

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EDDY COVARIANCE NA QUANTIFICAÇÃO DE FLUXOS DE CO₂ NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Samuel Almeida Dutra Júnior¹; Heitor de Sousa Pantarotto²; Luiza Jardim Machado³; Dimaghi Schwamback⁴ & Jamil A.A. Anache⁵

Abstract: The Eddy Covariance technique has become a key tool for quantifying CO₂ fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere, especially in regions where land use and land cover changes account for a significant share of carbon emissions, such as in Brazil. This study presents a systematic review of the application of this technique within Brazilian territory from 2015 to 2025, focusing on the analysis of CO₂ fluxes. Using the Scopus database and the PRISMA 2020 methodology, 62 articles were identified, of which 20 met the eligibility criteria. The analyzed studies reveal a strong spatial concentration in the state of Rio Grande do Sul, followed by São Paulo and semi-arid regions of the Northeast. Approximately 80% of the publications focus on the seasonal variation of CO₂ fluxes, while only 5% investigate the influence of meteorological variables on Net Ecosystem Exchange (NEE). In addition, 15% of the studies use data from the technique as input for biophysical modeling, indicating progress in integrating field measurements and simulations. The results highlight that water availability and plant physiology are the main drivers regulating CO₂ fluxes. Soil management also directly influences the capacity of agricultural and pastoral systems to act as carbon sinks or sources. This review reveals thematic and geographic gaps in the literature and reinforces the need to expand measurements across different biomes and land use systems.

Resumo: A técnica *Eddy Covariance* tem se consolidado como uma importante ferramenta para a quantificação dos fluxos de CO₂ entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera, especialmente em áreas onde as mudanças no uso e cobertura da terra são responsáveis por parcela significativa das emissões de carbono, como o Brasil. Este estudo apresenta uma revisão sistemática da aplicação dessa técnica no território brasileiro entre 2015 e 2025, com foco na análise dos fluxos de CO₂. Utilizando a base de dados Scopus e os critérios da metodologia PRISMA 2020, foram identificados 62 artigos, dos quais 20 atenderam aos critérios de elegibilidade. Os estudos analisados revelam forte concentração espacial no estado do Rio Grande do Sul, seguidos por São Paulo e regiões do semiárido nordestino. Cerca de 80% das publicações focam na análise da sazonalidade dos fluxos, enquanto apenas 5% investigam a influência de variáveis meteorológicas sobre a troca líquida de carbono (NEE). Além disso, 15% dos estudos utilizam dados da técnica como entrada à modelagem de processos biofísicos, indicando um avanço na integração entre medições de campo e simulações. Os resultados destacam que a disponibilidade hídrica e a fisiologia das plantas são os principais fatores reguladores dos fluxos de CO₂. O manejo do solo também influencia diretamente a capacidade dos

1) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. samueldutrajr@usp.br.

2) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. heitor.pantarotto@usp.br.

3) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. luizaljm@gmail.com.

4) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Departamento de Engenharia de Biosistemas. Av. Pádua Dias, 11 - São Dimas, Piracicaba - SP, 13418-260, Brasil. dimaghis@gmail.com.

5) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. jamil.anache@usp.br.

sistemas agrícolas e pastoris de atuarem como sumidouros ou emissores de carbono. A revisão evidencia lacunas temáticas e geográficas na literatura e reforça a necessidade de ampliação das medições em diferentes biomas e sistemas de uso da terra.

Palavras-Chave – *Eddy Covariance*, Brasil, CO₂

INTRODUÇÃO

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU em 2015, têm como finalidade enfrentar desafios globais como a pobreza, a desigualdade e a degradação ambiental. Entre eles, o ODS 15 – Vida Terrestre – destaca-se por abordar a proteção e o uso sustentável dos ecossistemas, com foco na preservação da biodiversidade e no combate à degradação ambiental (ONU, 2015).

Os ambientes naturais oferecem diversos serviços ecossistêmicos, como a purificação da água, o fornecimento de alimentos e a manutenção de habitats para a biodiversidade (Manning *et al.*, 2018). Contudo, tais serviços podem ser severamente afetados por mudanças no uso do solo, como urbanização, agricultura intensiva e exploração desordenada dos recursos naturais (Luo *et al.*, 2023).

No Brasil, a compreensão dos fluxos de carbono e água é especialmente relevante, dado o perfil da matriz energética e a intensa pressão sobre os ecossistemas. A mudança no uso e cobertura da terra é responsável por grande parte das emissões de dióxido de carbono no país (SEEG, 2023). Diante disso, diversas pesquisas vêm sendo conduzidas para entender como essas transformações afetam os fluxos de carbono e o regime hidrológico, especialmente em áreas de conservação. Nesse cenário, a técnica *Eddy Covariance* tem se consolidado como uma ferramenta eficaz para o monitoramento de fluxos de água, carbono e energia entre os ecossistemas e a atmosfera. Seu uso tem se expandido globalmente, permitindo medições de calor latente e sensível para balanço de energia (Zheng *et al.*, 2023) e estimativas da produtividade primária bruta em larga escala (Zuh *et al.*, 2023).

Diante disso, surge a necessidade de compreender como essa metodologia vem sendo aplicada no Brasil, considerando seu potencial e as diversas possibilidades de investigação. Para isso, propõe-se a realização de uma revisão sistemática, uma abordagem científica que busca responder a uma pergunta específica por meio da identificação, avaliação crítica e síntese de estudos primários, empregando procedimentos rigorosos e padronizados (Cook, Mulrow e Haynes, 1997; Clarke e Horton, 2001).

Assim, este estudo propõe uma revisão sistemática da aplicação da técnica *Eddy Covariance* no Brasil voltada à análise dos fluxos de CO₂, com o objetivo de identificar lacunas de pesquisa e tendências emergentes no cenário nacional. A revisão será conduzida com base na metodologia PRISMA 2020, que orienta a elaboração de revisões sistemáticas com foco na transparência, completude e precisão, organizando e estruturando os métodos de seleção, análise e apresentação dos dados para garantir um relato confiável e acessível dos achados (Page *et al.*, 2022).

MATERIAL E MÉTODOS

Para construir um protocolo de busca que realmente permitisse alcançar um panorama coerente com os objetivos propostos, foram realizados diversos testes com diferentes termos e combinações até a montagem da *string* de busca. A pesquisa foi realizada segundo o diagrama PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantir a transparência e a padronização na condução de revisões sistemáticas e meta-análises.

Alguns critérios foram definidos previamente, como o idioma, a base de dados e o período de análise. O idioma escolhido foi o inglês, por ser considerado uma língua universal na comunicação científica, o que permite abarcar uma maior quantidade de estudos e potencialmente evidências mais relevantes. A base de dados selecionada foi a Scopus, devido ao seu extenso acervo de periódicos, com ampla indexação de publicações relacionadas ao tema em questão.

Além disso, foram considerados apenas artigos científicos, publicados entre os anos de 2015 e 2025. Essa delimitação temporal se justifica pelo fato de que, segundo os registros da própria plataforma, houve um gap de publicações entre 2013 e 2016, com ausência de artigos nos anos de 2014 e 2015. Ademais, cerca de 50% das publicações pertinentes ao tema foram publicadas após 2015, o que reforça o foco do presente estudo em trabalhos mais recentes.

A busca foi realizada utilizando a função “Article title, Abstract, Keywords” (busca por tópico), com a seguinte equação de busca: (“eddy covariance” AND “brazil” AND “CO₂”), executada em 13 de maio de 2025. A partir da coleta de dados, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Esses critérios estão descritos na Tabela 1, juntamente com os respectivos códigos utilizados para rastreabilidade durante o processo de seleção:

Tabela 1 - Critérios de exclusão e inclusão.

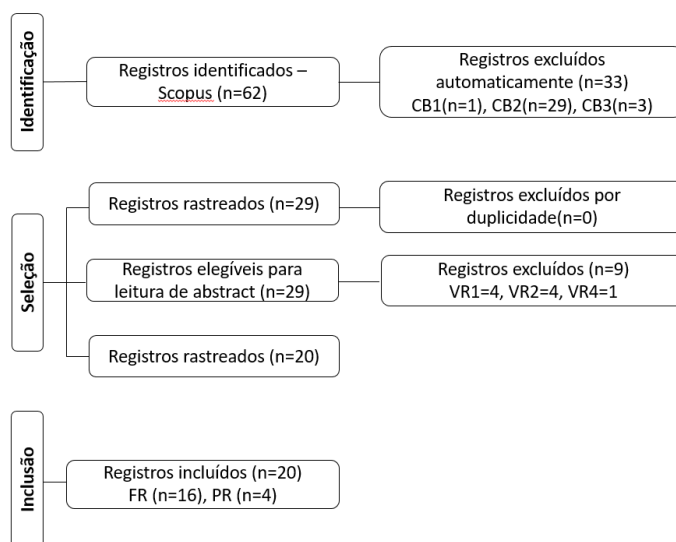
E/I	Critério	Descrição	Código
Exclusão	Critério de busca	Idioma diferente do inglês.	CB1
		Fora do intervalo de 2015 a 2025.	CB2
		Não é artigo científico	CB3
	Vagamente relacionado	Utiliza dados fora do território nacional	VR1
		Sem análise de fluxo de CO ₂	VR2
		Realizado fora de ambientes terrestres	VR3
		Não utiliza dados empíricos obtidos em campo.	VR4
	Acesso não disponível	Artigos indisponíveis ou com acesso restrito ao texto completo.	AND
Inclusão	Parcialment e relacionado	Utiliza dados de <i>Eddy Covariance</i> relacionados ao CO ₂ como suporte metodológico para outras finalidades, mas sem foco principal na análise direta dos fluxos de CO ₂ .	PR
	Fortemente relacionado	Foco na análise dos fluxos de CO ₂ medidos por torres de <i>Eddy Covariance</i> em ambientes terrestres no Brasil.	FR

A amostra inicial resultante da busca foi composta por 62 artigos. A primeira etapa de triagem consistiu na exclusão automática, realizada com base nos critérios de busca descritos na Tabela 1: CB1 (idioma) resultou na exclusão de 1 artigo, CB2 (período de publicação) excluiu 29 artigos, e CB3 (tipo de documento) excluiu 3 artigos. Assim, restaram 29 artigos para a etapa seguinte de análise, focada nos resumos (abstracts). Durante essa segunda triagem, foram aplicados os critérios de exclusão por relevância temática. Foram excluídos 9 artigos, sendo: 4 por VR1 (escopo geográfico inadequado), 4 por VR2 (variável analisada distinta do CO₂) e 1 por VR4 (ausência de dados de campo).

Os 20 artigos restantes foram então submetidos à leitura integral, com o objetivo de verificar sua elegibilidade conforme os critérios de inclusão previamente definidos. Em casos de dúvida, os artigos inicialmente considerados não elegíveis passaram por uma segunda rodada de avaliação. Como resultado, todos os 20 artigos foram incluídos na amostra consolidada: 16 classificados como fortemente relacionados (FR) e 4 como parcialmente relacionados (PR). O processo completo de triagem está representado na Figura 1, que ilustra de forma esquemática as etapas de identificação,

seleção e inclusão dos estudos, com os respectivos critérios e códigos aplicados conforme descrito na Tabela 1.

Figura 1 – Descrição numérica de publicações identificadas ao longo do processo de triagem e seleção dos estudos.



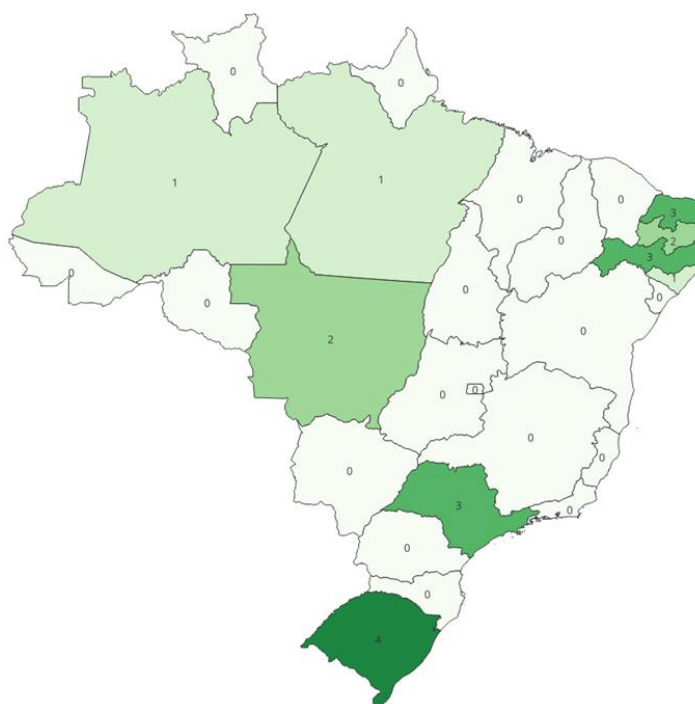
Fonte: Autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição espacial dos estudos no Brasil

Com base nos estudos selecionados, foi elaborada a Figura 2, que apresenta a distribuição do número de estudos por estado brasileiro.

Figura 2 – Número de estudos por estados brasileiros.



Fonte: Autores (2025).

Observa-se que os estudos estão majoritariamente concentrados no estado do Rio Grande do Sul, seguido por São Paulo, Mato Grosso do Sul e alguns estados do Nordeste, como Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, além de estados da região Norte, como Pará e Amazonas. Um dos fatores que dificultam a espacialização dos estudos, é a necessidade de uma torre fixa para a aplicação da técnica Eddy Covariance, o que limita a abrangência espacial dos dados coletados.

A concentração de estudos no Rio Grande do Sul se deve a uma série de fatores ecológicos, agrícolas e científicos, como o fato do estado abrigar integralmente o Bioma Pampa, com grande relevância para a pecuária e o sequestro de carbono (Goergen et al., 2020; Roberti et al., 2024). Além disso, é um dos principais polos agrícolas do país, liderando a produção de arroz irrigado (Diaz et al., 2019) e com grande destaque no cultivo de soja e trigo (Veeck et al., 2022).

Os estudos realizados no estado de São Paulo justificam-se pela sua relevância no cenário do agronegócio nacional, associado à presença de diversas instituições de pesquisa como USP, UNESP, UNICAMP, UFSCar e disponibilidade de investimentos em pesquisa. O estado destaca-se tanto pela intensa atividade agroindustrial quanto pelas transformações no uso e cobertura da terra. Paralelamente, extensas zonas de pastagens estão sendo convertidas em plantações de cana-de-açúcar, impulsionadas pela crescente demanda por etanol e açúcar (Anache, 2017; Cabral *et al.* 2020).

Além disso, o estado de São Paulo apresenta uma significativa área ocupada por pastagens, que sustentam a base da cadeia produtiva de carne e leite. No entanto, ainda há uma escassez de estudos voltados especificamente para sistemas de pastagens manejadas intensivamente, bem como uma necessidade crescente de pesquisas que avaliem a importância da recuperação de pastagens degradadas (Bianchini *et al.*, 2025; Cabral *et al.*, 2024).

Os estudos realizados no Nordeste, em especial na região semiárida brasileira, são de grande importância científica e ambiental visto que essa região é marcada por escassez hídrica, elevada variabilidade pluviométrica e recorrência de secas, fatores que, combinados à baixa fertilidade do solo e à cobertura vegetal esparsa durante a estação seca, tornam seus ecossistemas particularmente frágeis e sensíveis às variações climáticas (Oliveira *et al.*, 2021). Além disso, ainda há escassez de dados sobre os fluxos de CO₂ associados a determinados usos do solo na região, o que reforça a necessidade de estudos que contribuam para a compreensão da dinâmica carbono-água em ambientes semiáridos (Oliveira *et al.*, 2021; Bezerra *et al.*, 2022).

O estado do Mato Grosso é uma área estratégica para estudos ambientais por abrigar dois biomas fundamentais: o Cerrado, que corresponde a 20–25% da cobertura terrestre do Brasil e apresenta alta biodiversidade ameaçada por atividades humanas como fogo, pecuária e agricultura (Zanella *et al.*, 2016); e o Pantanal, a maior zona úmida tropical contínua do mundo, composta por um mosaico de ecossistemas sujeitos a inundações sazonais e permanentes, cuja hidrologia está ameaçada por mudanças climáticas, obras humanas e expansão das pastagens, impactando os ciclos de inundação e o ciclo do carbono (Dalmagro *et al.*, 2022). Assim, a importância ecológica e as pressões sobre esses biomas justificam a realização de estudos na região para compreender e preservar seus processos ambientais.

Por fim, os estudos realizados no Pará e no Amazonas, são justificados pelo fato de abrigarem a maior floresta tropical contínua do mundo, crucial para os fluxos globais de água, energia e carbono. Com o aumento da frequência de eventos extremos, como secas e ondas de calor, entender a resposta desse ecossistema às mudanças climáticas é fundamental (Restrepo-Coupe et al., 2024). Estudos indicam que o sumidouro de carbono na Amazônia tem diminuído nas últimas décadas,

principalmente devido ao aumento da mortalidade das árvores e a mudanças nas estratégias de crescimento das espécies (Holm et al., 2020).

Apesar dos avanços na quantificação do fluxo de CO₂ por meio da técnica de Eddy Covariance no Brasil, diversos estados ainda permanecem sem representatividade em estudos científicos que utilizam esse método, especialmente nas regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste. Essa ausência compromete uma compreensão mais abrangente dos processos de troca de carbono entre a biosfera e a atmosfera em ecossistemas diversos, como os biomas Cerrado, Caatinga e Pantanal, que apresentam dinâmicas ecológicas distintas e influências significativas sobre o balanço regional de carbono. A principal fragilidade desses estados está na escassez de infraestrutura científica, investimentos em pesquisa e formação de redes de monitoramento contínuo. No entanto, essas regiões apresentam um enorme potencial para geração de dados inéditos, que podem subsidiar políticas públicas de mitigação das mudanças climáticas, além de fortalecer o conhecimento sobre os serviços ecossistêmicos locais. Expandir a cobertura de torres de Eddy Covariance para esses estados é, portanto, estratégico para preencher lacunas críticas na modelagem climática e nos inventários nacionais de emissões de gases de efeito estufa.

Aplicações de *Eddy Covariance* no Brasil

Entre os estudos selecionados, observa-se uma diversidade de aplicações dos dados obtidos por Eddy Covariance. Entretanto, cerca de 80% dos trabalhos concentram-se na análise da sazonalidade dos fluxos de CO₂, evidenciando a relevância de compreender quais parâmetros influenciam as emissões sazonais de carbono, podendo intensificá-las ou mitigá-las ao longo do tempo. Por outro lado, cerca de 15% dos estudos utilizam esses dados como base para a calibração, validação ou desenvolvimento de modelos, com diferentes enfoques e objetivos. Apenas uma pequena parcela, correspondente a 5%, dedica-se à investigação de variáveis meteorológicas que influenciam diretamente a Troca Líquida Ecossistêmica (NEE), indicando uma lacuna ainda pouco explorada na literatura.

Os estudos sobre a sazonalidade dos fluxos de CO₂ abrangem diversos tipos de uso do solo e podem ser agrupados em três grandes categorias: pastagens (Bezerra et al., 2022; Silva et al., 2017; Holm et al., 2020; Bianchini et al., 2025; Cabral et al., 2024; Roberti et al., 2024), culturas agrícolas de diferentes tipos (Díaz et al., 2019; Veeck et al., 2022; Machado et al., 2016; Cabral et al., 2020) e vegetação nativa (Zanella et al., 2016; Jardim et al., 2023; Silva et al., 2024; Oliveira et al., 2023; Oliveira et al., 2021), contemplando diferentes biomas e contextos ecológicos, fornecendo uma compreensão abrangente das dinâmicas de carbono em distintos sistemas. Em relação aos fatores que mais influenciam a variação do NEE, destacam-se a disponibilidade hídrica — especialmente o regime de chuvas, as condições meteorológicas e o tipo de solo —, a fisiologia das plantas e as práticas de manejo do uso da terra.

A disponibilidade hídrica se destaca em estudo como o de Restrepo-coupe et al. (2024) que ao analisar o impacto de evento extremos na Amazônia, como El Niño e La Niña, demonstraram o impacto do déficit de pressão de vapor (VPD) e o regime de chuvas, ao controlar a fotossíntese e a respiração, sendo capazes de inverter o papel do ecossistema de sumidouro para fonte de carbono. Em ambientes mais secos, como o Cerrado, Zanella et al. (2016) observaram que solos rasos e com baixa retenção hídrica, combinados a secas prolongadas, levam à emissão de CO₂, evidenciando a vulnerabilidade dos campos sujos à escassez de água. Em sistemas agrícolas do semiárido, Machado et al. (2016) confirmaram a forte dependência da precipitação: o consórcio milho-braquiária atuou como sumidouro apenas quando o armazenamento de água no solo ultrapassou 40 mm, sendo fonte de CO₂ nos períodos secos. Silva et al. (2024) reforçam esse padrão ao mostrar que, em vegetações de cactos, pulsos de chuva bem distribuídos aumentaram significativamente a absorção de carbono.

De forma semelhante, Oliveira et al. (2023, 2021) observaram que áreas de Caatinga mais densas apresentaram maior sequestro de carbono do que áreas degradadas, mesmo quando ambas atuaram como sumidouros. Em conjunto, esses estudos evidenciam que a limitação hídrica, seja por déficit de chuvas ou pelas propriedades do solo, é um fator determinante no controle dos fluxos de carbono, afetando diretamente a eficiência de diferentes ecossistemas como sumidouros de CO₂.

A fisiologia das plantas também exerce papel decisivo na regulação dos fluxos de CO₂. Bezerra et al. (2022) atribuíram o sequestro de carbono em uma pastagem manejada à alta eficiência fotossintética da gramínea C₄, favorecida por uma disponibilidade hídrica moderada e baixa atividade microbiana no solo. Já Silva et al. (2017) e Jardim et al., (2023) destacam que adaptações fisiológicas da vegetação nativa do semiárido, como raízes profundas e o metabolismo ácido das crassuláceas, favorecem o sequestro de carbono em condições de seca, reforçando sua importância na regulação do ciclo do carbono. Esses estudos demonstram que adaptações fisiológicas são fundamentais para o desempenho dos ecossistemas como sumidouros de carbono, especialmente em ambientes com estresse hídrico.

O manejo também é um fator determinante na dinâmica dos fluxos de CO₂, uma vez que a intensa atividade pecuária pode gerar redução da cobertura vegetal e elevar até 60% emissões de CO₂ (Holm et al., 2020). De modo semelhante, Bianchini et al. (2025) identificaram que práticas como o superpastejo, mesmo em pastagens com espécies de alto potencial fotossintético, resultaram em NEE positivo. Por outro lado, Cabral et al. (2024) mostraram que a renovação de pastagens degradadas pode recuperar parcialmente o papel de sumidouro. Já Roberti et al. (2024) demonstraram que pastagens naturais do bioma Pampa, sob manejo rotacionado com critérios baseados em altura da vegetação e soma térmica, mantiveram um sequestro líquido consistente de carbono. Esses resultados reforçam que práticas de manejo bem planejadas são fundamentais para aliar a produção pecuária à mitigação das mudanças climáticas. O manejo temporal das culturas também exerce influência significativa nos fluxos de CO₂, podendo converter áreas anteriormente atuantes como sumidouros em fontes emissoras, especialmente durante os períodos de pousio (Díaz et al., 2017; Veeck et al., 2022).

Dessa forma, pode-se destacar que a dinâmica dos fluxos de CO₂ nos ecossistemas agrícolas é resultado da interação entre diversos fatores, destacando-se a fisiologia das plantas, a disponibilidade hídrica e o manejo adotado. O estudo de Cabral et al. (2020) ilustra claramente essa complexidade ilustrando que elevada eficiência fotossintética e metabolismo C₄, apresentou sequestro líquido de carbono em todos os anos, o entanto, a magnitude desse sequestro foi significativamente afetada por práticas de manejo, como a manutenção da palha no solo. Além disso, fatores bióticos, como o ataque de pragas, e condições ambientais, como a disponibilidade de água ao longo dos ciclos, também influenciaram os resultados. Isso evidencia que mesmo culturas fisiologicamente eficientes dependem de um manejo criterioso e de condições climáticas favoráveis para maximizar o sequestro de carbono.

Os estudos que integram modelagem e dados observacionais ilustram tanto a importância de simular cenários futuros quanto a necessidade crítica de medições *in situ* para reduzir incertezas e aprimorar a representação dos processos ecológicos. Holm et al. (2020), por exemplo, analisaram 15 anos de medições com quatro modelos de vegetação e mostraram que apenas aquele que incorporava limitações por fósforo reproduziu adequadamente os dados de campo, revelando um sumidouro de carbono reduzido. Goergen et al. (2020) utilizaram dados experimentais no bioma Pampa para calibrar um modelo de superfície terrestre, obtendo ganhos significativos na precisão das simulações de CO₂. Já Ferreira et al. (2021) compararam estimativas de GPP por sensoriamento remoto

(MOD17A2), identificando superestimções na estação chuvosa associadas a falhas na entrada meteorológica e na classificação da cobertura do solo.

Por fim, Rocha et al. (2018) destacam que a modelagem dos fluxos de carbono em ecossistemas tropicais deve considerar a interação entre fatores micrometeorológicos e respostas fisiológicas das plantas. A antecipação dos picos de assimilação de CO₂ devido a altas temperaturas e déficit de pressão de vapor evidencia a regulação estomática, enquanto a radiação difusa em dias nublados melhora a eficiência do uso da água. Assim, incorporar a dinâmica horária ambiental e as estratégias adaptativas das plantas é essencial para aprimorar as estimativas de NEE nessas regiões.

CONCLUSÃO

O uso da técnica de Eddy Covariance para quantificação do fluxo de CO₂ no Brasil apresenta grande potencial para avançar o entendimento sobre os processos de troca de carbono entre os ecossistemas e a atmosfera, especialmente em um país com ampla diversidade climática, ecológica e de uso do solo. Esse trabalho objetivou mapear e avaliar as aplicações de Eddy Covariance no Brasil, ao mesmo tempo em que identificou lacunas importantes e apontou caminhos promissores para o desenvolvimento de pesquisas futuras. A revisão realizada evidenciou que os estudos sobre a técnica de Eddy Covariance no Brasil se concentram, predominantemente, em duas abordagens principais: (i) a aplicação de modelos calibrados com dados de campo e (ii) a análise da sazonalidade dos fluxos de CO₂ em função do uso e cobertura do solo. Os resultados destacam que as principais variáveis moduladoras dos fluxos de carbono estão associadas à disponibilidade hídrica — como o regime de chuvas, as condições meteorológicas e o tipo de solo —, além da fisiologia vegetal e das práticas de manejo do uso do solo. Ficou evidente, ainda, a importância da coleta de dados em campo, especialmente para a calibração e validação de modelos e produtos de sensoriamento remoto, contribuindo para a redução de incertezas e para uma representação mais fiel dos processos ecológicos.

Observou-se, entretanto, uma baixa representatividade de estudos no bioma Cerrado, o que revela uma lacuna significativa, considerando sua importância ecológica, agrícola e hídrica. Essa limitação pode estar relacionada à adoção de uma única base de dados na etapa de busca, o que reforça a necessidade de ampliação das fontes em futuras revisões, de modo a melhor refletir a diversidade dos biomas brasileiros. As justificativas para o uso da técnica variam de acordo com o contexto dos estudos, abrangendo desde a relevância produtiva das regiões até sua sensibilidade hídrica e valor ecológico.

Como oportunidade de avanço, destaca-se o potencial do uso da técnica de Eddy Covariance em torres móveis, especialmente em áreas com alta heterogeneidade no uso e cobertura do solo, o que permitiria maior flexibilidade e abrangência nas medições. No contexto brasileiro, a técnica pode ser aplicada de forma estratégica em biomas com elevada variabilidade sazonal, como o Cerrado e a Caatinga, em áreas de transição como o ecótono Cerrado-Amazônia, e em regiões agrícolas intensivas, contribuindo para a avaliação do impacto de práticas de manejo sobre o balanço de carbono. Além disso, o uso de torres fixas e móveis em diferentes escalas espaciais favorece a construção de séries temporais robustas, que podem subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação das mudanças climáticas, à conservação ambiental e ao uso sustentável da terra.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, B. G. et al. CO₂ exchanges and evapotranspiration of a grazed pasture under tropical climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 323, art. 109088, 2022.
- BIANCHINI, V. J. M. et al. Sustainable intensification of tropical pastures: The impact of grazing management on CO₂ exchanges and water use efficiency in southeastern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 361, art. 110324, 2025.
- CABRAL, O. M. R. et al. Eddy covariance fluxes of greenhouse gasses observed in a renewed pasture in the southeast of Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 356, art. 110177, 2024.
- CABRAL, O. M. R. et al. The sustainability of a sugarcane plantation in Brazil assessed by the eddy covariance fluxes of greenhouse gases. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 282–283, art. 107864, 2020.
- CLARKE, M.; HORTON, R. Bringing it all together: Lancet-Cochrane collaborate on systematic reviews. *Lancet*, v. 357, n. 9270, p. 1728, 2001. DOI: 10.1016/S0140-6736(00)04934-5.
- COOKE, D. J.; MULROW, C. D.; HAYNES, R. B. Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions. *Annals of Internal Medicine*, v. 126, n. 5, p. 376–380, 1997. DOI: 10.7326/0003-4819-126-5-199703010-00006.
- DALMAGRO, H. J. et al. Net carbon dioxide exchange in a hyperseasonal cattle pasture in the northern Pantanal wetland of Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 324, art. 109099, 2022.
- DIAZ, M. B. et al. Dynamics of the superficial fluxes over a flooded rice paddy in southern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 276–277, art. 107650, 2019.
- FERREIRA, R. R. et al. An assessment of the MOD17A2 gross primary production product in the Caatinga biome, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 42, n. 4, p. 1275–1291, 2021.
- GOERGEN, G. et al. Energy and CO₂ fluxes over native fields of southern Brazil through multi-objective calibration of INLAND model. *Geosciences*, v. 10, art. 479, 2020.
- HOLM, J. A. et al. Benchmarking tropical forest biomass dynamics in Earth system models. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 125, n. 3, art. e2019JG005500, 2020.
- JARDIM, A. M. R. F. et al. Sink or carbon source? How the *Opuntia* cactus agroecosystem interacts in the use of carbon, nutrients and radiation in the Brazilian semi-arid region. *Journal of Hydrology*, v. 625, art. 130121, 2023.
- LUO, SHAN et al. Grassland degradation-induced declines in soil fungal complexity reduce fungal community stability and ecosystem multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 176, p. 108865, 2023.
- MACHADO, C. B. et al. Dinâmica dos fluxos de dióxido de carbono e vapor d'água em uma área de campo natural do semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 10, p. 896–902, 2016.
- MANNING, P. et al. Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, v. 2, n. 3, p. 427–436, 2018.
- OLIVEIRA, M. L. et al. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of the Total Environment*, v. 792, art. 148458, 2021.

OLIVEIRA, M. L. et al. Evaluation of water and carbon estimation models in the Caatinga Biome based on remote sensing. *Forests*, v. 14, art. 828, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf.

PAGE, MATTHEW J. et al. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. *Revista Panamericana de Salud Pública*, v. 46, e112, 2022. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112>.

RESTREPO-COUBE, N. et al. Contrasting carbon cycle responses to dry (2015 El Niño) and wet (2008 La Niña) extreme events at an Amazon tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 353, art. 110037, 2024.

ROBERTI, D. R. et al. Sustainability in natural grassland in the Brazilian Pampa Biome: Livestock production with CO₂ absorption. *Sustainability*, v. 16, art. 3672, 2024.

ROCHA, H. R. et al. Seasonal variation of canopy conductance and its controls for a sugarcane plantation in Brazil. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 1–10, 2018.

SEEG BRASIL. Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SEEG: emissões totais série histórica. Dados de 2023. Disponível em: http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#. Acesso em: 5 fev. 2025.

SILVA, D. T. C. et al. Diurnal, seasonal and interannual variation of carbon fluxes over the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 345, art. 109829, 2024.

SILVA, P. F. et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 147, p. 71–82, 2017.

VEECK, G. P. et al. CO₂ flux in a wheat-soybean succession in subtropical Brazil: A carbon sink. *Journal of Environmental Quality*, v. 51, p. 899–915, 2022.

ZANELLA DE ARRUDA, P. H. et al. Large net CO₂ loss from a grass-dominated tropical savanna in south-central Brazil in response to seasonal and interannual drought. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 121, n. 8, p. 2110–2124, 2016.

ZHENG, Chen et al. Comparison of sensible and latent heat fluxes from optical-microwave scintillometers and eddy covariance systems with respect to surface energy balance closure. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 331, p. 109345, 2023.

ZHU, Xian-Jin et al. Mapping Chinese annual gross primary productivity with eddy covariance measurements and machine learning. *Science of The Total Environment*, v. 857, 589 p. 159390, 2023.