



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTORIA FERRO MAESTRELLI

RELAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS
COM ECORREGIÕES

CURITIBA

2023

VICTORIA FERRO MAESTRELLI

RELAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS
COM ECORREGIÕES

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Michael Mannich

CURITIBA

2023



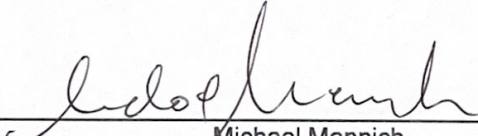
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

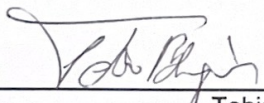
TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

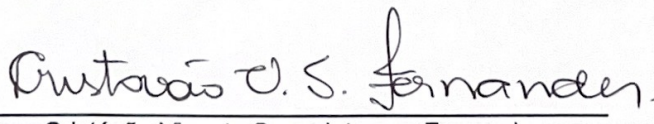
VICTORIA FERRO MAESTRELLI

RELAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS COM ECORREGIÕES

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 10, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): 
Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 1: 
Tobias Bleninger
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2: 
Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes
Departamento de Hidráulica e Saneamento / UFPR

Curitiba, 05 de dezembro de 2023.

RESUMO

Este trabalho aborda a crescente preocupação global com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e as mudanças climáticas, destacando a importância dos reservatórios de água como fontes dessas emissões. O estudo busca compreender as dinâmicas complexas entre os reservatórios e a magnitude das emissões, propondo relação com as ecorregiões. O interesse surge da necessidade de avaliar as contribuições específicas de cada ecorregião para o balanço global de GEE. Diversos estudos consideram fatores como latitude, temperatura, vegetação e idade do reservatório, no entanto, propõe-se uma abordagem inovadora para avaliar a dimensão das emissões. A ausência de estudos que explorem essa relação ressalta a singularidade deste trabalho, consolidando as informações em uma nova base de dados. O objetivo é aprimorar a compreensão das interações entre reservatórios e ecorregiões, incentivando investigações mais aprofundadas na área. Na conclusão, o estudo destaca a importância de considerar as características específicas das ecorregiões para uma compreensão mais aprofundada das emissões de GEE. A escassez de dados disponíveis na literatura apresenta-se como desafio, limitando a análise por ecorregião e até mesmo por biomas. Apesar das limitações, o trabalho ressalta a necessidade contínua de esforços para obter dados mais abrangentes e detalhados, essenciais para uma compreensão precisa das relações entre emissões de GEE e características regionais.

Palavras-chaves: Reservatórios, emissões, gases do efeito estufa, ecorregiões.

ABSTRACT

This work addresses the growing global concern about greenhouse gas (GHG) emissions and climate change, emphasizing the significance of water reservoirs as sources of these emissions. The study aims to comprehend the intricate dynamics between reservoirs and the magnitude of emissions, proposing a relation with ecoregions. The interest arises from the need to assess the specific contributions of each ecoregion to the global GHG balance. While various studies consider factors such as latitude, temperature, vegetation, and reservoir age, an innovative approach is proposed to evaluate the dimension of emissions. The absence of studies exploring this relationship underscores the uniqueness of this work, consolidating information into a new database. The goal is to enhance understanding of interactions between reservoirs and ecoregions, encouraging more in-depth investigations in the field. In conclusion, the study highlights the importance of considering the specific characteristics of ecoregions for a deeper understanding of GHG emissions. Data scarcity in literature presents a challenge, limiting analysis by ecoregion and even by biomes. Despite limitations, the work emphasizes the ongoing need for efforts to obtain more comprehensive and detailed data, essential for a precise understanding of the relationships between GHG emissions and regional characteristics.

Key-words: Reservoirs, emissions, greenhouse gases, ecoregions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Efeito Estufa	14
FIGURA 2 – Alterações no ambiente pela construção de um reservatório. A) Antes do represamento temos a área do futuro reservatório onde o balanço de GEE precisa ser contabilizado. B) Pós-represamento temos as novas condições e os múltiplos processos e caminhos para as emissões de CO ₂ e CH ₄ . As emissões naturais são representadas pelas setas verdes, enquanto a fração emitida pela decomposição do material orgânico inundado, que foi induzida pelo represamento é indicada pelas setas azuis.	16
FIGURA 3 – Emissões totais de metano em $mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ de reservatórios da Amazônia. Para o reservatório de Samuel o valor é de 184 $mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ para a primeira medida, caindo para 24 $mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ no ano seguinte. Para o reservatório do Tucuruí o primeiro dado de medição indica emissão de 210 $mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$, e 15 $mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ para um ano depois.	18
FIGURA 4 – Fluxos de CO ₂ e CH ₄ em diferentes zonas. As médias (barras) e desvio padrão (linhas) dos fluxos de a) CO ₂ e b) CH ₄ dos reservatórios hidrelétricos analisados e agrupados por região. Na qual a região tropical foi dividida em regiões amazônica e não amazônica, uma vez que temos as maiores taxas de emissão na região tropical amazônica.	19
FIGURA 5 – Emissões de metano por latitude, destacando diferentes zonas eco-climáticas.	19
FIGURA 6 – Ecorregiões definidas em 2001.	21
FIGURA 7 – Ecorregiões definidas em 2017	21
FIGURA 8 – Distribuição geográfica mundial dos dados coletados. Cada ponto representa um reservatório que possui alguma medida de emissão de gás do efeito estufa de interesse para este estudo. As cores representam as ecorregiões em que se encontram os reservatórios conforme bases de dados elaborada.	29
FIGURA 9 – Distribuição geográfica mundial dos dados coletados. Cada ponto representa um reservatório que possui alguma medida de emissão de gás do efeito estufa de interesse para este estudo. As cores representam os biomas em que se encontram os reservatórios conforme bases de dados elaborada.	30

FIGURA 10 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Metano Difusivo. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano difusivo associadas à cada local.	36
FIGURA 11 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de metano difusivo para cada bioma.	37
FIGURA 12 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Metano Ebulitivo. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano ebulitivo associadas a cada local.	39
FIGURA 13 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de metano ebulitivo para cada bioma.	40
FIGURA 14 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Gás Carbônico Difusivo. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano difusivo associadas a cada local; enquanto a cor faz a distinção entre medidas positivas (azul) e negativas (vermelho).	42
FIGURA 15 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de gás carbônico difusivo para cada bioma.	43
FIGURA 16 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Gás Carbônico Equivalente. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano difusivo associadas a cada local; enquanto a cor faz a distinção entre medidas positivas (azul) e negativas (vermelho).	45
FIGURA 17 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de gás carbônico equivalente para cada bioma.	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Fluxos estimados de CH ₄ e CO ₂ entre a atmosfera e superfície das áreas estudadas, todas as estimativas estão em $gm^{-2}ano^{-1}$	17
TABELA 2 – Domínios biogeográficos conforme (OLSON et al., 2001)	20
TABELA 3 – Distribuição de dados (Base A). As medições de fluxo de metano estão apresentadas em miligramas de metano por metro quadrado por dia ($mgCH_4m^{-2}d^{-1}$).	23
TABELA 4 – Distribuição de dados (Base B)	24
TABELA 5 – Distribuição de dados (Base C)	24
TABELA 6 – Distribuição de dados da base de dados consolidada	25
TABELA 7 – Distribuição dos Biomas Terrestres e Ecorregiões Correspondentes. Nesta tabela, são apresentados os doze biomas terrestres presentes na amostra de dados, suas ecorregiões associadas e a contagem de medidas coletadas para cada ecorregião. A tabela fornece uma visão abrangente da distribuição geográfica dos biomas e ajuda a entender a distribuição e representatividade dos dados de medidas coletadas em diferentes ecorregiões.	34
TABELA 8 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de metano difusivo.	38
TABELA 9 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de metano ebulitivo.	41
TABELA 10 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de gás carbônico difusivo.	43
TABELA 11 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de gás carbônico equivalente.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

GEE Gases do Efeito Estufa

GHG Greenhouse Gases

GWP Gobal Warming Potencial

IPCC Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

OMM Organização Meteorológica Mundial

PNUMA Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

SIG Sistemas de Informações Geográficas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVOS GERAIS	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1	GASES DO EFEITO ESTUFA	13
3.2	FONTES EMISSORAS DE GEE	14
3.2.1	Emissões em reservatórios	15
3.2.2	Fatores que influenciam a dimensão das emissões	17
3.3	ECORREGIÕES	20
4	MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1	COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS DE EMISSÕES	22
4.1.1	Emissões de gases GEE	22
4.1.2	Procedimento de processamento	23
4.2	ECORREGIÕES	24
4.3	INTEGRAÇÃO DAS BASES DE DADOS	25
4.4	CÁLCULO DE GÁS CARBÔNICO EQUIVALENTE	25
4.5	ELABORAÇÃO DE MAPAS	26
4.6	ELABORAÇÃO DE GRÁFICOS	27
4.7	TESTE DE MANN-WHITNEY	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	DISTRIBUIÇÕES DOS DADOS DE MEDIÇÃO	28
5.2	MAGNITUDE DAS EMISSÕES	35
5.2.1	Fluxo de Metano Difusivo	36
5.2.2	Fluxo de Metano Ebulitivo	38
5.2.3	Fluxo Difusivo de Gás Carbônico	41
5.2.4	Gás Carbônico Equivalente	44
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	47
6	CONCLUSÃO	49

REFERÊNCIAS 51

1 INTRODUÇÃO

A preocupação global com as emissões de gases de efeito estufa e as consequentes mudanças climáticas têm crescido de forma significativa nas últimas décadas. A compreensão de que as atividades humanas estão causando alterações no clima da Terra, iniciou-se em 1990 por meio do relatório publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), despertando a necessidade de mais estudos para avaliar o tema e mitigar os impactos derivados. Considerando como os principais gases de efeito estufa de longa duração: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFCs) e tetracloreto de carbono (CCl_4) (IPCC, 1992).

Fang et al. (2011) afirmam que entre os gases citados, os CFCs, CH_4 e N_2O recebem menos ênfase devido ao controle eficaz das emissões de CFCs e ao fato de que as emissões de CH_4 e N_2O serem principalmente provenientes de fontes naturais. Fato que deve ser avaliado com cautela ao considerar como as influências de ações antrópicas afetam esses sistemas naturais e alteram os ciclos bioquímicos das áreas impactadas, como por meio da construção de reservatórios, aterros e estações de tratamento de esgoto. Fang et al. (2011) mencionam, ainda, que atualmente o CO_2 é considerado o principal gás de efeito estufa antropogênico, sendo a principal força impulsionadora do aquecimento global.

Além das fontes antropogênicas conhecidas de emissões, como a queima de combustíveis fósseis, processos industriais, desmatamento e exploração de minérios, estudos recentes têm revelado que reservatórios de água também desempenham um papel significativo na emissão de gases do efeito estufa (RUDD et al., 1993), (DEEMER et al., 2016), (TRANVIK et al., 2009). A partir dessa observação, surgiu o interesse e a necessidade de compreender as dimensões e os fatores que influenciam essas emissões, de modo a determinar sua contribuição no balanço global de gases de efeito estufa. Os reservatórios, que são amplamente utilizados para diversos fins, destacando-se a geração de energia, usos industriais, abastecimento populacional e irrigação, são conhecidos por seus benefícios econômicos e energéticos, mas seu impacto ambiental relacionado às emissões de GEE ainda carece de uma base de dados consolidada.

Os esforços para estimar as emissões provenientes de reservatórios enfrentam desafios devido à complexidade dos processos biogeoquímicos e à falta de uma abordagem padrão para o cálculo dessas emissões. A quantificação da pegada de carbono atual e futura dos reservatórios é um trabalho desafiador, principalmente por conta dos complexos processos envolvidos na dinâmica do carbono nos reservatórios, à existência de múltiplos mecanismos de emissão (como difusão, ebulição e desgaseificação)

e às dificuldades em contabilizar os balanços de GEE anteriores ao enchimento dos reservatórios (PRAIRIE; MERCIER-BLAIS et al., 2021).

Vários autores avaliaram quais fatores ambientais são determinantes para a magnitude das emissões de um reservatório, destacando a latitude, temperatura, vegetação e idade do reservatório (RUDD et al., 1993), (ROSA et al., 2003), (BARROS et al., 2011), (JOHNSON et al., 2021). No entanto, propõe-se outra abordagem para a avaliação da dimensão das emissões, a correlação com sua respectiva ecorregião. Fund (1995) admite que uma ecorregião é o nível mínimo necessário para alcançar a representação regional e o planejamento eficaz de conservação, definindo-a como um conjunto geograficamente distinto de comunidades naturais que compartilham uma grande maioria de suas espécies, dinâmica ecológica e condições ambientais semelhantes e cujas interações ecológicas são críticas para sua persistência a longo prazo.

Neste contexto, este trabalho possui o objetivo de analisar e relacionar as emissões de gases do efeito estufa em reservatórios com as ecorregiões. A hipótese considera a ecorregião fator explicador da variabilidade entre os ambientes aquáticos interiores, pois agrega alguns dos fatores que afetam a magnitude das emissões.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este estudo tem por objetivo analisar dados de emissões de gases do efeito estufa em reservatórios, disponíveis na literatura científica, a fim de investigar a relação entre sua magnitude e a respectiva ecorregião em que os reservatórios estão localizados.

Serão analisados dados de diferentes reservatórios, levando em consideração emissões de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Após formulação do objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Integrar bases de dados de emissões de GEE em reservatórios com a ecorregião correspondente à sua localização;
- ii. Realizar análises estatísticas para identificar possíveis correlações entre a magnitude das emissões de GEE e as características das ecorregiões correspondentes.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica sobre o tema central do presente trabalho. Tendo como objetivo explorar e analisar as principais contribuições, teorias e abordagens previamente desenvolvidas pelos pesquisadores que investigaram as emissões de GEE em reservatórios e ecorregiões.

3.1 GASES DO EFEITO ESTUFA

A consciência global sobre a concentração de gases do efeito estufa presente na atmosfera iniciou-se na década de 1950, quando Charles David Keeling constatou um aumento gradual e contínuo nas concentrações atmosféricas de CO_2 ao longo do tempo, por meio de dados de medição na Antártica, Havaí e Califórnia (KEELING, 1960). Apesar desse estudo ter trazido atenção para o tema, foi somente na década de 1980 que isso tornou-se de fato uma preocupação mundial, levando à criação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Foi a partir da síntese das diversas pesquisas sobre mudanças climáticas reunidas pelos cientistas e especialistas de várias áreas, que tornou-se possível relacionar o aumento da concentração de gases GEE na atmosfera com atividades humanas.

O primeiro relatório de avaliação do IPCC, publicado em 1990, afirmou que as concentrações atmosféricas dos principais gases de efeito estufa de longa duração – dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFCs) e tetracloro de carbono (CCl_4) – continuam a aumentar por causa das atividades humanas (IPCC, 1992). A presença dos gases GEE na atmosfera deve ser monitorada e remediada, pois em elevadas concentrações agem na intensificação do efeito estufa. Nesse processo, a Terra absorve a radiação solar e redistribui essa energia recebida pela atmosfera e oceanos. Parte dessa energia é reemitida de volta para o espaço na forma de radiação térmica ou infravermelha. Entretanto, GEE presentes na atmosfera absorvem parte dessa radiação térmica e a reemitem novamente para a atmosfera; causando um efeito de barreira térmica ao redor da Terra, retendo calor e elevando a temperatura média do planeta, conforme ilustrado na figura 1.

O efeito estufa é um processo natural responsável por manter as temperaturas médias do planeta possibilitando a existência da vida como conhecemos. No entanto, o aumento da concentração de gases de efeito estufa por ações antropogênicas intensifica esse processo. Quaisquer alterações no equilíbrio radiativo da Terra, tendem a alterar as temperaturas atmosférica e oceânica, agindo por modificar o clima global

ao longo do tempo (IPCC, 1992).

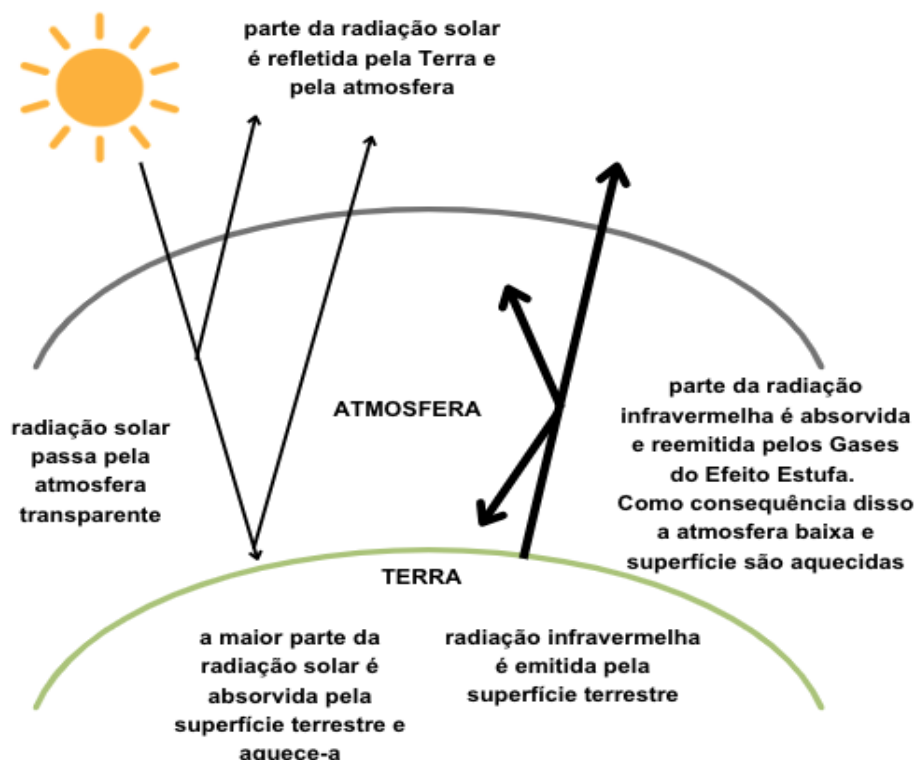


FIGURA 1 – Efeito Estufa
FONTE: IPCC (1992)

3.2 FONTES EMISSORAS DE GEE

Os GEE são provenientes de diversas fontes, incluindo processos naturais e atividades humanas. A identificação e a quantificação dessas fontes é de extrema importância para entender a realidade acerca do aquecimento global. A publicação pioneira de Rudd et al. (1993) iniciou o questionamento sobre se os reservatórios hidrelétricos seriam fontes significativas de GEE, sugerindo emissões comparáveis às de termoelétricas convencionais por unidade de energia gerada.

Embora os reservatórios sejam muitas vezes considerados como fontes de energia "verde", "limpas" ou neutras em carbono, cada vez mais pesquisadores atestam seu papel como fontes de gases de efeito estufa. Reservatórios artificiais criados por barragens são diferentes dos sistemas naturais de diversas formas, que podem aumentar as emissões de GEE desses sistemas. A inundação de grandes estoques de matéria orgânica terrestre alimenta a decomposição microbiana, convertendo a matéria orgânica armazenada na biomassa presente no substrato em CO_2 , CH_4 e N_2O . Previamente à construção de barragens muita atenção foi dada aos efeitos negativos sobre os peixes e biota ribeirinha de maneira geral, mas os efeitos indiretos sobre os

ciclos bioquímicos também são importantes e devem ser considerados (DEEMER et al., 2016).

3.2.1 Emissões em reservatórios

A construção de reservatórios, ecossistemas artificiais criados pelo barramento de rios, altera abruptamente a hidrodinâmica da região transformando ambientes lóticos (de alta correnteza) em lênticos (de baixa correnteza). Cumulativamente, ocorre o tempo de retenção da água e como consequência, altera o fluxo de carbono presente na região, potencializando a emissão de gases do efeito estufa (CO_2 e CH_4) para a atmosfera. Os GEE são produzidos durante a decomposição da matéria orgânica presente nos sedimentos e solo inundado, sendo que a quantidade emitida está diretamente relacionada com a área inundada, decomposição que ocorre com maior intensidade durante os primeiros anos de alagamento (RUDD et al., 1993). Assim como nos sistemas naturais, esses gases podem ser emitidos por difusão na superfície do reservatório (CO_2 e CH_4), ebulição (despreendimento de bolhas do sedimento) no reservatório (principalmente para CH_4), difusão através de caules de plantas e desgaseificação a jusante do reservatório (principalmente CH_4) (TRANVIK et al., 2009).

Yang et al. (2014) revisaram as produções e emissões de GEE em reservatórios e as variáveis ambientais de influência. Para o CO_2 , constatou-se que as emissões difusivas são predominantes à montante da represa, as emissões de desgaseificação nas turbinas e vertedouros são responsáveis por até 16% do total de emissões da hidrelétrica, enquanto emissões à jusante correspondem entre 1,63% e 32% do total. Yang et al. (2014) ressaltam que para obter uma avaliação precisa das emissões é necessário contabilizar todas as fontes de emissão mencionadas, além de considerar os fatores ambientais que afetam esses valores, como o carbono orgânico presente na área inundada, a temperatura da água, a localização geográfica do reservatório, a idade do reservatório, o pH da água, a vegetação adjacente e a velocidade do vento. Para o CH_4 , Yang et al. (2014) destacam que as emissões são influenciadas pela temperatura, profundidade da água, nível da água, oxigênio dissolvido e carbono orgânico presente.

A Figura 2 mostra as alterações no ambiente causadas pela construção de um reservatório. Grosso modo, essencialmente todas as emissões de CH_4 podem ser atribuíveis à construção do reservatório. As principais vias de emissão de metano são difusivas na superfície do reservatório, ebulitivas e emissões de desgaseificação a jusante; todas moduladas em graus diferentes pela oxidação do metano (PRAIRIE; ALM et al., 2018).

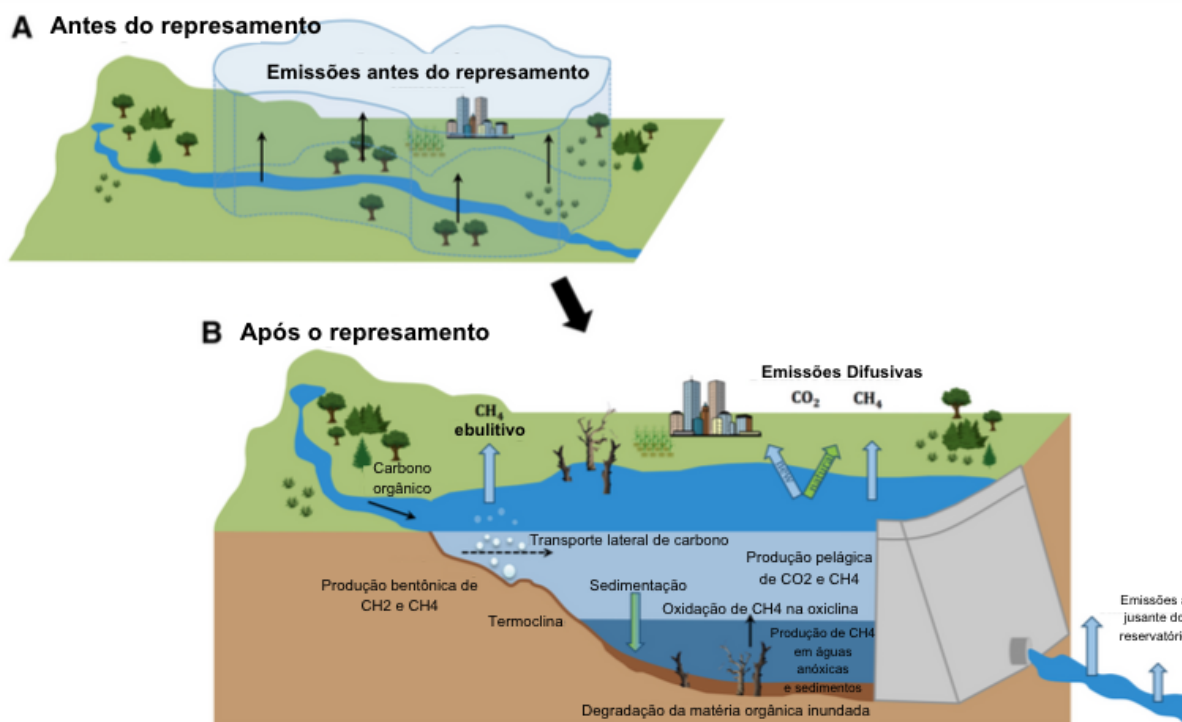


FIGURA 2 – Alterações no ambiente pela construção de um reservatório. A) Antes do represamento temos a área do futuro reservatório onde o balanço de GEE precisa ser contabilizado. B) Pós-represamento temos as novas condições e os múltiplos processos e caminhos para as emissões de CO_2 e CH_4 . As emissões naturais são representadas pelas setas verdes, enquanto a fração emitida pela decomposição do material orgânico inundado, que foi induzida pelo represamento é indicada pelas setas azuis.

FONTE: Adaptado Prairie, Alm et al. (2018).

Vale ressaltar que alguns reservatórios atuam como sumidouros de carbono, através da absorção de CO_2 presente na atmosfera. Bernardo et al. (2017) analisaram esse comportamento ao estudar o reservatório do Capivari, obtendo como resultado que a construção desse reservatório simultaneamente reduz a disponibilidade de carbono no entorno, causada pelo armazenamento de carbono em sedimentos, e emite GEE. A longo prazo, os reservatórios são benéficos para o ciclo global do carbono pois armazenam carbono; enquanto que a curto prazo, as emissões de metano podem ser mais significativas do que a captura de carbono (BERNARDO et al., 2017). Dean e Gorham (1998) estimaram que os reservatórios absorvem 2,5% das emissões antropogênicas de carbono globalmente. No entanto, estudos posteriores refutam essa estimativa ao considerar outros fatores importantes para esse cálculo, como, principalmente, a vida útil limitada da capacidade de capturar carbono dos reservatórios.

Parekh e Mccully (2004) estimaram que as emissões globais de carbono por reservatórios são 60% maiores do que a estimativa de sequestro de carbono inicialmente calculada por Dean e Gorham (1998). Com relação ao metano, estudos

estimam que os ecossistemas aquáticos contribuem, em média, com 53% das emissões globais totais de metano de origem antropogênica e fontes naturais. Ressaltando que as emissões aumentam de ecossistemas aquáticos naturais para impactados, essas que provavelmente aumentarão devido à urbanização, eutrofização e mudanças climáticas (ROSENTRETER et al., 2021). De acordo com o quinto relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2014a), o potencial de aquecimento global do metano é aproximadamente 28 vezes maior que o do gás carbônico em um horizonte de tempo de 100 anos. Considerando que as emissões de CH₄ de reservatórios são majoritariamente de natureza antrópicas, reduzir e remediar essas emissões é uma importante estratégia para mitigar o aquecimento global.

3.2.2 Fatores que influenciam a dimensão das emissões

Vários pesquisadores como Rudd et al. (1993), Rosa et al. (2003), Barros et al. (2011) e Johnson et al. (2021) têm conduzido estudos para analisar os fatores que influenciam as emissões de gases de efeito estufa GEE em reservatórios. Esses estudos fornecem uma visão mais aprofundada das características que podem influenciar as emissões de GEE em reservatórios e contribuem para o entendimento dos processos envolvidos nas interações entre a água, o solo e a atmosfera.

Por meio da análise das emissões de florestas e turfas no Canadá, Rudd et al. (1993) constataram que a taxa de emissão de metano e gás carbônico de um reservatório estão relacionados com sua idade. Este comportamento se dá devido à uma rápida decomposição dos tipos de matéria orgânica que degradam-se mais facilmente, como folhas, durante o período inicial. Após esse período, seguirá uma decomposição lenta da matéria orgânica com características refratárias, como galhos. A tabela 1 mostra que os fluxos naturais dos lagos são muito menores se comparados com reservatórios recém inundados, mas ainda são maiores do que os fluxos estimados para sistemas terrestres antes da inundação. Os fluxos de metano são convertidos para CO₂ equivalente para estimar a emissão líquida de GEE de cada ecossistema.

Área	CH ₄	CO ₂ equivalente	CO ₂	Emissão líquida
Florestas	0,002	0,12	0,0	0,0
Turfeiras	0,3 – 2,0	20 – 120	50 – 200	0,0
Lagos Oligotróficos	0,3 – 3,2	20 – 200	25 – 50	0 – 150
Reservatórios (estimados)	3,9 – 7,7	230 – 460	190 – 200	430 – 690

TABELA 1 – Fluxos estimados de CH₄ e CO₂ entre a atmosfera e superfície das áreas estudadas, todas as estimativas estão em $gm^{-2}ano^{-1}$.

FONTE: Adaptado Rudd et al. (1993).

A relação entre a taxa de emissão de CO₂ e CH₄ e a idade de um reservatório,

também foi constatada por Rosa et al. (2003) por meio da comparação de dados de medição das emissões de reservatórios na Amazônia, em diferentes períodos. Rosa et al. (2003) validaram a hipótese de que a origem primária (das emissões) é a decomposição da biomassa já existente na área inundada antes da barragem e, secundariamente, da decomposição da biomassa da matéria orgânica em suspensão na água; visto que a taxa de emissão diminuiu com o aumento da idade do reservatório, como mostrado na figura 3. Considerando como exemplo os reservatórios de Samuel e Tucuruí, os dados de medição indicam o fluxo total de CH_4 (fluxo difusivo adicionado do fluxo ebulitivo) em junho em 1998 e a comparação com dados coletados no ano seguinte.

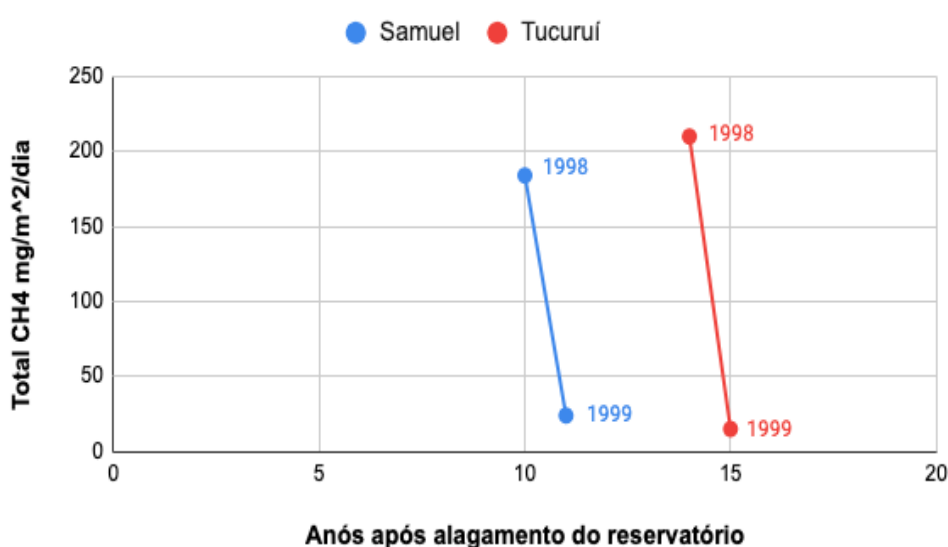


FIGURA 3 – Emissões totais de metano em $mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ de reservatórios da Amazônia. Para o reservatório de Samuel o valor é de $184 mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ para a primeira medida, caindo para $24 mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ no ano seguinte. Para o reservatório do Tucuruí o primeiro dado de medição indica emissão de $210 mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$, e $15 mgCH_4m^{-2}dia^{-1}$ para um ano depois.

FONTE: Rosa et al. (2003).

É possível relacionar o fluxo de emissões com fatores geográficos, como a latitude na qual o reservatório está alocado. Por meio da avaliação das emissões de CH_4 e CO_2 de 85 reservatórios de usinas hidrelétricas distribuídas globalmente, Barros et al. (2011) testaram empiricamente a hipótese de que as taxas de emissões estariam correlacionadas com a latitude, sendo maiores perto dos trópicos e menores em altas latitudes. Concluíram que as emissões futuras serão altamente dependentes da localização geográfica de novos reservatórios hidrelétricos. Conforme sintetizado na figura 4.

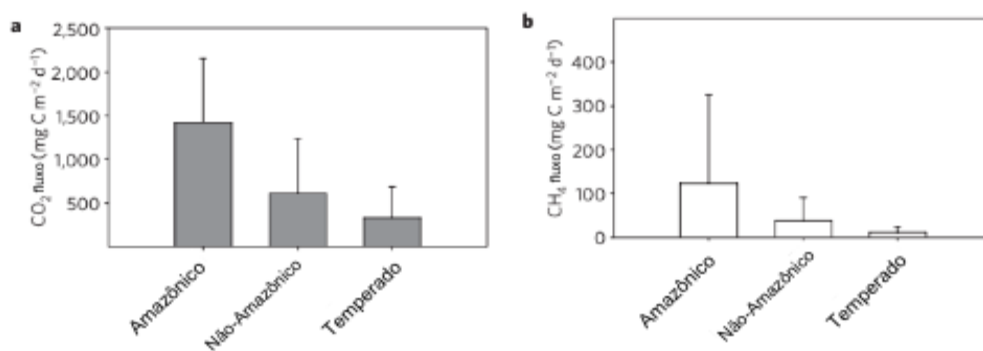


FIGURA 4 – Fluxos de CO₂ e CH₄ em diferentes zonas. As médias (barras) e desvio padrão (linhas) dos fluxos de **a**) CO₂ e **b**) CH₄ dos reservatórios hidrelétricos analisados e agrupados por região. Na qual a região tropical foi dividida em regiões amazônica e não amazônica, uma vez que temos as maiores taxas de emissão na região tropical amazônica.

FONTE: Adaptado Barros et al. (2011).

Analisando padrões de emissão espaço-temporal de metano, considerando as influências da variabilidade diurna, sazonalidade dependente da temperatura, dinâmica derivada do degelo e zona ecoclimática, Johnson et al. (2021) constataram que os reservatórios cobrem uma área terrestre de $29710^3 km^2$ globalmente e emitem $10,1 TgCH_4 ano^{-1}$. Considerando latitude e temperatura da região, o estudo divide os reservatórios nas zonas eco-climáticas boreal, temperada e tropical, conforme figura 5. A zona boreal corresponde a 4% das emissões totais, tendo reservatórios localizados em latitudes altas (>50°N). Reservatórios na zona temperada estão nos Estados Unidos, Europa e China, contribuindo com 48% das emissões totais. Em contraste com o que ocorre em latitudes mais altas, nas latitudes baixas tem-se, também, 48% das emissões correspondendo à zona tropical.

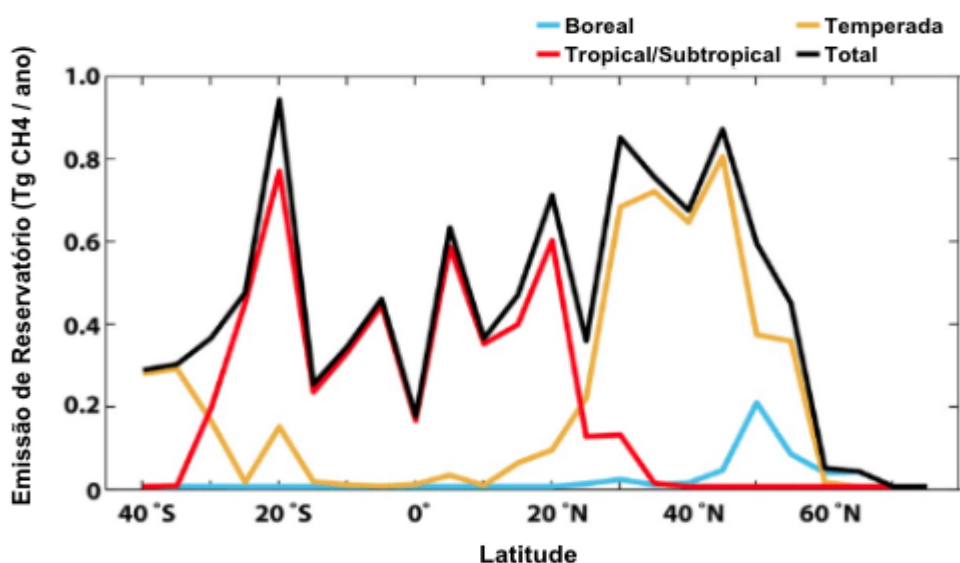


FIGURA 5 – Emissões de metano por latitude, destacando diferentes zonas eco-climáticas. FONTE: Adaptado Johnson et al. (2021).

Além dos fatores mencionados, Lauerwald et al. (2023) destacam a influência do tamanho do corpo d'água, média anual de precipitação, produtividade primária do ecossistema, temperatura e presença de nutrientes na magnitude das emissões.

3.3 ECORREGIÕES

Olson et al. (2001) propuseram a subdivisão dos biomas terrestres em ecorregiões com características semelhantes, refletindo uma ampla gama de fauna e flora em todo o mundo. Por meio da elaboração de um mapa é possível estudar com maior especificidade as características de áreas de biodiversidade excepcional e comunidades representativas. Definindo ecorregião como unidades relativamente grandes terrestres (com cerca de 150.000 km^2) contendo um conjunto distinto de comunidades e espécies naturais, com fronteiras que se aproximam da extensão original da natureza antes de grandes mudanças no uso da terra.

Olson et al. (2001) classificaram 867 ecorregiões (Figura 6), destacando um aumento de quatro vezes sobre as classificações anteriormente propostas por Dasmann (1974), das 198 províncias bióticas, e Udvardy (1975), das 193 unidades. Essa categorização foi feita a partir da subdivisão do mundo terrestre em 14 biomas e oito domínios biogeográficos, conforme a tabela 2.

Domínio biogeográfico	Localização
Neártico	Abrange a América do Norte, exceto o norte do México
Neotropical	Inclui a América Central, América do Sul e o sul do México
Paleártica	Compreende a Eurásia, incluindo a Europa, Ásia Central e partes do Oriente Médio
Etiópica	Engloba a África subsaariana, incluindo Madagascar
Australiana	Abrange a Austrália, Nova Zelândia, Papua-Nova Guiné e ilhas adjacentes do Pacífico
Indomaláia	Inclui o subcontinente indiano, sudeste asiático e partes da China
Oceânica	Compreende as ilhas do Pacífico Central e suas bordas
Antártica	Abrange a Antártida e as ilhas subantárticas.

TABELA 2 – Domínios biogeográficos conforme (OLSON et al., 2001)

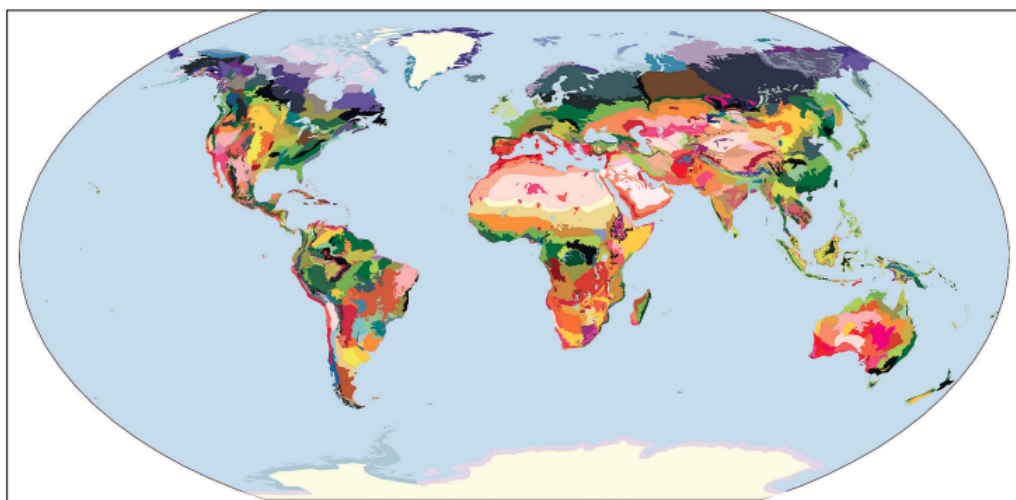


FIGURA 6 – Ecorregiões definidas em 2001.
FONTE: Olson et al. (2001).

Uma pesquisa de Dinerstein et al. (2017) dedicou-se a investigar novamente o tema, motivado pela crise de extinção de espécies e conservação do patrimônio ecológico para as gerações futuras. Dinerstein et al. (2017) ressaltam a importância do mapa de Olson et al. (2001), que serviu como uma ferramenta fundamental para o planejamento de redes de áreas protegidas, bem como para representar as distribuições de espécies, modelar os impactos das mudanças climáticas, desenvolver planos de conservação em escala de paisagem e acompanhar o progresso em relação às metas internacionais. O mapa atualizado, intitulado *Ecoregions2017@Resolve*, possui grande parte das regiões biogeográficas inalteradas, enquanto quatro delas apresentam diferenças significativas: Península Arábica, algumas ecorregiões áridas e semiáridas da África, Antártida e sudeste dos Estados Unidos.

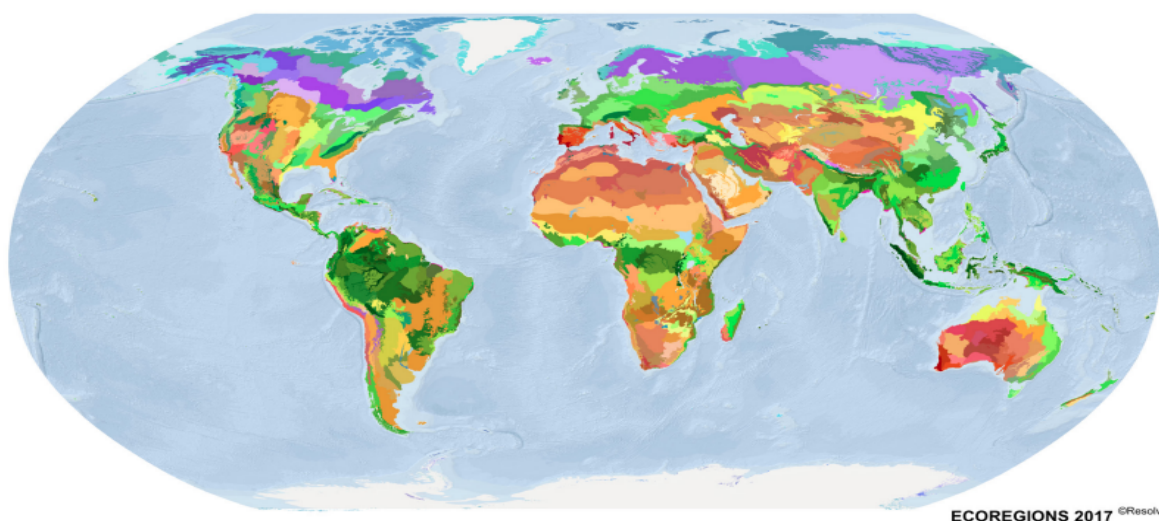


FIGURA 7 – Ecorregiões definidas em 2017
FONTE: Dinerstein et al. (2017)

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do presente estudo foi necessária a busca por materiais de pesquisa que continham dados de medição de emissões de gases GEE por reservatórios e, além disso, estudos específicos sobre a definição e caracterização de ecorregiões. Foram realizadas pesquisas nas bases de dados Web of Science, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Google Scholar. Além disso, foi realizada a consulta de informações oficiais de organizações intergovernamentais, como o IPCC. Para a realização da pesquisa nas bases de dados citadas, foram utilizadas palavras-chave como: emissões, gases do efeito estufa, metano, reservatórios, gás carbônico, gás carbônico equivalente, biomas e ecorregião.

Os temas abordados, emissões de GEE por reservatórios e ecorregiões, foram pesquisados separadamente. Ler e selecionar os artigos mais relevantes desempenhou um papel crucial no desenvolvimento deste trabalho, dada a vasta quantidade de literatura disponível sobre os temas. Foi dada preferência para artigos que continham base de dados de medições de gases GEE por reservatórios, que melhor se alinhavam aos objetivos e questões da pesquisa. A precisão desse processo permitiu não apenas identificar os estudos mais pertinentes, mas também a junção das medições já existentes na literatura, através da elaboração de uma nova base de dados a partir dos dados apresentados nos artigos selecionados.

Por fim, foram selecionados três artigos referenciando bases de dados de medições de GEE em reservatórios, em diversas localidades, e um artigo com especificações das ecorregiões. Vale ressaltar que não foi estabelecida nenhuma delimitação geográfica e/ou temporal para as referências citadas, o escopo deste trabalho é mundial e para qualquer data de medição de fluxo encontrada na literatura.

4.1 COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS DE EMISSÕES

4.1.1 Emissões de gases GEE

Tendo como objetivo maximizar a quantidade de dados obtidos em estudos prévios, foi elaborada uma nova base de dados a partir da coleta de dados de emissões, retiradas dos seguintes artigos selecionados:

- **Base A:** Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. (ROSENTERTER et al., 2021)
- **Base B:** A new modeling framework to assess biogenic GHG emissions from reservoirs: The G-res tool. (PRAIRIE; MERCIER-BLAIS et al., 2021)

- **Base C:** Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. (DEEMER et al., 2016)

Após análise de quais medições eram comuns para todas as bases, optou-se por utilizar os dados de fluxo de metano (CH₄), tanto ebulitivo quanto difusivo, e gás carbônico difusivo (CO₂).

4.1.2 Procedimento de processamento

Os artigos citados, (ROSENTRETER et al., 2021), (PRAIRIE; MERCIER-BLAIS et al., 2021) e (DEEMER et al., 2016), trazem bases de dados de diferentes dimensões e características. Portanto, foi necessária uma etapa de padronização dos dados de cada base previamente à constituição da nova base de dados integrada. Nessa etapa foi realizada a conversão das medidas para adequar as unidades das medições, e também foi realizado o cálculo de média das emissões, quando necessário. Quando a base de dados continha diferentes valores de medição para um mesmo reservatório, foi calculada a média aritmética para obter um único valor de emissão de determinada espécie química para cada reservatório. Este valor passou a ser interpretado como o valor médio do reservatório, procedimento similar foi adotado por Deemer et al. (2016), padronizando o tratamento das informações na construção de uma base conjunta. As características e medidas para adequação de cada base são descritas individualmente a seguir.

- **Base A:** Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. (ROSENTRETER et al., 2021)

Constituída de 86 registros com valores únicos de medições em reservatórios, ou seja, para essa base de dados não foi necessária a realização de nenhum cálculo adicional. Os registros estão distribuídos conforme a tabela 3.

Fluxo	Quantidade	Porcentagem Correspondente
Metano Difusivo	67	77,9%
Metano Ebulitivo	55	63,9%
Gás Carbônico Difusivo	0	0,0%

TABELA 3 – Distribuição de dados (Base A). As medições de fluxo de metano estão apresentadas em miligramas de metano por metro quadrado por dia ($mgCH_4m^{-2}d^{-1}$).

- **Base B:** A new modeling framework to assess biogenic GHG emissions from reservoirs: The G-res tool. (PRAIRIE; MERCIER-BLAIS et al., 2021)

Continha inicialmente 356 registros de dados, dos quais 135 eram duplicados, ou seja, existiam diferentes medidas do mesmo fluxo para um mesmo reservatório. No caso de ter-se dois ou mais valores de fluxo para determinado reservatório,

foi realizada a média destes valores afim de possuir somente dados únicos. Após esse procedimento obteve-se medidas de 221 reservatórios distintos, distribuídos de acordo com a tabela 4.

Fluxo	Quantidade	Porcentagem Correspondente
Metano Difusivo	198	89,6%
Metano Ebulitivo	62	28,0%
Gás Carbônico Difusivo	117	52,9%

TABELA 4 – Distribuição de dados (Base B)

Nesse caso, as informações de fluxo de metano foram apresentadas em miligramas de carbono por metro quadrado por dia ($mgCm^{-2}d^{-1}$). Como deseja-se comparar os dados comuns entre as bases citadas, foi necessária a conversão de medidas para a mesma unidade. Diante disso, optou-se por converter as medidas de fluxo de metano para miligramas de metano por metro quadrado por dia ($mgCH_4m^{-2}d^{-1}$), por meio da formulação

$$mgCH_4 = mgC \times \frac{16.04}{12.01}, \quad (4.1)$$

onde o valor do numerador corresponde à massa molar do metano e do denominador à massa molar do carbono.

- **Base C:** Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. (DEEMER et al., 2016)

Dispõe dados de emissão únicos de 267 reservatórios distintos, assim como na base A, não foi necessário o cálculo de média aritmética. Os dados estão distribuídos conforme:

Fluxo	Quantidade	Porcentagem Correspondente
Metano Difusivo	141	52,8%
Metano Ebulitivo	52	19,5%
Gás Carbônico Difusivo	229	85,8%

TABELA 5 – Distribuição de dados (Base C)

Para esta base, os dados também foram apresentados na unidade $mgCm^{-2}d^{-1}$, portanto realizou-se o mesmo procedimento de conversão de unidades descrito previamente para a base B, por meio da aplicação da equação (4.1).

4.2 ECORREGIÕES

Dinerstein et al. (2017) oferecem um arquivo *.shp que contém o mapeamento das 846 ecorregiões terrestres dispostas em todo o mundo, além de arquivo mapeando

os biomas terrestres. O mapa *Ecoregions2017@Resolve* é uma revisão do mapa terrestre de ecorregiões abordado na seção anterior e mostrado na figura 6, trata-se da versão mais recente da classificação de ecorregiões terrestres, mostrado na figura 7. Esse arquivo foi essencial para o desenvolvimento deste estudo pois, a partir dele, e dos dados geográficos de latitude e longitude de cada reservatório, foi possível alocar os reservatórios na sua ecorregião correspondente.

4.3 INTEGRAÇÃO DAS BASES DE DADOS

Para a compilação dos dados, visando a elaboração de uma nova base de dados, os dados coletados e padronizados seguindo os procedimentos descritos na seção 4.2 foram compilados e agrupados de acordo com os seguintes critérios:

1. Para a base de dados foram consideradas todas as medições de fluxo com valores encontrados na literatura, inclusive medições igual a zero; para a elaboração dos gráficos essas medidas foram desconsideradas. Células nulas e vazias foram interpretadas como a ausência de medição.
2. Quando havia somente uma medição para determinado reservatório, esse era o valor considerado. No caso de termos medições em diferentes bases para um mesmo reservatório, realizou-se cálculo de média aritmética entre esses valores para obter um único dado representativo.

Após esses procedimentos obteve-se uma nova base de dados, que foi utilizada para desenvolvimento desse trabalho, com dados distribuídos conforme a tabela 6.

Fluxo	Quantidade
Metano Ebulitivo	191
Metano Difusivo	64
Gás Carbônico Difusivo	285

TABELA 6 – Distribuição de dados da base de dados consolidada

Por fim, foi possível constituir uma base de dados com medidas únicas de fluxo de determinado GEE para 339 reservatórios distintos, localizados ao redor do mundo.

4.4 CÁLCULO DE GÁS CARBÔNICO EQUIVALENTE

Para o cálculo de gás carbônico equivalente utilizou-se como base o quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2014b). De acordo com o relatório, o GWP do metano varia dependendo do período de tempo considerado, para o período de 20 anos (GWP20), o GWP do metano foi estimado em torno de 84-87 vezes o GWP do CO₂. Isso significa que, em um período de 20 anos, o metano tem um potencial de

aquecimento global muito mais alto em comparação com o CO_2 . No entanto, para o período de 100 anos (GWP100), o GWP do metano é geralmente estimado em torno de 28-36 vezes o GWP do CO_2 . Logo, o valor adotado para a realização dos cálculos foi de $GPW = 28$, sendo realizados conforme:

$$CO_{2Equivalente} = CH_4 \times GWP_{CH_4} \quad (4.2)$$

$$CO_{2Equivalente} = CH_4 \times 28 \quad (4.3)$$

Após calculadas as emissões totais de metano (emissão de metano ebulitivo + metano difusivo) para cada reservatório, o resultado foi convertido para gás carbônico equivalente e, então, somado às emissões de gás carbônico. Tendo por produto final um valor total de emissão, em gás carbônico equivalente, para cada ponto de interesse. O cálculo descrito foi consolidado para fórmula:

$$Total = 28 \times (CH_{4Difusivo} + CH_{4Ebulitivo}) + CO_2 \quad (4.4)$$

4.5 ELABORAÇÃO DE MAPAS

Os mapas foram elaborados separadamente para cada fluxo, os arquivos *.shp disponibilizados no artigo de Dinerstein et al. (2017) foram fundamentais para o desenvolvimento dessa etapa. Por meio do Software QGIS, uma plataforma de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), foi incluída, para cada mapa, uma camada geográfica por associação. O mapa inicial era sempre o arquivo de ecorregiões ou biomas, enquanto a camada adicional fazia referência às medições de fluxo encontradas na literatura, com pontos representando os reservatórios de interesse. Como as bases de dados continham informações de localização dos reservatórios, latitude e longitude, essa integração permitiu a visualização espacial precisa da distribuição desses recursos em relação aos diferentes biomas e ecorregiões existentes.

Para cada fluxo elaborou-se um mapa seguindo os critérios descritos anteriormente; reservatórios que não apresentavam medidas para determinado fluxo não eram representados no mapa deste fluxo em questão. Ao final, elaborou-se seis mapas distintos, nos quais a representação visual eficaz dos dados facilita a exploração das relações entre a dimensão das emissões e o bioma/ecorregião circundante.

Ademais, essa etapa foi fundamental para a elaboração dos gráficos subsequentes. Através desta representação visual, resultado da junção dos dois arquivos por localização, a exportação dos atributos desses mapas foi o que permitiu o mapeamento do bioma e ecorregião correspondente à cada reservatório.

4.6 ELABORAÇÃO DE GRÁFICOS

Os gráficos apresentados na seguinte seção foram elaborados com o auxílio de uma combinação de ferramentas de análise e visualização de dados. O processo de elaboração dos gráficos iniciou-se com o upload da nova base de dados desenvolvida em arquivo tipo *.csv no Google Collaboratory, fazendo o uso de linguagem de programação Python. Como ressaltado na seção anterior, tem-se uma quantidade diferente de dados para cada medida de fluxo escolhida (metano ebulitivo, metano difusivo e gás carbônico difusivo). Portanto, a biblioteca Pandas foi fundamental na manipulação dos dados, permitindo organizar e preparar os conjuntos de dados separadamente e de maneira eficiente. Para cada um dos fluxos mencionados, foi determinada a quantidade de medidas e calculadas as médias para cada bioma, os valores mínimo e máximo, além da determinação da faixa de latitude na qual os dados foram medidos.

Para a criação dos gráficos em si, foram utilizadas as bibliotecas Seaborn e Matplotlib. A utilização dessas ferramentas combinadas possibilitou a representação visual clara e informativa dos dados, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada dos resultados dessa pesquisa.

4.7 TESTE DE MANN-WHITNEY

O teste de Mann-Whitney foi empregado como uma ferramenta para comparar estatisticamente duas amostras de dados. Este teste não paramétrico é útil quando lidamos com dados que não seguem uma distribuição normal (MACFARLAND; YATES, 2016), o que é o caso para os dados de emissões medidos para cada bioma deste estudo. A escolha pelo uso do teste de Mann-Whitney é motivada pela sua capacidade de detectar diferenças significativas entre amostras.

Para a realização do teste de Mann-Whitney, as amostras são independentes e não seguem distribuição normal. O teste foi aplicado para determinar se há evidências estatísticas de que as duas amostras possuem distribuições diferentes. O valor p associado foi utilizado para avaliar a similaridade estatística das amostras selecionadas. Caso determinado um valor $p < 0,05$ rejeita-se a hipótese nula, ou seja, há evidências de diferença entre as amostras. Quando $p \geq 0,05$ não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, então as amostras são estatisticamente semelhantes.

Esse procedimento estatístico é fundamental para a análise rigorosa dos dados coletados, fornecendo embasamento matemático para a interpretação dos resultados obtidos na pesquisa. Essa análise também foi realizada por meio de programação em linguagem Python.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta as principais descobertas e observações decorrentes da análise de dados e investigações realizadas, destacando e interpretando os resultados obtidos a partir dos gráficos e mapas elaborados para cada medida de emissão. O capítulo divide-se em três seções, na primeira será apresentado um mapa com a distribuição geográfica dos dados de medição, sem distinção dos gases emitidos e/ou magnitude das emissões de cada reservatório, na segunda será realizada uma análise aprofundada das características de emissão de cada gás do efeito estufa para cada reservatório agrupados por bioma, enquanto a terceira trará uma análise estatística dos dados.

Assim, a seção magnitude das emissões foi dividida em quatro subseções, onde para cada uma delas serão apresentados um mapa da magnitude e distribuição geográfica das emissões, um gráfico boxplot com a distribuição dos dados obtidos para cada bioma, além de uma tabela que consolida todas as informações relevantes; como a quantidade de medições, média, valores máximo e mínimo e faixa de latitude das medições realizadas, também agrupadas por bioma.

5.1 DISTRIBUIÇÕES DOS DADOS DE MEDIÇÃO

Considerando o objetivo de relacionar as emissões de gases GEE com as ecorregiões em que os reservatórios estão alocados, foi elaborado um mapa permitindo a visualização e análise dos dados espaciais. Os pontos em destaque foram adicionados para qualquer reservatório no qual possui-se dado de alguma medição de interesse encontrado na literatura (figura 8). Essa etapa permitiu a identificação precisa das coordenadas geográficas dos pontos de interesse dentro da área de estudo, auxiliando na análise espacial e na correlação com outras variáveis do estudo.

O mapa *Ecoregions2017@Resolve* divide o planeta em 15 biomas e 846 ecorregiões. A base de dados consolidada traz medidas de emissão alocadas em 12 dos biomas e 94 ecorregiões distintas. Nota-se que a maior parte dos pontos estão alocados no hemisfério Norte do planeta, sendo os biomas e ecorregiões da região norte contendo dados mais representativos quanto à quantidade de medida de emissões.

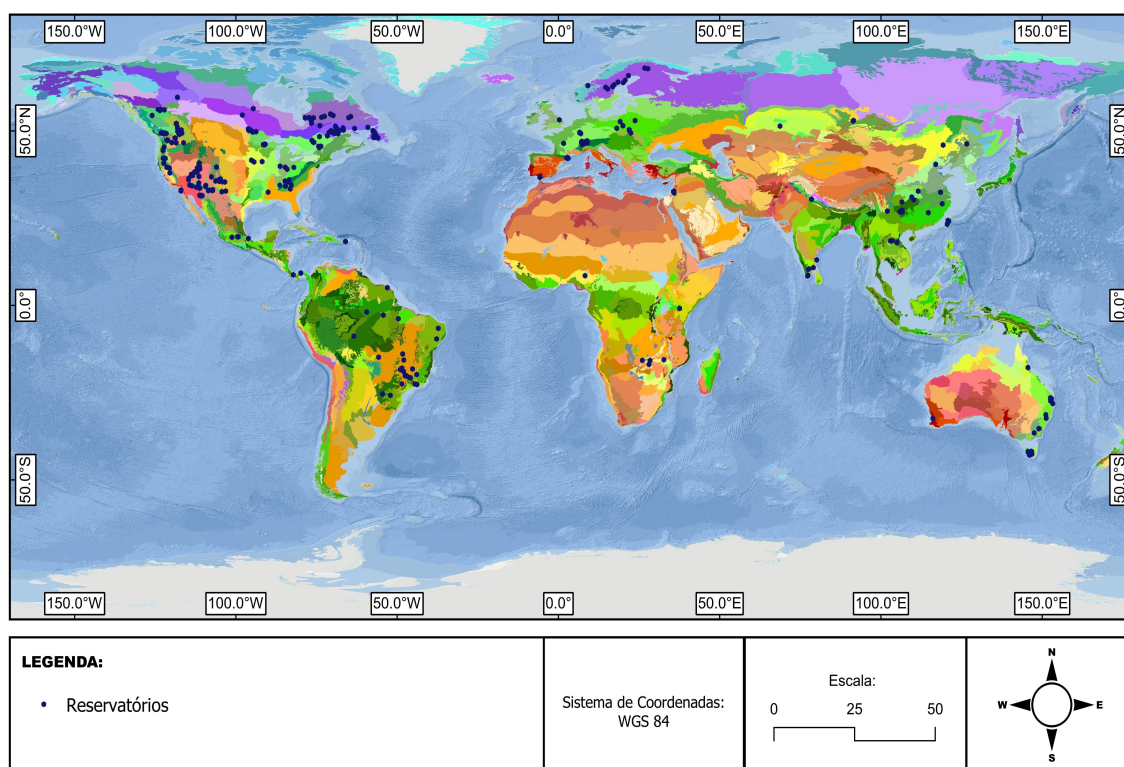


FIGURA 8 – Distribuição geográfica mundial dos dados coletados. Cada ponto representa um reservatório que possui alguma medida de emissão de gás do efeito estufa de interesse para este estudo. As cores representam as ecorregiões em que se encontram os reservatórios conforme bases de dados elaborada.

Conforme mencionado, são mais de oitocentas ecorregiões definidas pelo mapa, o que dificulta a análise, uma vez que a pequena quantidade de dados, ou ainda, para a maioria das ecorregiões a ausência deles, pode restringir a obtenção de resultados significativos e confiáveis. Nessa situação, consolidar ou agrupar os dados em conjuntos maiores se torna uma abordagem mais eficaz. Portanto, as análises seguintes serão realizadas por bioma.

O mapa apresentado na figura 9, traz a mesma análise espacial dos reservatórios de interesse mostrada anteriormente na figura 8. Com a diferença de que neste mapa, é apresentada a distribuição geográfica dos reservatórios de forma segmentada por bioma. A representação cartográfica destaca a localização dos reservatórios em diferentes biomas, permitindo uma análise visual das áreas e regiões onde essas estruturas se encontram.

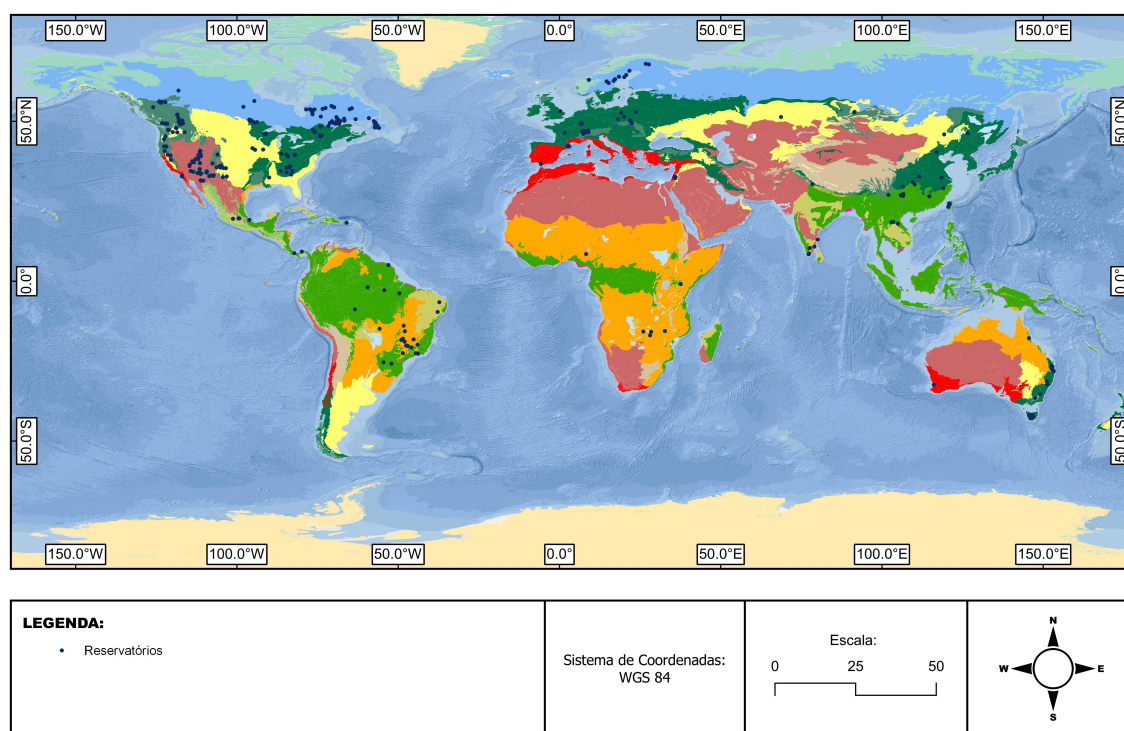


FIGURA 9 – Distribuição geográfica mundial dos dados coletados. Cada ponto representa um reservatório que possui alguma medida de emissão de gás do efeito estufa de interesse para este estudo. As cores representam os biomas em que se encontram os reservatórios conforme bases de dados elaborada.

Essa consolidação não apenas amplia o tamanho das amostras, mas também ajuda a identificar padrões e tendências que podem não ser evidentes quando se observa cada ecorregião isoladamente. Dessa forma, a abordagem de análise por bioma se mostra crucial para uma análise de dados mais completa e significativa. A tabela 7 mostra quais ecorregiões são pertencentes à cada bioma, considerando as ecorregiões presentes na amostra de dados utilizada. Além de apresentar a quantidade de reservatórios que contém qualquer medida de emissão para cada ecorregião.

Bioma	Ecorregião	Reservatórios
Florestas Boreais/Taiga	Florestas do Canadá Oriental	34
	Taiga do Escudo Canadense Oriental	13
	Taiga Escandinava e Russa	10
	Florestas do Escudo Canadense do Meio-Oeste	3
	Florestas do Escudo Canadense Central	1
	Taiga de Muskwa-Slave Lake	1

Bioma	Ecorregião	Reservatórios
	Taiga do Sul da Baía de Hudson	1
Tundra	Florestas de Bétulas de Montanha Escandinavas	1
Florestas Temperadas de Coníferas	Florestas de Coníferas dos Rockies do Norte	12
	Florestas de Coníferas e Mistas dos Alpes	12
	Florestas Montanas de Wasatch e Uinta	8
	Florestas Costeiras de Coníferas da Colúmbia Britânica	4
	Florestas das Montanhas do Arizona	4
	Florestas de Coníferas das Cascades do Norte	4
	Florestas de Montanhas do Centro da Colúmbia Britânica	4
	Florestas das Montanhas Rochosas do Colorado	3
	Florestas das Cascades Central-Sul	2
	Florestas das Cascades Orientais	2
	Florestas de Klamath-Siskiyou	2
	Florestas Montanas de Coníferas de Sayan	2
	Florestas da Serra Nevada	1
	Florestas das Terras Baixas de Puget	1
	Florestas de Coníferas do Planalto e Bacia de Fraser	1
	Florestas Montanas dos Cárpatos	1
Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas	Florestas dos Grandes Lagos do Oeste	17
	Florestas Temperadas do Leste da Austrália	10
	Florestas de Folhas Largas do Oeste da Europa	9
	Florestas do Planalto Central da Tasmânia	8
	Florestas Tropicais da Tasmânia	7
	Florestas Mistas da Europa Central	6

Bioma	Ecorregião	Reservatórios
	Transição Florestal-Boreal do Leste do Canadá	4
	Florestas das Terras Baixas dos Grandes Lagos Orientais	3
	Florestas do Planalto dos Apalaches	3
	Florestas dos Apalaches e Blue Ridge	3
	Florestas dos Grandes Lagos do Sul	3
	Florestas Mesofíticas Mistas dos Apalaches	2
	Florestas Perenes da Planície de Changjiang	2
	Florestas Perenes das Montanhas de Daba	2
	Florestas de Folhas Largas Célticas	1
	Florestas Decíduas da Planície do Nordeste da China	1
	Florestas Decíduas das Montanhas de Qin Ling	1
	Florestas Mistas do Planalto de Loess da China Central	1
	Florestas Temperadas da Tasmânia	1
Pradarias, Savanas e Arbustos Temperados	Pradaria de Gramíneas Curtas do Oeste	6
	Pradaria de Palouse	4
	Pradaria de Gramíneas Altas Central	3
	Estepes da Mongólia-Manchúria	1
	Estepes do Cazaquistão	1
	Savanas de Coníferas do Sudeste dos EUA	1
Florestas Mediterrâneas, Bosques e Matagais	Florestas Mediterrâneas do Nordeste da Espanha e Sul da França	4
	Arbustos Costeiros e Chaparral da Califórnia	3
	Chaparral e Bosques do Interior da Califórnia	2
	Florestas Mediterrâneas Esclerófilas e Mistas do Sudoeste Ibérico	2
	Bosques do Sudoeste da Austrália	1

Bioma	Ecorregião	Reservatórios
	Florestas de Coníferas e Folhas Largas do Mediterrâneo Oriental	1
Desertos e Arbustos Xéricos	Arbustos do Planalto do Colorado	9
	Deserto de Sonora	9
	Estepe de Arbustos da Grande Bacia	8
	Deserto de Chihuahua	7
	Deserto de Mojave	3
	Arbustos do Deserto Mar Vermelho-Arábico	2
	Florestas de Arbustos Espinhosos do Decã	1
Florestas Tropicais e Subtropicais de Coníferas	Florestas de Pinheiros e Carvalhos do Cinturão Vulcânico Trans-Mexicano	3
	Florestas de Pinheiros Subtropicais do Himalaia	1
Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas	Caatinga	2
	Florestas Decíduas Secas do Planalto do Sul do Decã	1
	Florestas Secas de Veracruz	1
	Florestas Secas Sempre-Verdes do Leste do Decã	1
Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas	Florestas Atlânticas do Alto Paraná	5
	Florestas de Folhas Largas e Mistas do Planalto de Guizhou	5
	Florestas Sempre-Verdes Subtropicais de Taiwan	3
	Florestas Costeiras da Serra do Mar	2
	Florestas Decíduas Úmidas do Sudoeste dos Ghats	2
	Florestas Tropicais de Montanha de Luang Prabang	2
	Florestas Úmidas do Istmo-Atlântico	2

Bioma	Ecorregião	Reservatórios
	Florestas Sempre-Verdes Subtropicais de Jian Nan	1
	Florestas Sempre-Verdes Subtropicais do Planalto de Yunnan	1
	Florestas Tropicais de Chuva do Queensland	1
	Florestas Tropicais de Montanha do Norte de Annam	1
	Florestas Úmidas da Costa de Malabar	1
	Florestas Úmidas de Araucária	1
	Florestas Úmidas de Madeira-Tapajós	1
	Florestas Úmidas de Porto Rico	1
	Florestas Úmidas de Tapajós-Xingu	1
	Florestas Úmidas de Terras Baixas Guianenses	1
	Florestas Úmidas de Tocantins/Pindaré	1
	Florestas Úmidas de Uatumã-Trombetas	1
	Florestas Úmidas do Istmo-Pacífico	1
Pradarias e Savanas Inundadas	Pradarias Inundadas Zambezianas	1
Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais	Cerrado	11
	Matas de Mopane Zambezianas	2
	Arbustos e Cerrados do Norte de Acácia-Commiphora	1
	Floresta-Savana da Guiné	1
	Matas Secas de Miombo	1

TABELA 7 – Distribuição dos Biomas Terrestres e Ecorregiões Correspondentes. Nesta tabela, são apresentados os doze biomas terrestres presentes na amostra de dados, suas ecorregiões associadas e a contagem de medidas coletadas para cada ecorregião. A tabela fornece uma visão abrangente da distribuição geográfica dos biomas e ajuda a entender a distribuição e representatividade dos dados de medidas coletadas em diferentes ecorregiões.

5.2 MAGNITUDE DAS EMISSÕES

Esta seção destina-se à análise da magnitude de emissão dos Gases de Efeito Estufa pelos reservatórios. Ao longo das próximas subseções, cada GEE será submetido a uma análise específica, destacando suas tendências, variações e relações com diferentes fatores. É importante observar que, devido à similaridade dos métodos e abordagens utilizados em todas as análises, parte das informações fornecidas nesta seção será comum a todos os GEE em estudo.

Essa abordagem é necessária para estabelecer um contexto unificado e garantir a consistência da análise. Embora a repetição possa parecer redundante, é fundamental para assegurar a compreensão adequada das análises específicas de cada GEE e fornecer uma base sólida para as conclusões a serem observadas. Portanto, prossegue-se com as análises individuais de cada GEE nas subseções subsequentes, onde os resultados específicos e as particularidades de cada gás serão abordados em detalhes. Em cada subseção foi feita uma análise sistemática com auxílio de mapas, gráficos boxplot e tabelas.

Para cada um dos gráficos, as linhas horizontais dentro de cada boxplot representam a mediana dos valores, e os extremos do retângulo indicam o intervalo interquartil. A média de cada bioma é representada por um sinal de cruz (+), e os pontos cinzas individuais ao redor dos boxplots mostram os valores de emissão específicos de cada medida coletada. A figura oferece uma visualização abrangente das variações nas emissões de diferentes biomas, permitindo a compreensão das tendências e distribuições dos dados. Optou-se por ordená-los de acordo com a latitude máxima contida na amostra para determinado bioma. Essa abordagem permitiu que os gráficos fossem dispostos de forma sistemática, seguindo uma sequência geográfica de norte a sul. Ao adotar essa ordenação com base na latitude máxima, criou-se uma representação visual que acompanha a progressão geográfica, fornecendo uma visão coesa e intuitiva dos dados, o que facilita a análise das variações regionais e geográficas ao longo do conjunto de gráficos.

A tabela apresenta o número de medidas para cada bioma, a média das observações, bem como os valores máximos e mínimos registrados em cada bioma. A coluna "Latitude" indica o valor máximo e mínimo de latitude encontrados na amostra daquele bioma. No caso de existir somente um registro para determinado bioma, o valor único de latitude é o considerado e apresentado na tabela. Esses dados fornecem um resumo estatístico essencial para a análise das características dos biomas e a compreensão das tendências observadas.

Os mapas foram elaborados considerando não somente a localização dos pontos emissores, mas também a magnitude deles. Para todos os mapas, o diâmetro

da circunferência representa a magnitude das emissões, diâmetros maiores indicam uma maior magnitude de emissão, enquanto diâmetros menores denotam emissões de magnitude inferior. A cor de cada ponto também é um fator importante, visto que representa se essa emissão é positiva (circunferências azuis) ou negativa (circunferências vermelhas). A representação cartográfica das emissões de GEE permite uma análise visual das áreas de maior e menor contribuição para o efeito estufa, fornecendo insights para a compreensão das fontes e distribuição dessas emissões.

5.2.1 Fluxo de Metano Difusivo

Para emissões de metano difusivo, obteve-se 191 medidas distribuídas entre 11 biomas e 61 ecorregiões distintas. A magnitude de emissões está representada na figura 10, em que as emissões variam em ordem de grandeza de 10^{-2} a 10^4 . O valor mínimo medido foi de $0,04 \text{ mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ enquanto o máximo foi de $5247,30 \text{ mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, mostrando variação considerável no conjunto de dados coletados. Nota-se que a maioria dos pontos encontra-se na faixa de magnitude de $]1.0; 10.0]$, contando com 95 valores de emissão.

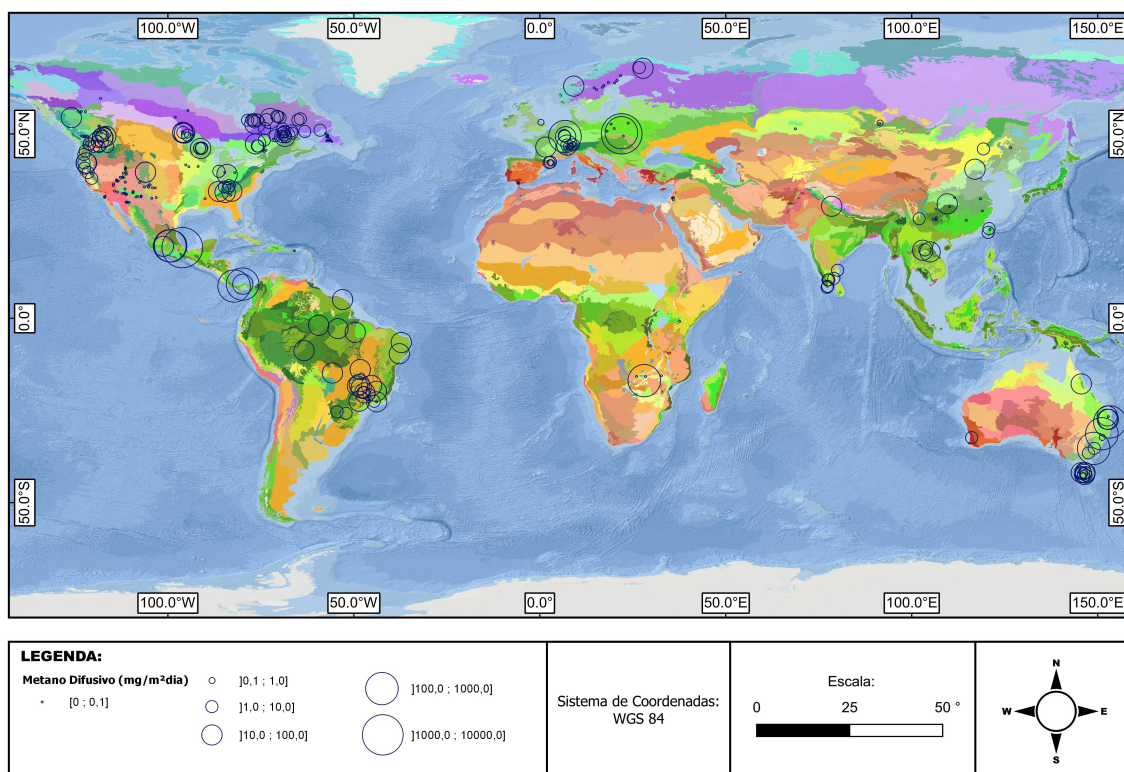


FIGURA 10 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Metano Difusivo. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano difusivo associadas à cada local.

A figura 11, permite observar uma tendência significativa relacionada à latitude.

Observa-se que com a diminuição da latitude máxima apresentada, ou seja, a medida que há uma movimentação em direção ao sul do planeta, os valores médios de emissão de metano difusivo tendem a aumentar.

Além disso, é importante ressaltar que certos biomas, como a Tundra e Desertos e Arbustos Xéricos, apresentam uma quantidade limitada de medidas, sendo representados por apenas uma observação cada. Por outro lado, o bioma Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas exibe o valor médio mais elevado, mas devido à sua reduzida quantidade de dados, é plausível supor que somente um valor de medição, neste caso o máximo da amostra, contribuiu de forma significativa para o aumento expressivo da média desse bioma como um todo. A partir do gráfico é possível notar a diferença, em ordem de grandeza, entre essa medida e a segunda maior da amostra, que encontra-se na magnitude de ordem 10.

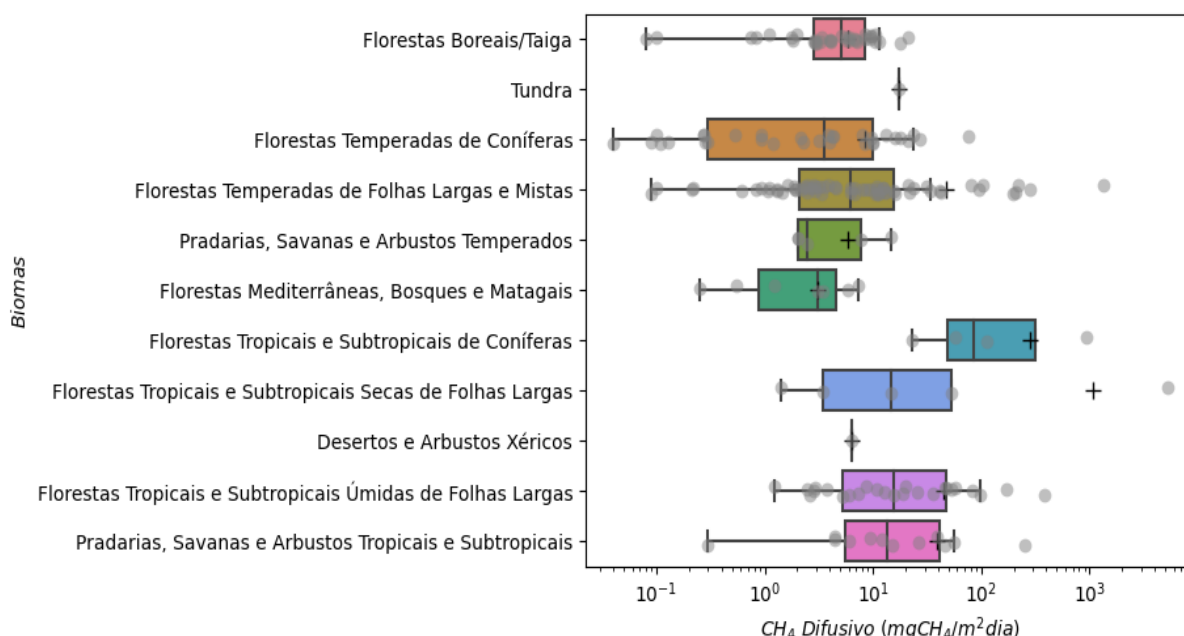


FIGURA 11 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de metano difusivo para cada bioma.

A tabela 8 apresenta um resumo estatístico do conjunto de dados para emissão difusiva de CH_4 . Percebe-se que a região norte do planeta apresenta uma quantidade maior de medidas, enquanto a porção mais próxima ao equador apresenta os valores de média mais elevados de emissão. O bioma que possui o maior valor de magnitude média de emissão corresponde à Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas, sendo 3 vezes maior, em ordem de grandeza, que a menor média calculada.

O bioma Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas foi o que mostrou maior variação no conjunto de dados, sendo essa de 5 ordens de grandeza. O menor valor corresponde à ecorregião de Florestas de Folhas Largas do Oeste da Europa, enquanto o maior valor foi medido nas Florestas Mistas da Europa Central.

Bioma	Latitude	Quantidade	Mínimo	Máximo	Média
Florestas Boreais/Taiga	68 a 49,2	35	0,08	20,9	5,87
Tundra	62,97	1	17,36	17,36	17,36
Florestas Temperadas de Coníferas	54,42 a 39,62	32	0,04	77,03	8,47
Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas	53,16 a -26,51	64	0,09	1342,73	46,87
Pradarias, Savanas e Arbustos Temperados	47,95 a 45,93	5	2,02	14,69	5,79
Florestas Mediterrâneas, Bosques e Matagais	42,35 a -32,4	7	0,25	7,28	3,09
Florestas Tropicais e Subtropicais de Coníferas	30,38 a 19,52	4	23,13	932,80	281,96
Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas	19,15 a -6,58	5	1,40	5247,30	1064,04
Desertos e Arbustos Xéricos	10,82	1	6,43	6,43	6,43
Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas	9,26 a -1,91	25	1,22	387,00	45,12
Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais	-13,93 a -20,72	12	0,30	255,73	39,58

TABELA 8 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de metano difusivo.

5.2.2 Fluxo de Metano Ebulitivo

Ao comparar a quantidade de medidas encontrada na literatura para metano ebulitivo e metano difusivo, nota-se que há menos da metade de valores. O motivo da escassez de medidas para o metano ebulitivo é multifatorial e envolve restrições financeiras, tecnológicas e de pesquisa. Diversas técnicas estão disponíveis para a medição de fluxos de gases de efeito estufa em ambientes aquáticos. Esses fluxos podem ser avaliados por meio de câmaras flutuantes, métodos de fronteira fina, torres de covariância de turbulência, métodos acústicos e funis, resultando em distintos níveis de precisão, bem como cobertura espacial e temporal dos resultados. Entretanto, a maioria das técnicas comumente empregadas para medir as emissões de GEE aquáticos concentram-se em quantificar o fluxo difusivo de gases através da interface ar-água (DEEMER et al., 2016).

Para o metano ebulitivo, foram coletadas 64 medidas, abrangendo 9 biomas e 31 ecorregiões distintas. A magnitude das emissões é visualizada na figura 12, na qual as emissões variam em escala logarítmica de 10^{-1} a 10^3 . A maioria das medidas está na faixa de ordem de magnitude entre 10.0 e 100.0, totalizando 23 valores nesse intervalo. Ao analisar o continente americano, torna-se claro que a região norte concentra emissões de menor magnitude, em contraste com a região sul, onde a maioria dos pontos apresenta magnitudes mais elevadas. No entanto, ao observar a Oceania, notam-se emissões de baixa magnitude, mesmo estando localizada também ao sul.

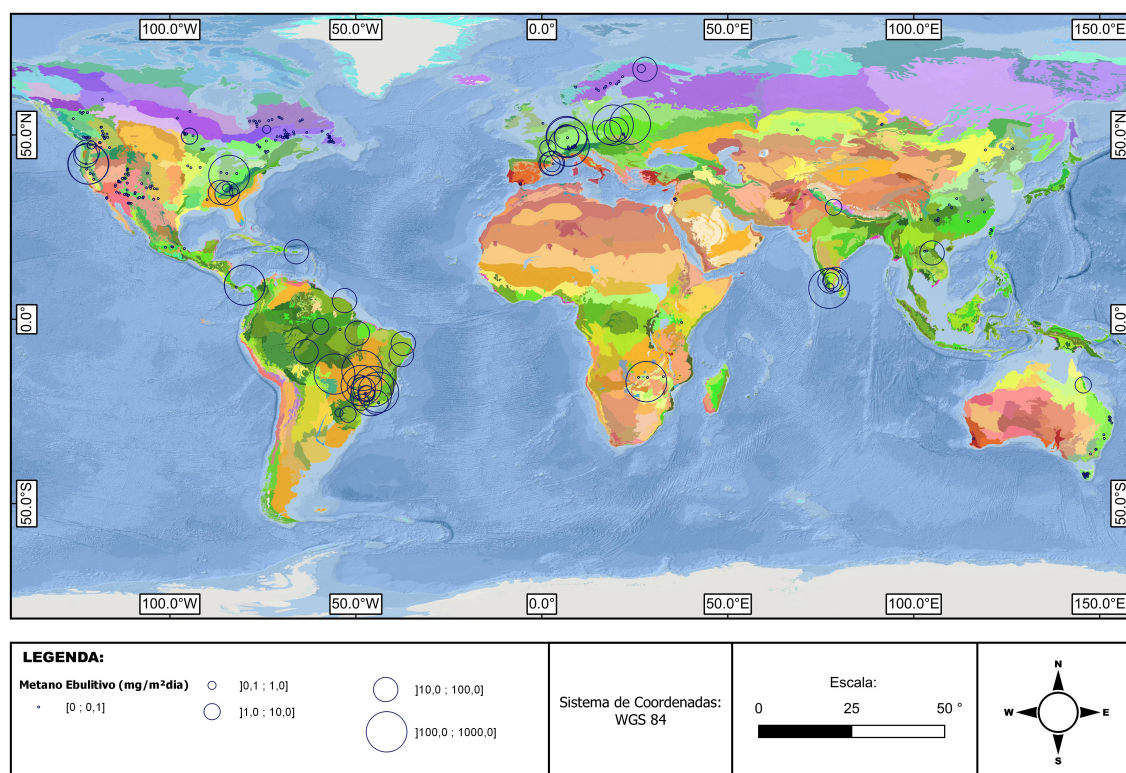


FIGURA 12 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Metano Ebulitivo. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano ebulitivo associadas a cada local.

Ao analisar a figura 13, é evidente que os valores médios de emissões estão mais próximos entre os diferentes biomas. Apesar da média mais elevada das emissões estar localizada na região sul do planeta (para o bioma Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais), é interessante notar que os biomas situados mais ao norte também apresentam médias de emissão comparáveis em magnitude, em contraste com a tendência observada para o metano difusivo.

Barros et al. (2011) afirmam que as emissões de CH₄ estão correlacionadas com a latitude, apresentando taxas de emissão superiores nas proximidades dos trópicos e taxas inferiores em latitudes elevadas. Ao contrário dessa observação, para os dados de emissão de metano ebulitivo, ambos os biomas Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas e Florestas Temperadas de Coníferas têm média de emissão superior à reservatórios tropicais, localizados em latitudes mais baixas. Resultado que corrobora com a observação feita por Deemer et al. (2016), de que reservatórios em latitudes médias podem emitir tanto CH₄ quanto sistemas tropicais.

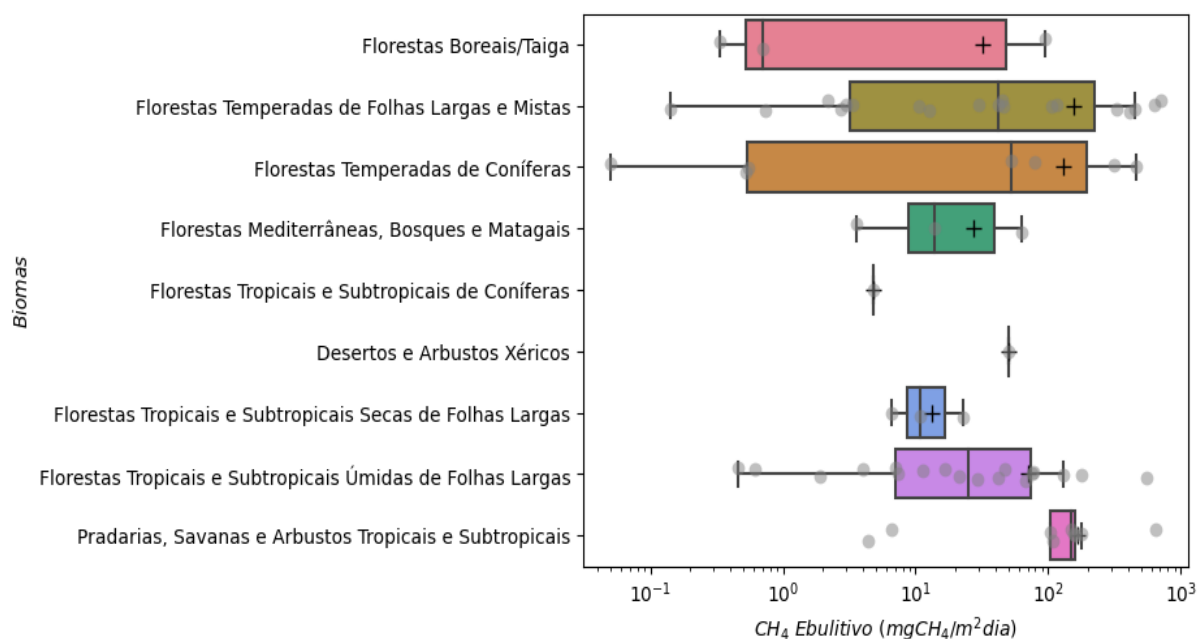


FIGURA 13 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de metano ebulitivo para cada bioma.

A maioria das amostras contém um número bastante reduzido de observações, frequentemente variando de 1 a 3 medidas. Para as amostras com mais dados, destaca-se ainda a considerável variabilidade das emissões ebulitivas dentro de um mesmo bioma, sendo ainda maior do que outros processos. A emissão ebulitiva é influenciada pela profundidade, temperatura e também possui forte componente sazonal, conforme ressaltado por Deemer et al. (2016). Ao analisar os dados do bioma de maior variabilidade, Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas, é importante mencionar que os dois maiores valores presentes na amostra, que apresentam magnitude de 10^3 , correspondem à mesma ecorregião, Florestas Úmidas do Istmo-Atlântico. Enquanto o menor valor do bioma pertence à ecorregião Florestas Decíduas Úmidas do Sudoeste dos Ghats, apresentando duas medidas que variam entre si em duas ordens de grandeza.

Como mencionado anteriormente, a limitada quantidade de medidas disponíveis representa um desafio significativo para a realização de análises precisas. Isso ressalta a complexidade das emissões de metano ebulitivo em diferentes ecossistemas e a necessidade de coletas mais extensivas de dados para análise mais precisa e, também, estudos mais aprofundados sobre o tema.

Bioma	Latitude	Quantidade	Mínimo	Máximo	Média
Florestas Boreais/Taiga	68 a 51,5	3	0,33	95,54	32,19
Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas	52,94 a 34,14	19	0,14	705,85	156,19
Florestas Temperadas de Coníferas	47,35 a 42,12	7	0,05	465,92	130,11
Florestas Mediterrâneas, Bosques e Matagais	42,35 a 42,19	3	3,55	63,80	27,12
Florestas Tropicais e Subtropicais de Coníferas	30,38	1	4,79	4,79	4,79
Desertos e Arbustos Xéricos	10,82	1	50,18	50,18	50,18
Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas	10,43 a -6,58	3	6,60	22,70	13,34
Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas	9,26 a -1,91	18	0,46	558,87	71,12
Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais	-20,72 a -13,93	9	4,41	642,08	167,79

TABELA 9 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de metano ebulitivo.

5.2.3 Fluxo Difusivo de Gás Carbônico

Para emissões difusivas de gás carbônico, obteve-se 285 medidas distribuídas entre 12 biomas e 82 ecorregiões distintas. Essa quantidade de registros consideravelmente maior ao se comparar com o metano, pode ser explicado pelo CO₂ ser considerado o principal gás do efeito estufa e sua medição mais fácil. Seu papel no aquecimento global é amplamente reconhecido e, como resultado, existe uma tendência à pesquisas relacionadas a ele.

A magnitude de emissões está representada na figura 13, na qual as emissões variam em ordem de grandeza de 10⁻¹ a valores maiores que 10⁴. Neste contexto, é importante ressaltar que, para o CO₂, há uma observação notável: a presença de medidas com valores negativos. Essas medidas indicam que, no momento da medição, os reservatórios em questão estão atuando como sumidouros de carbono, ou seja, estão absorvendo mais carbono da atmosfera do que emitindo. Essa dinâmica, na qual os reservatórios desempenham um papel na mitigação do carbono, destaca a complexidade das interações ambientais envolvidas.

Ao observar a figura 14, fica evidente uma uniformidade maior quando se analisam os diâmetros das circunferências apresentadas. O intervalo de valores absoluto entre]100.0; 10000.0] engloba cerca de 92% das medidas, mostrando que, entre os GEE observados, o fluxo de dióxido de carbono apresenta a amostra mais uniforme entre os biomas. Além disso, ao examinar o mapa, nota-se que a maioria das medidas negativas está concentrada na região oeste da América do Norte. Essa tendência pode ser justificada pela concentração predominante dos dados nessa área geográfica.

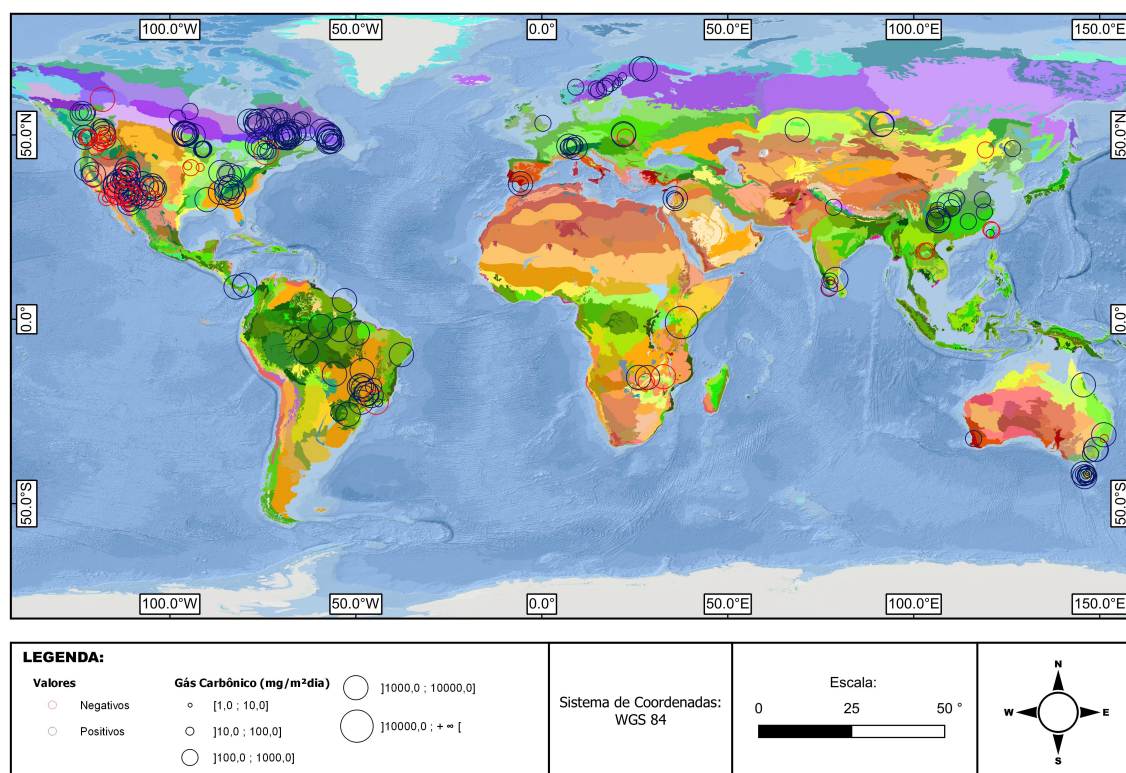


FIGURA 14 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Gás Carbônico Difusivo. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano difusivo associadas a cada local; enquanto a cor faz a distinção entre medidas positivas (azul) e negativas (vermelho).

Conforme mencionado anteriormente, a proximidade entre as médias de emissões de cada bioma é notável, variando apenas em uma ordem de grandeza, como evidenciado pela figura 15. Pode-se observar, a evidente magnitude das medidas existentes, visto que os dados estão localizados nas extremidades do gráfico, enquanto a parte central não apresenta nenhuma medida. Além disso, é possível observar uma predominância de medidas positivas, sugerindo que a maioria dos reservatórios atuava como fontes emissoras de dióxido de carbono no momento da medição.

Assim como destacado para o metano difusivo, aqui também é possível observar uma tendência relacionada à latitude, as maiores médias encontram-se nos biomas de menores latitudes, região sul. Destaca-se também que os biomas Tundra, Florestas Tropicais e Subtropicais de Coníferas, Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas e Pradarias e Savanas Inundadas apresentam somente medidas positivas de fluxo difusivo de CO₂.

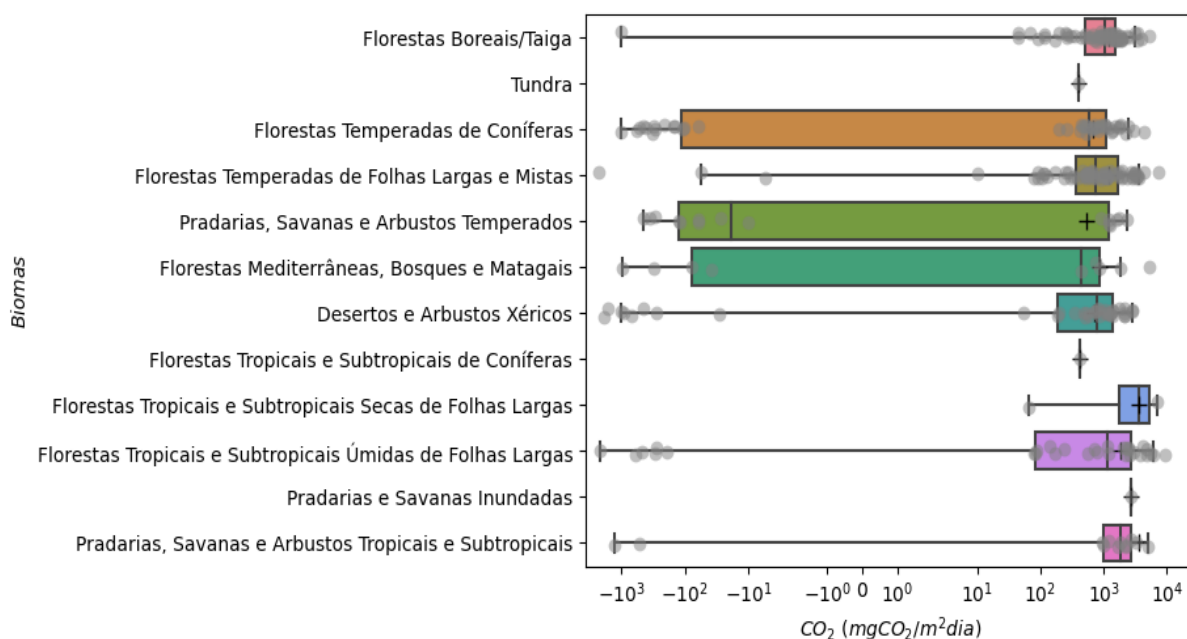


FIGURA 15 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de gás carbônico difusivo para cada bioma.

Para os dados apresentados na tabela 10, destaca-se o bioma Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas. Esse bioma apresenta somente duas medidas com valores muito distintos entre si, sendo uma medida na escala de 10^1 e outra em 10^3 . A emissão de menor valor é localizada na região norte, possui latitude positiva, enquanto a de maior valor possui latitude negativa, encontrando-se no sul do planeta.

Bioma	Latitude	Quantidade	Mínimo	Máximo	Média
Florestas Boreais/Taiga	68 a 47,92	62	-1032,17	5220,68	1190,56
Tundra	62,97	1	405,17	405,17	405,17
Florestas Temperadas de Coníferas	56,17 a 32,87	44	-1036,82	4276,59	692,78
Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas	53,16 a -31,35	68	-2284,54	7238,00	1195,15
Pradarias, Savanas e Arbustos Temperados	51,38 a 32,43	16	-462,00	2327,00	542,92
Florestas Mediterrâneas, Bosques e Matagais	39,54 a -32,4	9	-969,96	5300,00	863,27
Desertos e Arbustos Xéricos	39,37 a 10,82	37	-1932,58	2823,16	724,18
Florestas Tropicais e Subtropicais de Coníferas	30,38	1	425,93	425,93	425,93
Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas	10,43 a -9,62	2	65,13	6961,29	3513,21
Florestas de Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas	9,26 a -1,91	31	-2216,45	9440,57	1828,26
Pradarias e Savanas Inundadas	-15,77	1	2702,33	2702,33	2702,33
Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais	-0,88 a -20,72	13	-1305,33	26422,00	3595,27

TABELA 10 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de gás carbônico difusivo.

5.2.4 Gás Carbônico Equivalente

Tendo por objetivo avaliar a emissão total de cada reservatório, optou-se por realizar a conversão das emissões de metano para gás carbônico equivalente. Assim, é possível integrar os efeitos de diferentes gases do efeito estufa com base no seu potencial de aquecimento global.

De acordo com Vallero (2019) cada gás possui um potencial de aquecimento global específico, permitindo comparações da quantidade de energia absorvida ao longo de um determinado período de tempo, geralmente um período médio de 100 anos, que as emissões de uma tonelada de um gás específico absorverão em comparação com as emissões de uma tonelada de CO₂.

Por mais que o metano tenha um tempo médio de permanência na atmosfera consideravelmente menor que o dióxido de carbono, ele possui capacidade de absorver uma quantidade significativamente maior de energia em comparação com o CO₂. É importante ressaltar que o cálculo do GWP leva em conta, também, alguns efeitos indiretos, como o metano reagir na atmosfera resultando na formação de ozônio.

Assim, como não temos valores negativos para emissão de metano, na prática esse cálculo aumenta o valor de emissão de gás carbônico para todos os reservatórios que apresentavam essa medida. Além de aumentar a base de dados, pois ao converter medidas de emissão de metano em gás carbônico equivalente, os reservatórios que não continham nenhuma medida de emissão de dióxido de carbono, agora aparecem junto aos reservatórios que continham. Enquanto que, para os reservatórios que apresentavam somente medida de emissão de CO₂, nada se altera. Então, esse procedimento resultou em 332 medidas de reservatórios, distribuídas entre 12 biomas e 82 ecorregiões.

A dificuldade envolvida no cálculo do gás carbônico equivalente decorre da tendência de obter estimativas pouco confiáveis e subestimadas. A falta de uniformidade nos dados coletados é evidente, com alguns reservatórios exibindo medidas tanto de emissão difusiva de gás carbônico quanto de emissão de metano, ambas emissões difusivas e ebulitivas. Em contrapartida, há reservatórios que fornecem apenas uma dessas medidas. Portanto, a determinação do gás carbônico equivalente não considera todos os processos que efetivamente ocorrem no reservatório, mas apenas aqueles para os quais existem medições na literatura.

A distribuição espacial geográfica dos reservatórios e sua magnitude de emissão são apresentadas na figura 16.

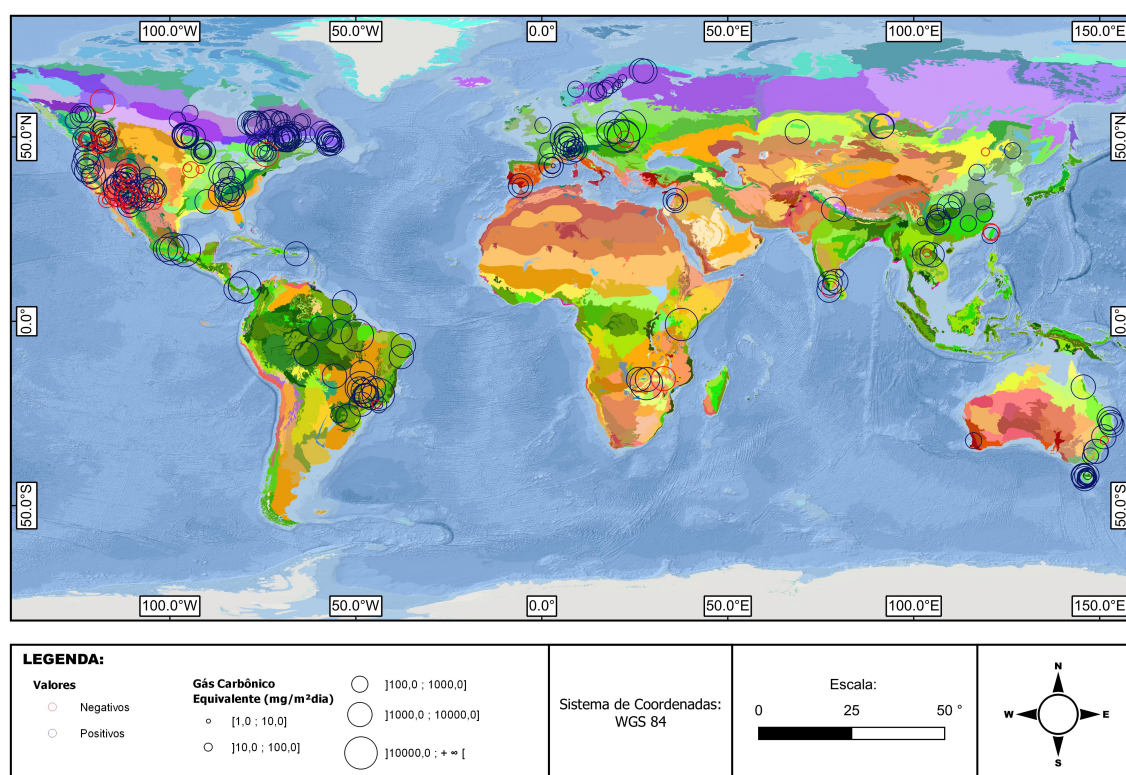


FIGURA 16 – Distribuição Espacial de Reservatórios e Emissões de Gás Carbônico Equivalente. Nesta figura, a distribuição geográfica dos reservatórios é representada por circunferências, cujo diâmetro reflete a magnitude das emissões de metano difusivo associadas a cada local; enquanto a cor faz a distinção entre medidas positivas (azul) e negativas (vermelho).

Ao comparar a figura 17 com a figura 15, percebe-se uma distribuição mais dispersa nos pontos de medições em cada bioma. No entanto, as observações feitas no gráfico anterior continuam válidas. Observa-se o aumento de médias com a diminuição da latitude e, também, a ausência de valores no centro do gráfico. Destaca-se ainda o aumento na magnitude dos valores, no gráfico de emissão difusiva de gás carbônico (figura 17) o eixo tinha seu valor máximo em 10^4 , após estimativa de gás carbônico equivalente o valor máximo passa a ser 10^5 .

Assim como destacado para a emissão difusiva de CO_2 , os mesmos biomas Tundra, Florestas Tropicais e Subtropicais de Coníferas, Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas e Pradarias e Savanas Inundadas apresentam somente medidas positivas de emissão. Nota-se também, o aumento na quantidade de pontos apresentados em relação à figura 15, decorrente do aumento de medidas ao considerar também emissões de metano, a partir do cálculo de CO_2 equivalente.

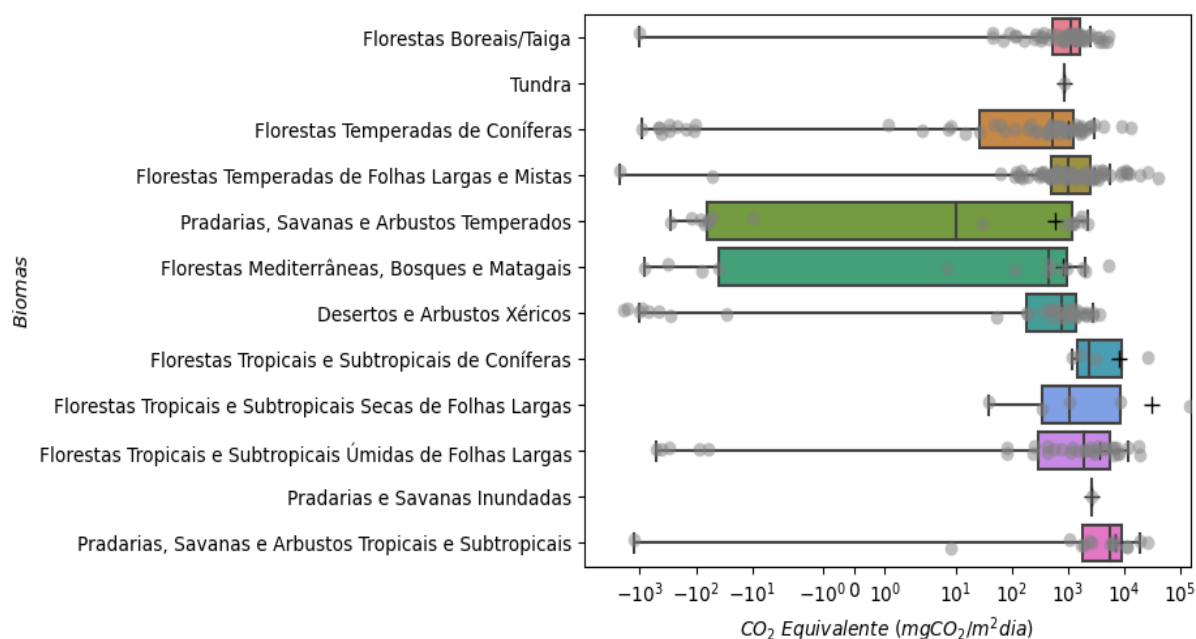


FIGURA 17 – São apresentados os boxplots que exibem a distribuição das medidas de emissão de gás carbônico equivalente para cada bioma.

A tabela 11 consolida as informações referentes ao gás carbônico equivalente calculado. Esse cálculo envolve a combinação das emissões de metano de cada reservatório, a fim de estimar o impacto total em termos de GEE. Como resultado, observamos um aumento significativo nas médias previamente apresentadas na tabela 10, para emissões difusivas de dióxido de carbono. Isso ocorre devido à adição do valor de emissão de metano para cada reservatório, destacando a influência substancial desse GEE na pegada total de carbono. Essa consolidação fornece uma visão mais abrangente e representativa das emissões totais de GEE, contribuindo para uma compreensão mais precisa do impacto ambiental de cada bioma.

Bioma	Latitude	Quantidade	Mínimo	Máximo	Média
Florestas Boreais/Taiga	68 a 47,92	62	-1032,17	5300,76	1326,95
Tundra	62,97	1	891,25	891,25	891,25
Florestas Temperadas de Coníferas	56,17 a 32,87	61	-929,58	13490,72	1042,25
Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas	53,16 a -26,51	83	-2284,54	41160,79	2992,24
Pradarias, Savanas e Arbustos Temperados	51,38 a 32,43	16	-283,82	2327,00	593,62
Florestas Mediterrâneas, Bosques e Matagais	42,35 a -32,4	13	-807,56	5300,00	819,42
Desertos e Arbustos Xéricos	39,37 a 10,82	37	-1932,58	3692,96	767,02
Florestas Tropicais e Subtropicais de Coníferas	30,38 a 19,52	4	1207,80	26118,40	8034,85
Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas	19,15 a -6,58	5	39,20	146924,40	31422,53
Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas	9,26 a -1,91	34	-503,12	18888,34	3650,16
Pradarias e Savanas Inundadas	-15,77	1	2702,33	2702,33	2702,33
Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais	-0,88 a -20,72	15	-1305,33	26422,00	6821,42

TABELA 11 – Resumo estatístico dos grupos de dados para emissão de gás carbônico equivalente.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Ao retomar os resultados obtidos para emissões de metano difusivo, compare-se somente os biomas Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas e Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas. Deemer et al. (2016) compararam estatisticamente fluxos de metano de reservatórios amazônicos com outras regiões, descobrindo que são indistinguíveis por meio do teste de Mann-Whitney. Ao realizar o mesmo teste estatístico para a amostra de dados dos dois biomas mencionados, é possível afirmar que há evidência de diferença estatística entre as amostras, sendo $p = 0,02$. Portanto, por mais que ambos os biomas possuam valor médio de emissão muito similares, conforme observado na tabela 8, conclui-se que as amostras são estatisticamente diferentes.

Na avaliação das emissões de metano ebulitivo, foi aplicado o mesmo teste estatístico aos biomas Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas, e Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais. O resultado do teste de Mann-Whitney revela que ambas as amostras são estatisticamente semelhantes, indicando um resultado de $p = 0,22$ e fornecendo evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula ao nível de significância de 5%. Assim, concluí-se que não há diferenças significativas entre as duas amostras em relação às emissões de metano ebulitivo. Esse resultado está alinhado com as conclusões de Deemer et al. (2016), que ao comparar reservatórios amazônicos com outros em regiões distintas, demonstrou que reservatórios em áreas tropicais não necessariamente apresentam emissões mais elevadas de metano; reser-

vatórios em regiões temperadas também podem exibir taxas significativas de emissão desse gás. Este resultado contrasta com as conclusões de Barros et al. (2011), que afirmam que tais reservatórios demandam atenção especial, pois emitem mais GEEs do que reservatórios em outras regiões. Ressalta-se que essa discrepância entre os resultados pode ser motivada por um conjunto menor de dados, visto que o estudo de Barros et al. (2011) explorou emissões de 85 reservatórios.

Para as taxas de emissão difusivas de dióxido de carbono, observa-se uma diferença maior entre os valores médios para cada bioma. Os dois biomas com as médias mais elevadas encontram-se na região tropical, sendo eles Pradarias, Savanas e Arbustos Tropicais e Subtropicais e Florestas Tropicais e Subtropicais Secas de Folhas Largas. Ao realizar o teste de Mann-Whitney pode-se confirmar que os biomas possuem amostras estatisticamente semelhantes ($p = 0,93$). A mesma análise pode ser feita para dois biomas localizados no hemisfério norte, nesse caso compara-se os biomas Florestas Boreais/Taiga e Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas. Esses biomas apresentam quantidade semelhante de medidas e emissões muito próximas, resultando em valor $p = 0,38$, comprovando que são estatisticamente semelhantes. É possível realizar o mesmo teste estatístico para dois biomas localizados em hemisférios distintos. Nesse caso, optou-se por comparar Florestas Temperadas de Folhas Largas e Mistas e Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas de Folhas Largas; esses são os biomas que apresentam maior quantidade de medidas nos hemisférios norte e sul, respectivamente. Ao contrário do resultado encontrado ao analisar as emissões de metano difusivo, com a variável de interesse sendo CO_2 as amostras desses biomas mostram-se estatisticamente semelhantes, com $p = 0,71$.

Devido ao fato da medida de CO_2 equivalente para cada bioma ser uma estimativa calculada, optou-se por não realizar teste estatístico nesse caso. A utilização de estimativas pode introduzir incertezas significativas nos resultados, comprometendo a confiabilidade das conclusões derivadas de análises estatísticas convencionais. Assim, reconhece a importância de abordagens mais cautelosas ao lidar com medidas estimadas, visando evitar conclusões que carecem de embasamento estatístico sólido.

6 CONCLUSÃO

Ao longo de muitos estudos, diversos pesquisadores se dedicaram à analisar a relação entre as emissões de GEE por reservatórios e fatores ambientais como latitude (BARROS et al., 2011), temperatura (JOHNSON et al., 2021), regime pluviométrico da região (LAUERWALD et al., 2023), concentração de nutrientes dissolvidos na água (DEEMER et al., 2016), entre outros. Essas variáveis ambientais são dependentes, frequentemente consideradas em conjunto. Por exemplo, a temperatura da água de um reservatório depende da localização geográfica em que está situado, assim como a quantidade de matéria orgânica alagada depende da vegetação presente na região. Portanto, pode-se entender todos esses fatores na definição de ecorregião, que agrupa comunidades naturais geograficamente separadas, que compartilham a maioria de suas espécies, dinâmicas e processos ecológicos (DINERSTEIN et al., 2017). Essa abordagem permite uma compreensão mais holística das interações complexas que influenciam as emissões, uma vez que essas características específicas de cada ecorregião desempenham um papel fundamental na dinâmica dos gases de efeito estufa. Ao considerar esses elementos decorrentes de uma ecorregião, os pesquisadores podem aprimorar a precisão de suas análises, considerando a influência sinérgica desses fatores no processo global de emissões.

Em síntese, o presente estudo representa uma significativa contribuição ao campo de pesquisa ao proporcionar uma análise inovadora das emissões por reservatórios, incorporando a variável das ecorregiões como variável explicativa. Ao integrar informações de localização com as correspondentes ecorregiões de cada reservatório, foi possível explorar a dimensão das emissões em um contexto ecologicamente mais específico. A ausência de artigos na literatura que abordem essa relação ressalta a singularidade desse trabalho, que atuou na consolidação de informações de emissão em uma nova base de dados. Essa base não apenas ampliou o conjunto de medidas disponíveis na literatura, ao unir três diferentes conjuntos de dados, mas também possibilitou uma análise mais detalhada das emissões, especialmente ao examinar cada ecorregião separadamente. Essa abordagem mais abrangente e detalhada ofereceu a possibilidade de um entendimento mais refinado das complexas dinâmicas entre reservatórios e ecorregiões, servindo como um estímulo para investigações mais aprofundadas na área.

É importante destacar que as características fisiológicas dos reservatórios, como idade, área e profundidade, não foram incorporadas na análise deste estudo. No entanto, é crucial reconhecer que esses fatores também desempenham um papel significativo, pois agem por influenciar a magnitude das emissões de GEE localmente.

A decisão de não incluir essas variáveis, deve-se ao objetivo de maximizar a quantidade de medidas coletadas. Dado que essas informações não estavam disponíveis para todos os reservatórios, considerá-las teria atuado como um fator de exclusão, diminuindo a quantidade de amostras e, conseqüentemente, afetando a representatividade do estudo. Destaca-se também a alternativa para futuros estudos de realizar uma análise abrangente do balanço de emissões não apenas no contexto do reservatório, mas sim considerando toda a bacia hidrográfica. Ao direcionar o foco para além do reservatório, seria possível uma compreensão mais precisa dos impactos ambientais associados às atividades humanas na região.

Ao analisar criticamente os dados coletados, por meio de mapas, gráficos e testes estatísticos, foi possível identificar alguns padrões e tendências que tanto convergem quanto divergem de resultados obtidos por outros pesquisadores, ao realizar estudos similares. Por exemplo, no caso do metano difusivo, em que os resultados assemelham-se aos descobertos por Deemer et al. (2016), contudo, divergem das conclusões de Barros et al. (2011). Essas análises não apenas destacam a importância de considerar as características ambientais locais na gestão de reservatórios, mas evidenciam a necessidade contínua de estudos mais abrangentes e específicos para aprimorar a compreensão acerca das complexas dinâmicas entre reservatórios e ecorregiões.

No entanto, mesmo utilizando todas as alternativas disponíveis para maximizar a quantidade de medidas para o estudo, conclui-se que a falta de dados suficientes prejudica a realização dessa análise por ecorregião. Mesmo ao agrupar por biomas, houve desafios significativos devido à escassez de informações disponíveis, com biomas apresentando somente uma única medida de emissão. Esta limitação é uma preocupação compartilhada por outros pesquisadores, que também destacam a escassez de dados como um obstáculo comum em estudos semelhantes. A necessidade de mais dados e informações detalhadas torna-se evidente para uma compreensão mais abrangente e precisa das relações entre as emissões de gases de efeito estufa e as características específicas das diferentes regiões e biomas.

REFERÊNCIAS

- BARROS, Nathan et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. **Nature geoscience**, Nature Publishing Group UK London, v. 4, n. 9, p. 593–596, 2011. Citado 8 vezes nas páginas 11, 17–19, 39, 48–50.
- BERNARDO, Julio Werner Yoshioka et al. A method for the assessment of long-term changes in carbon stock by construction of a hydropower reservoir. **Ambio**, Springer, v. 46, p. 566–577, 2017. Citado 2 vez na página 16.
- DEAN, Walter E; GORHAM, Eville. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. **Geology**, Geological Society of America, v. 26, n. 6, p. 535–538, 1998. Citado 2 vez na página 16.
- DEEMER, Bridget R et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. **BioScience**, Oxford University Press, v. 66, n. 11, p. 949–964, 2016. Citado 13 vezes nas páginas 10, 15, 23, 24, 38–40, 47, 49, 50.
- DINERSTEIN, Eric et al. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. **BioScience**, Oxford University Press, v. 67, n. 6, p. 534–545, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 21, 24, 26, 49.
- FANG, JingYun et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. **Science China Earth Sciences**, Springer, v. 54, p. 1458–1468, 2011. Citado 2 vez na página 10.
- FUND, World Wildlife. **A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean**. [S.l.]: The World Bank, 1995. Citado 1 vez na página 11.
- IPCC. Climate change 2014 synthesis report. **IPCC: Geneva, Switzerland**, 2014. Citado 1 vez na página 17.
- _____. **Climate Change 2014: AR5 Synthesis Report**. Geneva, Switzerland, 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Citado 1 vez na página 25.
- _____. **Climate Change: The 1990 and 1992 IPCC Assessments**. [S.l.: s.n.], 1992. Citado 3 vezes nas páginas 10, 13, 14.
- JOHNSON, Matthew S et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Wiley Online Library, v. 126, n. 8, e2021jg006305, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 11, 17, 19, 49.
- KEELING, Charles D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. **Tellus**, Taylor & Francis, v. 12, n. 2, p. 200–203, 1960. Citado 1 vez na página 13.

LAUERWALD, Ronny et al. Inland Water Greenhouse Gas Budgets for RECCAP2: 1. State-of-the-Art of Global Scale Assessments. **Global Biogeochemical Cycles**, Wiley Online Library, e2022gb007657, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 20, 49.

MACFARLAND, Thomas W.; YATES, Jan M. Mann–Whitney U Test. In: INTRODUCTION to Nonparametric Statistics for the Biological Sciences Using R. [S.I.]: Springer International Publishing, 2016. P. 103–132. Citado 1 vez na página 27.

OLSON, David M et al. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. **BioScience**, Oxford University Press, v. 51, n. 11, p. 933–938, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21.

PAREKH, Paral; MCCULLY, P. A preliminary review of the impact of dam reservoirs on carbon cycling. **International Rivers Network, Massachussets**, 2004. Citado 1 vez na página 16.

PRAIRIE, Yves T; ALM, Jukka et al. Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: what does the atmosphere see? **Ecosystems**, Springer, v. 21, p. 1058–1071, 2018. Citado 1 vezes nas páginas 15, 16.

PRAIRIE, Yves T; MERCIER-BLAIS, Sara et al. A new modelling framework to assess biogenic GHG emissions from reservoirs: The G-res tool. **Environmental Modelling & Software**, Elsevier, v. 143, p. 105117, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 11, 22, 23.

ROSA, Luiz Pinguelli et al. Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil. **Hydrological Processes**, Wiley Online Library, v. 17, n. 7, p. 1443–1450, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 11, 17, 18.

ROSENTERETER, Judith A et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. **Nature Geoscience**, Nature Publishing Group UK London, v. 14, n. 4, p. 225–230, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 17, 22, 23.

RUDD, John WM et al. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases. **Ambio**, v. 22, n. 4, p. 246–248, 1993. Citado 6 vezes nas páginas 10, 11, 14, 15, 17.

TRANVIK, Lars J et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnology and oceanography**, Wiley Online Library, v. 54, 6part2, p. 2298–2314, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 10, 15.

VALLERO, Daniel A. Chapter 8 - Air pollution biogeochemistry. In _____. **Air Pollution Calculations**. Edição: Daniel A. Vallero. [S.I.]: Elsevier, 2019. P. 175–206. Citado 1 vez na página 44.

YANG, Le et al. Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs. **Acta Ecologica Sinica**, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 204–212, 2014. Citado 3 vez na página 15.