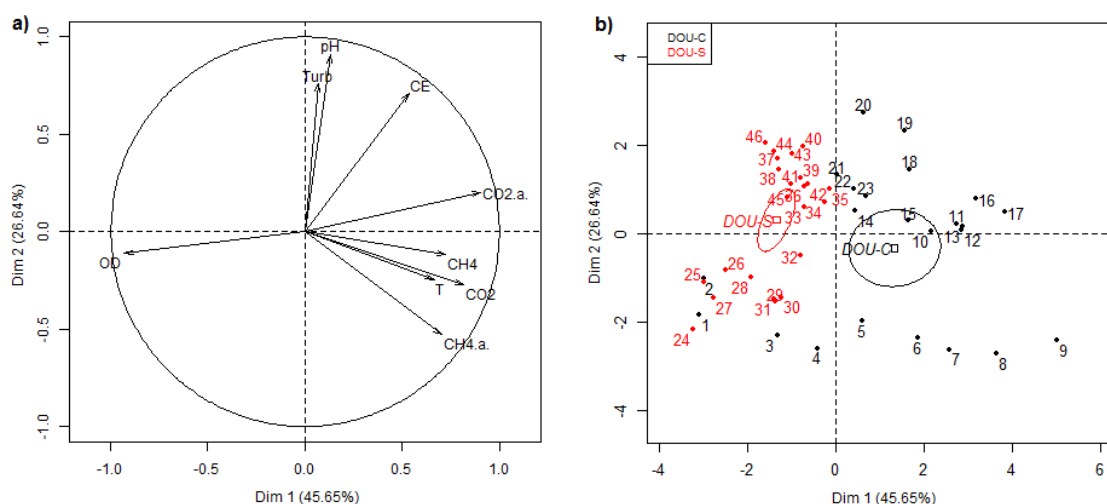


Fig. 13. Análise de componentes principais (PCA). (a) Condutividade elétrica (CE), temperatura (T), concentração de CH₄ na água (CH₄.a.), fluxo de CH₄ (CH₄), fluxo de CO₂ (CO₂), concentração de CO₂ na água (CO₂.a.), oxigênio dissolvido (OD), (b) Ambientes com cultivos agrícolas (DOU-C) e sem cultivos agrícolas (DOU-S).

4. DISCUSSÃO

Nossos resultados demonstram que os fluxos de CO₂ e CH₄ para a atmosfera após a reinundação são maiores nas áreas com cultivos agrícolas, confirmando a nossa hipótese. A maior taxa de produção de GEE pode ser atribuída às taxas de decomposição/respiração, que são maiores devido às elevadas quantidades de matéria orgânica e nutrientes bio-disponíveis no sedimento (BORKEN; MATZNER, 2009; KIM et al., 2015; SHI et al., 2011) explicadas pela presença do capim (cobertura vegetal) (SANZ-COBENA et al., 2013; SPONSELLER, 2007), que induz o aumento da atividade microbiana. Além disso, a presença de raízes nas áreas com vegetação contribuiu para a maior infiltração da água nos espaços porosos dos sedimentos. A água pode deslocar o ar enriquecido em CO₂ que se acumula nos poros durante períodos secos, contribuindo para o fluxo do gás para a atmosfera (HUXMAN et al., 2004). As raízes das plantas também podem exsudar carbono que pode ser mineralizado para CO₂ ou outros substratos para a metanogênese, resultando em produção de CH₄ (PETRUZZELLA et al., 2013) e podem facilitar o transporte do metano, conduzindo-o de áreas mais profundas do sedimento para a água (BRIDGHAM et al., 2013).

A reidratação dos sedimentos secos aumentou consideravelmente o fluxo de CO₂ e CH₄ para a atmosfera do primeiro para o segundo dia de incubação, resultado

também documentado em outros estudos (FROMIN et al., 2010; GALLO et al., 2014a; SMITH et al., 2017). Episódios de reidratação após um longo período de exposição dos sedimentos podem desencadear pulsos de respiração microbiana devido à ruptura e à liberação de agregados, levando a um aumento do suprimento de substrato lábil (BORKEN; MATZNER, 2009; VERPOORTER et al., 2014) e causando a liberação de GEE, fenômeno conhecido como “efeito Birch” (BIRCH, 1958). Além do mais, a reidratação alivia as limitações de água dos microrganismos do solo e consequentemente pode aumentar a liberação de C do sedimento e a respiração heterotrófica (HUANG; LI; SU, 2015).

Apesar do aumento inicial nas emissões de CO₂ e CH₄ para a atmosfera após a reidratação dos sedimentos, a intensidade das emissões variou fortemente durante o período de incubação. Os picos de emissão de CO₂ e CH₄ nos tubos com vegetação coincidiram e ocorreram apenas no décimo dia. Isso indica que, no caso do CO₂, o oxigênio não foi rapidamente assimilado pelos microrganismos aeróbios. Esse atraso pode estar relacionado a ajustes fisiológicos e à resiliência da comunidade microbiana em resposta a mudanças temporárias na umidade e na aeração do sedimento (JIN et al., 2016). Ainda, é provável que os microcosmos tenham levado alguns dias para estabelecer a microbiota da água e do sedimento, atrasando as respostas metabólicas, considerando o desenho experimental adotado. Com relação ao CH₄, a decomposição da matéria orgânica pode resultar na disponibilidade de CO₂, H₂, metanol e acetato, que são substratos importantes para a produção de CH₄ (SCHULZ; CONRAD, 1996). Isso evidenciaria os maiores fluxos de CH₄ coincidindo, no tempo, com os de CO₂. Adicionalmente, também considerando a condição experimental, espera-se que a condição de anaerobiose no sedimento tenha sido estabelecida após recolonização pelos microorganismos.

Nos tubos sem vegetação, os picos de emissão de CO₂ e CH₄ variaram no tempo. Há um pico de liberação de CO₂ já nos primeiros dias de incubação, que pode ter sido resultado da rápida assimilação da matéria orgânica devido à disponibilidade de oxigênio dissolvido causada pela adição da água, que favoreceu o processo de decomposição. Alternativamente, é possível que o gás que estava preso entre os grãos de sedimento tenha sido liberado com a chegada da água. O pico de emissão de CH₄ foi muito baixo com relação ao observado nos tubos com cultivos agrícolas. Isso pode estar relacionado as altas concentrações de OD, uma vez que condições bem oxigenadas são favoráveis à inibição da metanogênese, ao consumo de CH₄ (SMITH et al., 2018) ou à oxidação de

CH₄ (SAWAKUCHI et al., 2014) através da atividade das bactérias metanotróficas (KIM et al., 2015).

Ainda que as emissões de CO₂ e CH₄ tenham ocorrido, elas podem ser consideradas baixas em relação a outros estudos que também testaram as emissões de GEE após reidratação de sedimentos expostos (FROMIN et al., 2010; KOSTEN et al., 2018). O estudo de Fromin et al. (2010) apresentou fluxos de 2-3 g C m⁻² d⁻¹ na forma de CO₂ e o experimento de Kosten et al. (2018) resultou em emissões de 1.725 mg C m⁻² d⁻¹ na forma de CO₂ e 100,8 mg C m⁻² d⁻¹ na forma de CH₄. Os resultados deste estudo, no entanto, podem ter sido parcialmente afetados pela duração da secagem do sedimento do reservatório. Um relatório fornecido por Borken e Matzner (2009) indicou que um grande período de exposição do sedimento em relação a um curto período de reidratação pode diminuir ou não afetar a taxa de mineralização de C, resultando em baixas emissões de CO₂ e CH₄. No caso do reservatório Dourado, os sedimentos estavam expostos à atmosfera desde outubro de 2017 e o período de reinundação testado neste estudo foi de 49 dias (tempo total de incubação). A dessecação prolongada dos sedimentos tem impacto direto na atividade microbiana (SABATER et al., 2016), podendo culminar na dormência ou até mesmo na mortalidade dos microrganismos, reduzindo a atividade de enzimas extracelulares, que desempenham função essencial na degradação da matéria orgânica (WALLENSTEIN et al., 2012). Assim como a dessecação prolongada, o umedecimento rápido também pode levar ao choque osmótico e à morte de algumas células microbianas (BORKEN; MATZNER, 2009), reduzindo a atividade metabólica por parte dos microrganismos, tendo como consequência direta a diminuição do fluxo dos gases.

As análises de fluxo de CO₂ e CH₄ conduzidas nesta pesquisa mostram que a produção de dióxido de carbono e metano em sedimentos após evento de reidratação é nas áreas cujos sedimentos contêm cultivos agrícolas. Além disso, as taxas de produção de CO₂ foram mais elevadas do que as de CH₄. No entanto, deve-se levar em consideração que o metano tem 25 vezes mais potencial de aquecimento global, por molécula, do que o CO₂ ao longo de um horizonte de 100 anos de tempo de residência atmosférico calculado (IPCC, 2007). Isso indica que as emissões de metano, mesmo baixas, não podem ser desprezadas. As características dos ambientes com cultivos agrícolas (forte presença de matéria orgânica, plantas e nutrientes) também mostraram ser importantes indicadoras dos fluxos de CO₂ e CH₄. Essa resposta expressiva das áreas com vegetação sugere que mudanças na paisagem e no uso da terra podem promover um feedback climático positivo e poderoso. Assim, este estudo demonstra que a alteração no uso da

terra contribui para a elevação da produção de dois poderosos gases do efeito estufa e para a emissão destes para atmosfera.

De acordo com o Painel Intergovernamental de Ciências Climáticas e pesquisas na área (MARENGO et al., 2009; IPCC, 2014), os períodos de estiagem se tornarão cada vez mais frequentes e mais intensos na região semiárida, o que indica que os reservatórios secarão e ficarão cada vez mais susceptíveis às alterações impostas pela população, culminando na emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono e metano.

5. CONCLUSÃO

Pouca atenção tem sido dada às emissões de GEE em regiões limitadas por água, onde os corpos d'água apresentam fluxos efêmeros. Trazemos à tona, com este estudo, uma nova realidade das regiões onde os sedimentos dos reservatórios ficam expostos por longos períodos de tempo: a utilização deles como substrato para cultivos agrícolas. Cultivos estes que podem acentuar as emissões de CO₂ e CH₄, como vimos nos resultados mostrados aqui. Dessa forma, acreditamos que as emissões de reservatórios que apresentam ciclos de secagem-reinundação devem ser consideradas em avaliações futuras do balanço de C de ecossistemas aquáticos continentais, levando em consideração os fins para os quais o sedimento exposto está sendo utilizado.

A estimativa das emissões de CO₂ e CH₄ na reinundação do reservatório Dourado destaca um forte impacto da seca nos fluxos destes gases no reservatório analisado. A reumidificação pode liberar grandes estoques de carbono enterrados no sedimento, como ocorreu de forma mais acentuada nos ambientes com cultivos agrícolas, mas também nos ambientes sem cultivos agrícolas. As características dos ambientes com cultivos agrícolas (forte presença de matéria orgânica, plantas e nutrientes) mostraram ser importantes indicadoras dos fluxos de CO₂ e CH₄.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACUÑA, V. et al. Does the severity of non-flow periods influence ecosystem structure and function of temporary streams? A mesocosm study. **Freshwater Biology**, v. 63, n. 7, p. 613–625, 2018.
- ALMEIDA, R. M. et al. High primary production contrasts with intense carbon emission in a eutrophic tropical reservoir. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, n. MAY, p. 1–13, 2016.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMORIM, M.; SANTOS, M. A. DOS; CAMARGO, J. M. R. DE. Methane diffusive fluxes from sediment exposed in a Brazilian tropical reservoir drawdown zone. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 90, p. 463–470, 2019.
- ARONSON, E. L.; ALLISON, S. D.; HELLIKER, B. R. Environmental impacts on the diversity of methane-cycling microbes and their resultant function. **Frontiers in Microbiology**, v. 4, n. AUG, p. 1–15, 2013.
- BARBOSA, J. E. DE L. et al. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 103–118, 2012.
- BASTVIKEN, D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, n. 4, p. 1–12, 2004.
- BASTVIKEN, D. et al. the Continental Carbon Sink. **Science**, v. 331, n. Table 1, p. 50, 2011.
- BATTIN, T. J. et al. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. **Nature Geoscience**, p. 95–100, 2008.
- BEAULIEU, J. J. et al. Effects of an Experimental Water-level Drawdown on Methane Emissions from a Eutrophic Reservoir. **Ecosystems**, v. 21, n. 4, p. 657–674, 2018.
- BEZERRA JÚNIOR, J. G. O.; SILVA, N. M. DA. Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó Oriental do Rio Grande do Norte. **Holos**, v. 23, n. 2, p. 78–91, 2007.
- BIRCH, H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. **Plant and Soil**, v. 10, n. 1, p. 9–31, 1958.
- BORKEN, W.; MATZNER, E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. **Global Change Biology**, v. 15, n. 4, p. 808–824, 2009.
- BRIDGHAM, S. D. et al. Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. **Global Change Biology**, v. 19, n. 5, p. 1325–1346, 2013.
- COLE, J. J. et al. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 171–184, 2007.
- CURIEL YUSTE, J. et al. Soil heterotrophic CO₂ emissions from tropical high-elevation ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture

- fluctuations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 110, p. 8–11, 2017.
- DEEMER, B. R. et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. **BioScience**, v. 66, n. 11, p. 949–964, 2016.
- EMBRAPA, E. B. D. P. A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.: s.n.].
- FERREIRA, R. S. **Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- FORSTER, P. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing (IPCC 2007). In: **Climate Change**. [s.l.: s.n.]. v. 30p. 129–234.
- FROMIN, N. et al. Impact of seasonal sediment desiccation and rewetting on microbial processes involved in greenhouse gas emissions. **Ecohydrology**, v. 3, n. April, p. 238–245, 2010.
- FURLANETTO, L. M. et al. Potential Carbon Gas Production in Southern Brazil Wetland Sediments: Possible Implications of Agricultural Land Use and Warming. **Wetlands**, v. 38, n. 3, p. 485–495, 2018.
- GALLO, E. L. et al. Physical and biological controls on trace gas fluxes in semi-arid urban ephemeral waterways. **Biogeochemistry**, v. 121, n. 1, p. 189–207, 2014a.
- GALLO, E. L. et al. Physical and biological controls on trace gas fluxes in semi-arid urban ephemeral waterways. **Biogeochemistry**, v. 121, n. 1, p. 189–207, 2014b.
- GÓMEZ-GENER, L. et al. When Water Vanishes: Magnitude and Regulation of Carbon Dioxide Emissions from Dry Temporary Streams. **Ecosystems**, v. 19, n. 4, p. 710–723, 2016.
- GUÉRIN, F. et al. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 21, p. 1–6, 2006.
- HARRISON, J. A. et al. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 1267–1277, 2017.
- HOLGERSON, M. A.; RAYMOND, P. A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 3, p. 222–226, 2016.
- HUANG, G.; LI, Y.; SU, Y. G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 83, p. 52–56, 2015.
- HUXMAN, T. E. et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, n. 2, p. 254–268, 2004.
- IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary**. [s.l.: s.n.].
- JACINTHE, P. A. Carbon dioxide and methane fluxes in variably-flooded riparian forests. **Geoderma**, v. 241–242, p. 41–50, 2015.

- JIN, H. et al. Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 12, 2016.
- JUNGER, P. C. et al. Effects of seasonality, trophic state and landscape properties on CO₂ saturation in low-latitude lakes and reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 664, p. 283–295, 2019.
- KAUSHAL, S. S. et al. Land use and climate variability amplify carbon, nutrient, and contaminant pulses: A review with management implications. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 3, p. 585–614, 2014.
- KIM, D. G. et al. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: A review of current literature and suggestions for future research. **Biogeosciences**, v. 9, n. 7, p. 2459–2483, 2012.
- KIM, S. Y. et al. Combined effects of carbon, nitrogen and phosphorus on CH₄ production and denitrification in wetland sediments. **Geoderma**, v. 259–260, p. 354–361, 2015.
- KOSTEN, S. et al. Extreme drought boosts CO₂ and CH₄ emissions from reservoir drawdown areas. **Inland Waters**, v. 0, n. 0, p. 1–12, 2018.
- LIDE, D. R. ET AL. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed. Edited by David R. Lide, Editor-in-Chief, and W. M. “Mickey” Haynes, Associate Editor (National Institute of Standards and Technology). **Journal of the American Chemical Society**, v. 131, n. 35, p. 12862–12862, 2009.
- LLOYD, C. R.; REBELO, L. M.; MAX FINLAYSON, C. Providing low-budget estimations of carbon sequestration and greenhouse gas emissions in agricultural wetlands. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, 2013.
- MACKLIN, P. A. et al. Carbon dioxide dynamics in a lake and a reservoir on a tropical island (Bali, Indonesia). **Plos One**, 2018.
- MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 6, p. 1089–1113, 2010.
- MATTHEWS, H. D.; CALDEIRA, K. Stabilizing climate requires near-zero emissions. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 4, p. 1–5, 2008.
- MEDEIROS, C. E. B. F. DE S. **Os impactos do uso e ocupação e evento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manancial tropical do semiárido**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.
- NAVARRO-GARCÍA, F.; CASERMEIRO, M. Á.; SCHIMEL, J. P. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 44, n. 1, p. 1–8, 2012.
- OLIVEIRA, J. N. P. **A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical**. [s.l.]

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 25, n. 3, p. 341–351, 2013.

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

SABATER, S. et al. Stream Biofilm Responses to Flow Intermittency: From Cells to Ecosystems. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. March, p. 1–10, 2016.

SANZ-COBENA, A. et al. Do cover crops enhance N₂O, CO₂ or CH₄ emissions from soil in Mediterranean arable systems? **Science of The Total Environment**, v. 466–467, p. 164–174, 2013.

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

SCHULZ, S.; CONRAD, R. Influence of temperature on pathways to methane production in the permanently cold profundal sediment of Lake Constance. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 20, n. 1, p. 1–14, 1996.

SHI, W. Y. et al. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest-grassland transition zone of the Loess Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 7, p. 854–863, 2011.

SHI, W. Y. et al. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. **Atmospheric Environment**, v. 88, p. 74–82, 2014.

SKINNER, D. et al. Extreme water level decline effects sediment distribution and composition in Lake Alexandrina, South Australia. **Limnology**, v. 15, n. 2, p. 117–126, 2014.

SMITH, A. P. et al. Shifts in pore connectivity from precipitation versus groundwater rewetting increases soil carbon loss after drought. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2017.

SMITH, K. A. et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 10–20, 2018.

SOBEK, S. et al. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6, p. 2243–2254, 2009.

SPONSELLER, R. A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. **Global Change Biology**, v. 13, n. 2, p. 426–436, 2007.

STANLEY, E. H. . The ecology of methane in streams and rivers: patterns, controls, and global significance. v. 86, n. 2, p. 146–171, 2016.

TANG, K. W. et al. Methane production in oxic lake waters potentially increases aquatic methane flux to air. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 3, n. 6, p. 227–233, 2016.

THOMAS, A. D.; HOON, S. R. Carbon dioxide fluxes from biologically-crusts Kalahari Sands after simulated wetting. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 1, p. 131–139, 2010.

THOMAS, A. D.; HOON, S. R.; DOUGILL, A. J. Soil respiration at five sites along the Kalahari Transect: Effects of temperature, precipitation pulses and biological soil crust cover. **Geoderma**, v. 167–168, p. 284–294, 2011.

TRANVIK, L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6 PART 2, p. 2298–2314, 2009.

TRANVIK, L. J.; COLE, J. J.; PRAIRIE, Y. T. The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. **Limnology and Oceanography Letters**, v. 3, n. 3, p. 41–48, 2018.

UNGER, S. et al. The influence of precipitation pulses on soil respiration - Assessing the “ Birch effect” by stable carbon isotopes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 10, p. 1800–1810, 2010.

VALDERRAMA, J. C. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. **Marine Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 109–122, 1981.

VERPOORTER, C. et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 18, p. 6396–6402, 2014.

WALLENSTEIN, M. D. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216–234, 2012.

WATTENBACH, M. et al. Climate extremes and the carbon cycle. **Nature**, v. 500, n. 7462, p. 287–295, 2013.

WCD. Dams and development : a new framework for decision-making : overview of the report by the World Commission on Dams. **108**, n. December, p. 17 p, 2001.

WILLIAMSON, C. E. et al. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6 PART 2, p. 2273–2282, 2009.

YANG, L. et al. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 10, p. 1–11, 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho ressaltam a importância dos ciclos de secagem e reinundação em sedimentos de reservatórios para os fluxos globais de GEE. Os fluxos de CO₂ e CH₄ exibiram respostas heterogêneas nos quatro reservatórios analisados no primeiro capítulo. As evidências disponíveis sugerem que secas prolongadas podem liberar grandes quantidades de carbono estocado nos sedimentos, principalmente na forma de CO₂, e que a quantidade de carbono liberada é maior do que nos sedimentos reinundados. As previsões mais recentes (Marengo et al., 2009; IPCC, 2014) indicam que os eventos de seca se tornarão ainda mais intensos e frequentes, especialmente nas regiões semiáridas, o que sugere que os sedimentos dos reservatórios podem ficar expostos à atmosfera com maior frequência e se tornarem potenciais emissores de carbono. O efeito causado pela reinundação, por sua vez, mostrou-se ser um importante impulsionador do fluxo de CH₄ para a atmosfera. Isso mostra que a reinundação nem sempre irá estimular os fluxos de CO₂ e confirmam que ela pode intensificar os fluxos de CH₄ em sedimentos anteriormente expostos (JIN et al., 2016; KOSTEN et al., 2018).

No reservatório Dourado, onde parte dos sedimentos secos da área de drenagem foi tomada para a plantação de espécies vegetais, a reumidificação dos sedimentos liberou estoques de carbono enterrados no sedimento de forma mais acentuada nos ambientes com cultivos agrícolas, mas também nos ambientes sem cultivos agrícolas. Os fluxos de CO₂ e CH₄ nas áreas com cultivos agrícolas foram cerca de três e duas vezes maiores que os fluxos nas áreas sem cultivos agrícolas, respectivamente. O teor de matéria orgânica e a concentração de nutrientes (nitrogênio e fósforo) na água e no sedimento mostraram ser impulsionadores do fluxo dos GEE. Tendo em vista que os grandes períodos de estiagem se tornarão cada vez mais frequentes, os reservatórios secarão e ficarão cada vez mais susceptíveis às alterações impostas pela população. Dessa forma, acreditamos que as emissões de reservatórios que apresentam ciclos de secagem-reinundação devem ser consideradas em avaliações futuras do balanço de C de ecossistemas aquáticos continentais, levando em consideração os fins para os quais o sedimento exposto está sendo utilizado.

CONCLUSÕES

1. Os fluxos de CO₂ e CH₄ exibiram respostas heterogêneas após a reinundação dos sedimentos expostos de reservatórios localizados na região semiárida do Brasil.
2. Em três reservatórios, a simulação de reinundação reduziu as emissões de CO₂, de forma que os sedimentos secos emitiram mais CO₂ para a atmosfera do que aqueles que foram reinundados.
3. Gargalheiras, o único reservatório cujos maiores fluxos resultaram dos sedimentos reinundados, apresentou características bioquímicas (teor de matéria orgânica e nutrientes) que se destacaram e que se mostraram impulsionadoras dos fluxos de CO₂.
4. A reinundação intensificou os fluxos de CH₄ nos reservatórios analisados.
5. Os resultados deste estudo mostram a importância de considerar as emissões de CO₂ e CH₄ de sedimentos expostos durante eventos de secas extremas, indicando que elas devem ser consideradas em avaliações futuras do balanço de C de reservatórios, especialmente nas regiões semiáridas, cujos períodos de estiagem se tornarão cada vez mais frequentes e mais intensos.
6. A reinundação liberou maiores estoques de carbono nos sedimentos com cultivos agrícolas em comparação com os sedimentos sem vegetação.
7. As características dos ambientes com cultivos agrícolas (forte presença de matéria orgânica, plantas e nutrientes) mostraram ser importantes indicadoras dos fluxos de CO₂ e CH₄.
8. Mudanças na paisagem e no uso da terra, nas regiões semiáridas, podem contribuir para a elevação da produção de dois poderosos gases do efeito estufa e para a emissão destes para atmosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACUÑA, V. et al. Does the severity of non-flow periods influence ecosystem structure and function of temporary streams? A mesocosm study. **Freshwater Biology**, v. 63, n. 7, p. 613–625, 2018.
- ALMEIDA, R. M. et al. High primary production contrasts with intense carbon emission in a eutrophic tropical reservoir. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, n. MAY, p. 1–13, 2016.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMORIM, M.; SANTOS, M. A. DOS; CAMARGO, J. M. R. DE. Methane diffusive fluxes from sediment exposed in a Brazilian tropical reservoir drawdown zone. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 90, p. 463–470, 2019.
- ARONSON, E. L.; ALLISON, S. D.; HELLIKER, B. R. Environmental impacts on the diversity of methane-cycling microbes and their resultant function. **Frontiers in Microbiology**, v. 4, n. AUG, p. 1–15, 2013.
- BARBOSA, J. E. DE L. et al. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 103–118, 2012.
- BASTVIKEN, D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, n. 4, p. 1–12, 2004.
- BASTVIKEN, D. et al. the Continental Carbon Sink. **Science**, v. 331, n. Table 1, p. 50, 2011.
- BATTIN, T. J. et al. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. **Nature Geoscience**, p. 95–100, 2008.
- BEAULIEU, J. J. et al. Effects of an Experimental Water-level Drawdown on Methane Emissions from a Eutrophic Reservoir. **Ecosystems**, v. 21, n. 4, p. 657–674, 2018.
- BEZERRA JÚNIOR, J. G. O.; SILVA, N. M. DA. Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó Oriental do Rio Grande do Norte. **Holos**, v. 23, n. 2, p. 78–91, 2007.
- BIRCH, H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. **Plant and Soil**, v. 10, n. 1, p. 9–31, 1958.
- BORKEN, W.; MATZNER, E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. **Global Change Biology**, v. 15, n. 4, p. 808–824,

2009.

BRIDGHAM, S. D. et al. Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. **Global Change Biology**, v. 19, n. 5, p. 1325–1346, 2013.

COLE, J. J. et al. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 171–184, 2007.

CURIEL YUSTE, J. et al. Soil heterotrophic CO₂ emissions from tropical high-elevation ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture fluctuations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 110, p. 8–11, 2017.

DEEMER, B. R. et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. **BioScience**, v. 66, n. 11, p. 949–964, 2016.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.: s.n.].

FERREIRA, R. S. **Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

FORSTER, P. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing (IPCC 2007). In: **Climate Change**. [s.l.: s.n.]. v. 30p. 129–234.

FROMIN, N. et al. Impact of seasonal sediment desiccation and rewetting on microbial processes involved in greenhouse gas emissions. **Ecohydrology**, v. 3, n. April, p. 238–245, 2010.

FURLANETTO, L. M. et al. Potential Carbon Gas Production in Southern Brazil Wetland Sediments: Possible Implications of Agricultural Land Use and Warming. **Wetlands**, v. 38, n. 3, p. 485–495, 2018.

GALLO, E. L. et al. Physical and biological controls on trace gas fluxes in semi-arid urban ephemeral waterways. **Biogeochemistry**, v. 121, n. 1, p. 189–207, 2014a.

GALLO, E. L. et al. Physical and biological controls on trace gas fluxes in semi-arid urban ephemeral waterways. **Biogeochemistry**, v. 121, n. 1, p. 189–207, 2014b.

GÓMEZ-GENER, L. et al. When Water Vanishes: Magnitude and Regulation of Carbon Dioxide Emissions from Dry Temporary Streams. **Ecosystems**, v. 19, n. 4, p. 710–723, 2016.

GUÉRIN, F. et al. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 21, p. 1–6, 2006.

HARRISON, J. A. et al. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify

- Methane Emission. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 1267–1277, 2017.
- HOLGERSON, M. A.; RAYMOND, P. A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 3, p. 222–226, 2016.
- HUANG, G.; LI, Y.; SU, Y. G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 83, p. 52–56, 2015.
- HUXMAN, T. E. et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, n. 2, p. 254–268, 2004.
- IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary**. [s.l: s.n.].
- JACINTHE, P. A. Carbon dioxide and methane fluxes in variably-flooded riparian forests. **Geoderma**, v. 241–242, p. 41–50, 2015.
- JIN, H. et al. Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 12, 2016.
- JUNGER, P. C. et al. Effects of seasonality, trophic state and landscape properties on CO₂ saturation in low-latitude lakes and reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 664, p. 283–295, 2019.
- KAUSHAL, S. S. et al. Land use and climate variability amplify carbon, nutrient, and contaminant pulses: A review with management implications. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 3, p. 585–614, 2014.
- KIM, D. G. et al. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: A review of current literature and suggestions for future research. **Biogeosciences**, v. 9, n. 7, p. 2459–2483, 2012.
- KIM, S. Y. et al. Combined effects of carbon, nitrogen and phosphorus on CH₄ production and denitrification in wetland sediments. **Geoderma**, v. 259–260, p. 354–361, 2015.
- KOSTEN, S. et al. Extreme drought boosts CO₂ and CH₄ emissions from reservoir drawdown areas. **Inland Waters**, v. 0, n. 0, p. 1–12, 2018.
- LIDE, D. R. ET AL. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed. Edited by David R. Lide, Editor-in-Chief, and W. M. “Mickey” Haynes, Associate Editor (National

Institute of Standards and Technology,. **Journal of the American Chemical Society**, v. 131, n. 35, p. 12862–12862, 2009.

LLOYD, C. R.; REBELO, L. M.; MAX FINLAYSON, C. Providing low-budget estimations of carbon sequestration and greenhouse gas emissions in agricultural wetlands. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, 2013.

MACKLIN, P. A. et al. Carbon dioxide dynamics in a lake and a reservoir on a tropical island (Bali , Indonesia). **Plos One**, 2018.

MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 6, p. 1089–1113, 2010.

MATTHEWS, H. D.; CALDEIRA, K. Stabilizing climate requires near-zero emissions. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 4, p. 1–5, 2008.

MEDEIROS, C. E. B. F. DE S. **Os impactos do uso e ocupação e evento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manancial tropical do semiárido**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.

NAVARRO-GARCÍA, F.; CASERMEIRO, M. Á.; SCHIMEL, J. P. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 44, n. 1, p. 1–8, 2012.

OLIVEIRA, J. N. P. **A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 25, n. 3, p. 341–351, 2013.

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

SABATER, S. et al. Stream Biofilm Responses to Flow Intermittency: From Cells to Ecosystems. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. March, p. 1–10, 2016.

SANZ-COBENA, A. et al. Do cover crops enhance N₂O, CO₂ or CH₄ emissions from soil in Mediterranean arable systems? **Science of The Total Environment**, v. 466–467, p. 164–174, 2013.

SAWAKUCHI, H. O. et al. Methane emissions from Amazonian Rivers and their

- contribution to the global methane budget. **Global Change Biology**, v. 20, n. 9, p. 2829–2840, 2014.
- SCHULZ, S.; CONRAD, R. Influence of temperature on pathways to methane production in the permanently cold profundal sediment of Lake Constance. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 20, n. 1, p. 1–14, 1996.
- SHI, W. Y. et al. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest-grassland transition zone of the Loess Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 7, p. 854–863, 2011.
- SHI, W. Y. et al. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. **Atmospheric Environment**, v. 88, p. 74–82, 2014.
- SKINNER, D. et al. Extreme water level decline effects sediment distribution and composition in Lake Alexandrina, South Australia. **Limnology**, v. 15, n. 2, p. 117–126, 2014.
- SMITH, A. P. et al. Shifts in pore connectivity from precipitation versus groundwater rewetting increases soil carbon loss after drought. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2017.
- SMITH, K. A. et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 10–20, 2018.
- SOBEK, S. et al. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6, p. 2243–2254, 2009.
- SPONSELLER, R. A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. **Global Change Biology**, v. 13, n. 2, p. 426–436, 2007.
- STANLEY, E. H. . The ecology of methane in streams and rivers: patterns, controls, and global significance. v. 86, n. 2, p. 146–171, 2016.
- TANG, K. W. et al. Methane production in oxic lake waters potentially increases aquatic methane flux to air. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 3, n. 6, p. 227–233, 2016.
- THOMAS, A. D.; HOON, S. R. Carbon dioxide fluxes from biologically-crusted Kalahari Sands after simulated wetting. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 1, p. 131–139, 2010.
- THOMAS, A. D.; HOON, S. R.; DOUGILL, A. J. Soil respiration at five sites along the

- Kalahari Transect: Effects of temperature, precipitation pulses and biological soil crust cover. **Geoderma**, v. 167–168, p. 284–294, 2011.
- TRANVIK, L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6 PART 2, p. 2298–2314, 2009.
- TRANVIK, L. J.; COLE, J. J.; PRAIRIE, Y. T. The study of carbon in inland waters- from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. **Limnology and Oceanography Letters**, v. 3, n. 3, p. 41–48, 2018.
- UNGER, S. et al. The influence of precipitation pulses on soil respiration - Assessing the “ Birch effect” by stable carbon isotopes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 10, p. 1800–1810, 2010.
- VALDERRAMA, J. C. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. **Marine Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 109–122, 1981.
- VERPOORTER, C. et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 18, p. 6396–6402, 2014.
- WALLENSTEIN, M. D. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216–234, 2012.
- WATTENBACH, M. et al. Climate extremes and the carbon cycle. **Nature**, v. 500, n. 7462, p. 287–295, 2013.
- WCD. Dams and development : a new framework for decision-making : overview of the report by the World Commission on Dams. **108**, n. December, p. 17 p, 2001.
- WILLIAMSON, C. E. et al. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6 PART 2, p. 2273–2282, 2009.
- YANG, L. et al. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 10, p. 1–11, 2012.