

Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga)

Joélia Natália Bezerra da Silva¹ *, Josiclêda Domiciano Galvêncio² , Jéssica Laís Bezerra da Silva³, Gabriel Antônio Silva Soares⁴, Igor Maciel Tiburcio⁵, Juliana Patrícia Fernandes Guedes Barros⁶

¹Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. *joelia.silva@ufpe.br

²Professora do Programa em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

³Graduada em Ciências Biológicas na Universidade Federal do Vale do São Francisco, Brasil.

⁴Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

⁵Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

⁶Mestranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 15/11/2023 – Revisado em: 28/12/2023 – Aceito em: 01/02/2024

RESUMO

A floresta tropical sazonalmente seca é um tipo de ecossistema que combina características de florestas tropicais e áreas sazonalmente secas, as terras áridas compreendem mais de 40% da superfície terrestre, abrangendo diversos biomas e são encontradas em várias partes do mundo, incluindo América do Sul, África, Ásia e Austrália. Essas áreas desempenham um papel crucial na regulação do ciclo do carbono na preservação da biodiversidade, adaptando-se às condições sazonais específicas de cada local. As estimativas dos fluxos de carbono em florestas sazonalmente secas possibilitam uma compreensão mais aprofundada dos padrões de fluxo de superfície em áreas com diversas fisionomias vegetais. Existem diversos estudos sobre florestas tropicais sazonalmente secas, abordando diferentes metodologias, elas se alternam entre três principais métodos: O primeiro método envolve amostragens diretas, segundo método emprega o uso de equações alométricas, por fim, o terceiro método utiliza técnicas de sensoriamento remoto. Diante dos métodos predominantes, este artigo busca conduzir uma revisão bibliográfica sobre a determinação do balanço de carbono no bioma Caatinga por meio do sensoriamento remoto. O objetivo é analisar artigos publicados nos últimos vinte e três anos que possam facilitar a avaliação remota das trocas de CO₂ em diversas áreas de florestas sazonalmente secas.

Palavras-Chaves: Sensoriamento remoto, Ecossistema, Semiárido.

Carbon sequestration estimates by different methods in forest ecosystems: an approach to the seasonally dry tropical forest (Caatinga)

ABSTRACT

The seasonally dry tropical forest is an ecosystem type that combines characteristics of tropical forests and seasonally dry areas, arid lands comprise over 40% of the Earth's surface, spanning various biomes and being found in different parts of the world, including South America, Africa, Asia, and Australia. These areas play a crucial role in regulating the carbon cycle and preserving biodiversity, adapting to the specific seasonal conditions of each location. Estimates of carbon fluxes in seasonally dry forests enable a deeper understanding of surface flow patterns in areas with diverse vegetation physiognomies. Various studies on seasonally dry tropical forests address different methodologies, alternating between three main methods: The first method involves direct samplings, the second method employs the use of allometric equations, and finally, the third method uses remote sensing techniques. Given the predominant methods, this article aims to conduct a literature review on determining the carbon balance in the Caatinga biome through remote sensing. The objective is to analyze articles published in the last twenty-three years that may facilitate the remote assessment of CO₂ exchanges in various areas of seasonally dry forests.

Keywords: Remote sensing, Ecosystem, Semiarid.

Silva, J. N. B., Galvêncio, J. D., Silva, J. L.B., Soares, G. A. S., Tiburcio, I. M., Barros, J. P. F.G., (2024). Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.12, n.1, p.75-93.



Estimaciones de secuestro de carbono mediante diferentes métodos en ecosistemas forestales: un enfoque sobre el bosque tropical estacionalmente seco (Caatinga)

RESUMEN

La selva tropical estacionalmente seca es un tipo de ecosistema que combina características de selvas tropicales y áreas estacionalmente secas, las tierras áridas comprenden más del 40% de la superficie terrestre, abarcando diversos biomas y encontrándose en varias partes del mundo, incluyendo América del Sur, África, Asia y Australia. Estas áreas desempeñan un papel crucial en la regulación del ciclo del carbono y la preservación de la biodiversidad, adaptándose a las condiciones estacionales específicas de cada lugar. Las estimaciones de los flujos de carbono en selvas estacionalmente secas permiten una comprensión más profunda de los patrones de flujo en la superficie en áreas con diversas fisonomías vegetales. Varios estudios sobre selvas tropicales estacionalmente secas abordan diferentes metodologías, alternando entre tres métodos principales: El primer método implica muestreos directos, el segundo método emplea el uso de ecuaciones alométricas y, finalmente, el tercer método utiliza técnicas de teledetección. Dados los métodos predominantes, este artículo busca realizar una revisión bibliográfica sobre la determinación del balance de carbono en el bioma Caatinga mediante teledetección. El objetivo es analizar artículos publicados en los últimos veintitrés años que puedan facilitar la evaluación remota de los intercambios de CO₂ en diversas áreas de selvas estacionalmente secas.

Palabras clave: Teledetección, Ecosistema, Semiarido.

1. Introdução

Estudos do balanço de carbono fornecem informações cruciais para compreender a dinâmica entre a atmosfera e a terra, os diversos padrões de vegetação e os efeitos da degradação dos ecossistemas terrestres. A floresta tropical sazonalmente seca é um ecossistema que combina características de florestas tropicais e áreas sazonalmente secas (Silva et al., 2021; Vilas et al., 2023), elas compreendem mais de 40% da superfície terrestre, abrangendo diversos biomas e são encontradas em várias partes do mundo, incluindo América do Sul, África, Ásia e Austrália (Jesus et al., 2023).

No Brasil, o bioma Caatinga, desempenha um papel fundamental na manutenção do balanço de energia e do dióxido de carbono (CO₂). A floresta seca da Caatinga abrange 11% do território continental total do Brasil (Costa et al., 2022). Apesar do papel crucial da Caatinga, poucos estudos investigaram seus ecossistemas, cuja dinâmica da vegetação é determinada principalmente pela limitação da água e é profundamente afetada por distúrbios de longo prazo (De Oliveira et al., 2021; Mendes et al., 2021).

A maioria dos estudos realizados para medições de carbono, de maneira geral, emprega três principais métodos, o primeiro envolve amostragens diretas, realizadas de forma destrutiva com a derrubada da vegetação, o segundo método consiste na utilização de equações alométricas, por fim, o terceiro método utiliza-se técnicas de sensoriamento remoto e mapeamento da vegetação (Cerqueira; Washington Franca-Rocha, 2007). Uma alternativa promissora para investigar processos vegetativos em diversas escalas espaciais e temporais é oferecida por técnicas de sensoriamento remoto (Zhang et al., 2022). Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto tem sido amplamente empregado, evidenciando melhorias nas propriedades técnicas dos sensores instalados em satélites orbitais, possibilitando análises cada vez mais refinadas (Park; Im; Kim, 2019). Os produtos derivados de satélites são valiosos para identificar dinâmicas espaço-temporais em parâmetros biofísicos e geoquímicos. Os dados de sensoriamento remoto têm viabilizado observações em várias escalas, desempenhando um papel crescente no dimensionamento das medições das torres de fluxo para grandes áreas (Liu, Chen e Han, 2012; Park; Im; Kim, 2019; Sun et al., 2019).

Apesar dos progressos nas pesquisas científicas na Caatinga, persistem incertezas nos aspectos biofísicos que distinguem padrões atmosféricos entre diferentes áreas do bioma (Ferreira et al., 2020). Para mitigar essas incertezas, torna-se imperativo conduzir medições *in situ*, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das particularidades de cada ambiente. Tais medições são cruciais para a validação de modelos e produtos de sensoriamento remoto, além de terem diversas aplicações, incluindo a modelagem

dinâmica do clima e regional, com ênfase na interação solo-vegetação-atmosfera (Costa et al., 2022; Ferreira et al., 2020; Silva et al., 2021; Vilas et al., 2023).

O objetivo deste artigo é conduzir uma revisão abrangente sobre a determinação do balanço de carbono no bioma Caatinga, empregando técnicas de sensoriamento remoto. A análise se baseará em artigos publicados ao longo dos últimos vinte e três anos, visando proporcionar uma compreensão aprimorada das condições climáticas em diversas áreas de Florestas Sazonalmente Secas por meio de análise remota.

2. Desenvolvimento

Para realizar esta revisão, foi adotado uma abordagem de pesquisa descritiva e quantitativa, utilizando métodos de estudo bibliográfico na plataforma Web of Science Core Collection. Dentro do escopo desta pesquisa, investigamos a evolução dos estudos relacionados à determinação do balanço de carbono no ecossistema da Caatinga.

A busca no banco de dados foi definida com a seguinte condição: TI = (forest* AND "Caatinga") or (forest* AND "semiarid") or (forest* AND "carbon sequestration") or (forest* AND "Remote sensing") or (forest* AND "Gross Primary Productivity*"), abrangendo o período de 2000 a 2023. Nosso principal objetivo foi encontrar resultados associados ao sequestro de carbono em florestas. Decidimos não utilizar a recuperação do campo Tópico, que inclui os campos "Título", "Resumo" e "Palavras-chave", para evitar a inclusão de resultados não pertinentes. Após triagem, exclusão de duplicatas e documentos irrelevantes, identificamos 23 artigos para análise bibliométrica. Sendo assim, apresenta-se as considerações sobre os fluxos de carbono em ecossistemas de florestas tropicais sazonalmente secas (Caatinga) e os métodos de estimativas de carbono por sensoriamento remoto

2.1 Fluxos de carbono em ecossistemas de florestas tropicais sazonalmente secas (Caatinga)

Os ecossistemas terrestres desempenham um papel fundamental no ciclo global do carbono, atuando como mitigadores dos efeitos do aquecimento global (Christian et al., 2015). Estudos sobre a troca de energia nesses ecossistemas fornecem informações essenciais para compreender os fluxos de CO₂ nos sistemas ambientais.

A fotossíntese, como mecanismo central para a fixação de carbono pelas plantas, opera sob a influência de uma complexa interação de fatores físicos, químicos e biológicos. Este processo, juntamente com a respiração, não apenas sustenta a vida vegetal, mas também exerce um papel crítico na determinação da Produção Primária Líquida (NEE) em determinadas escalas temporais específicos (Jia et al., 2020). Ao desmembrar a NEE em seus componentes fundamentais, nos deparamos com a Produtividade Primária Bruta (GPP), esta última representa a quantidade total de carbono que as plantas conseguem fixar através da fotossíntese, considerando uma unidade de área e um período determinado (Sun et al., 2019; Yang et al., 2013). É crucial salientar que essa taxa agregada de fotossíntese encapsula a totalidade da assimilação, convertendo matéria orgânica em energia e nutrientes (Gallon, Sanches e Paulo, 2005).

A Produtividade Primária Bruta (GPP) é impulsionada pela disponibilidade de energia, água, CO₂ atmosférico e nutrientes. O déficit hídrico e as altas temperaturas, realizam o processo incluindo reduções na atividade enzimática, mesófilo e condutância estomática para evitar a perda de água, e são fatores que influenciam significativamente a GPP (Fu et al., 2018). Esses efeitos têm sido frequentemente associados à temperatura do ar (Ta) (Ferreira et al., 2020), ao déficit de pressão de vapor (VPD) (Mendes et al., 2021) e ao teor de água no solo (SWC) (Tong et al., 2019). A GPP apresenta um comportamento dinâmico em relação às variáveis ambientais, especialmente a temperatura do ar (Ta). Conforme documentado por Ferreira et al. (2020), observa-se que a GPP tende a aumentar inicialmente com o incremento da temperatura, mas essa tendência se inverte acima de um limiar específico de temperatura, esse decréscimo é atribuído às implicações negativas nas taxas máximas de carboxilação e transporte de elétrons dentro do sistema fotossintético. Além

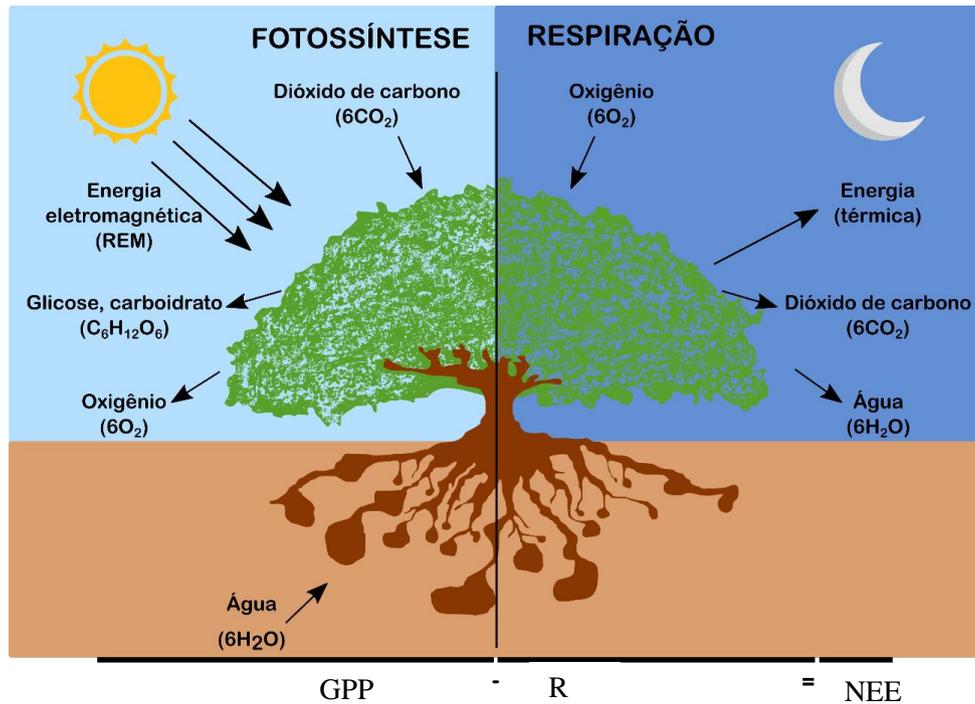
disso, as variações no VPD desempenham um papel crucial na modulação da GPP. Um aumento no VPD tende a limitar progressivamente a condutância estomática, o que, por sua vez, impacta negativamente a GPP. Paralelamente, déficits no conteúdo de água no solo (SWC) também têm consequências significativas na GPP, levando a reduções notáveis na atividade enzimática, na morfologia mesófila e na condutância estomática. Este fenômeno foi corroborado por estudos anteriores, como os realizados por Park, Im e Kim (2019), que enfatizaram a inter-relação complexa entre variáveis ambientais e a dinâmica da GPP em ecossistemas específicos.

A Respiração do ecossistema, denominada Reco ou R, é um processo em que as plantas oxidam carboidratos, liberando dióxido de carbono, água e energia na forma de calor. O crescimento das plantas depende do excesso de carboidratos, superando a quantidade de perda respiratória (Mas et al., 2016). A respiração do ecossistema pode consumir mais de 50% da Produtividade Primária Bruta (GPP) e desempenha um papel fundamental no equilíbrio líquido terrestre de carbono, abrangendo escalas locais a globais (Jia et al., 2020).

Os componentes da respiração do ecossistema incluem as temperaturas do ar e do solo, destacando-se, pois são utilizadas para modelar a Reco. A restrição de água pode limitar o Reco, reduzindo a atividade da planta e dos micróbios no solo, restringindo a difusão de enzimas e substratos de carbono no solo (Flores-Rentería et al., 2023). Por outro lado, o alto teor de água no solo também pode limitar o Reco, reduzindo a concentração de oxigênio no solo (Gao et al., 2015; Jia et al., 2020). O regime de precipitação no ecossistema pode atuar como sumidouro ou fonte de CO₂ (Flores-Rentería et al., 2023).

O aumento da temperatura está associado ao aumento das taxas de respiração (Jia et al., 2020; Sun et al., 2018). O Reco, composto por componentes autotróficos e heterotróficos, é influenciado pelo tamanho e pulsos de precipitação, com a respiração microbiana respondendo a eventos de precipitação pequenos ou moderados (Flores-Rentería et al., 2023; Jia et al., 2020). A Figura 1 proporciona uma compreensão mais aprofundada do processo de mudança anual da NEE.

Figura 1- Esquema do processo de Fotossíntese e Respiração no ecossistema Caatinga.



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

O fluxo de carbono nos ecossistemas florestais é sensível à variação interanual dos fatores climáticos, podendo ser reduzido por eventos climáticos extremos e distúrbios humanos (Fu et al., 2018). O estresse hídrico é um dos fatores que impactam a produtividade da planta e o processo de fotossíntese, influenciando o crescimento da vegetação e alterando a quantidade de água no solo, a evapotranspiração e o balanço de carbono (Tong et al., 2019). Além disso, a temperatura, especialmente em períodos de temperatura máxima e irradiação solar, afeta a produtividade dos ecossistemas, diminuindo o crescimento da vegetação, sendo a falta de disponibilidade de água um dos principais motivos (Maselli et al., 2014). Quando essas condições biofísicas são combinadas, a Produtividade Primária Bruta (GPP) excede a Respiração do ecossistema (Reco), resultando no aumento da amplitude da Produção Primária Líquida (NEE). A respiração do ecossistema, que pode consumir mais de 50% da GPP, desempenha um papel crucial no equilíbrio do carbono terrestre, de escalas locais a globais (Jia et al., 2020). O entendimento dos fluxos de carbono é fundamental para projetar cenários desses fluxos nos ecossistemas terrestres, em especial nas florestas tropical sazonalmente seca.

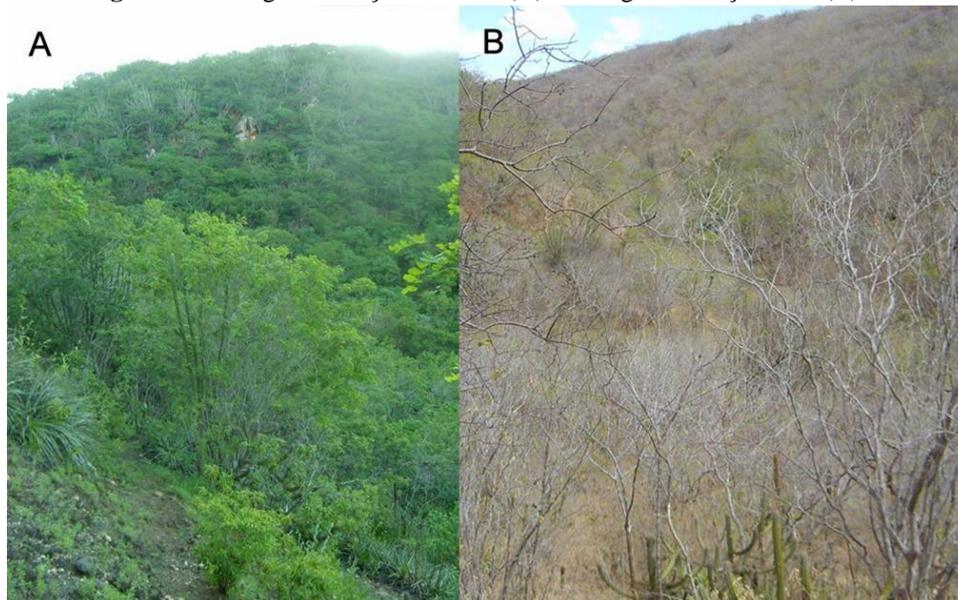
A floresta tropical sazonalmente seca (SDTF), é um ecossistema que incorpora características de florestas tropicais e áreas sazonalmente secas (Silva et al., 2021). Essas florestas abrangem mais de 40% da superfície terrestre, englobando diversos biomas, e são encontradas em várias partes do mundo, incluindo América do Sul, África, Ásia e Austrália (Jesus et al., 2023). Dentro das SDTF, a Caatinga, localizada no Nordeste brasileiro, é considerada a maior floresta tropical sazonalmente seca do mundo (Schulz et al., 2018). A área da Caatinga abrange 912.529 km² (Tabarelli et al., 2018) e é um bioma com fauna e flora encontrado no Brasil, classificado como o quarto maior bioma brasileiro (Silva et al., 2017).

As condições ambientais da Caatinga são bastante diversificadas, com alta variabilidade espacial e temporal de precipitações. Conforme estudos realizados por (Silva et al., 2017), essa região apresenta um clima BSh (semiárido quente), caracterizado pela escassez de chuvas (entre 400 e 1200 mm) anuais e grande irregularidade em sua distribuição, com temperaturas médias elevadas (por volta de 25° a 30°C) (Tabarelli et al., 2018). Mesmo durante a época das chuvas (novembro a abril), sua distribuição é irregular, podendo deixar de ocorrer em alguns anos e provocar secas (Figura 3).

A região é caracterizada por uma vegetação diversificada, predominantemente composta por caatinga hiperxerófila. Esta vegetação é complementada por segmentos de floresta caducifólia, onde se observa uma presença marcante da caatinga arbustiva-arbórea, que por sua vez se entrelaça com áreas de caatinga arbustivar (Beuchle et al., 2015). A complexidade da Caatinga é acentuada pela presença de uma ampla gama de espécies xerofíticas, que incluem cactos suculentos e árvores crassuláceas, todas essencialmente adaptadas às adversidades das condições de seca severa.

A paisagem da região é caracterizada por formações vegetais predominantemente secas, contribuindo para um ambiente com características cálidas e uma sensação visual espinhosa. Neste cenário, os estratos vegetativos se manifestam através de uma combinação de gramíneas, arbustos e árvores que exibem alturas variáveis, desde estaturas baixas até médias (Sánchez et al., 2018). Além disso, a vegetação apresenta um dossel que pode se estender até 20 metros de altura, enquanto a altura média das árvores se situa em uma faixa entre 5 e 10 metros. Quando se trata de densidade populacional, a região mantém uma variabilidade significativa, com contagens que oscilam entre 1000 a 3000 indivíduos, levando em consideração plantas com um diâmetro de tronco de 3 cm (Oliveira, Santos e Manzi. 2005). Essa riqueza e diversidade vegetal tornam a região não apenas um estudo fascinante, mas também um ecossistema de importância crucial para a biodiversidade e a sustentabilidade regional. No bioma, predominam espécies como *Poincianella microphylla* (Mart. ex G. Don) L. P. Queiroz, *Croton conduplicatus* Kunth, *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud., *Manihot pseudoglaziovii* (Pax & Hoffman) e *Commiphora leptophloeos* (Mart.) Gillett (Souza et al., 2015).

Figura 3-Caatinga na estação chuvosa (A) Caatinga na estação seca (B)



Fonte: EcoDebate, (2018)

Os padrões fenológicos da vegetação na Caatinga desempenham um papel crucial na regulação da produtividade sazonal e anual. Mudanças na fenologia das plantas são consideradas pontos-chave nas mudanças climáticas e refletem a dinâmica das trocas de carbono entre a biosfera e a atmosfera (YU et al., 2018). A fenologia da vegetação é vital para compreender as tendências nos ciclos de carbono, água e energia, sendo crucial para avaliar as respostas dos ecossistemas (Zheng et al., 2018). As florestas secas têm menor volume de biomassa em comparação com as florestas úmidas e estão amplamente distribuídas nos trópicos. Sua extensa cobertura resulta em compartimentos significativos de carbono. Observa-se que a maioria dos estudos sobre os estoques de carbono concentra-se nos trópicos úmidos, enquanto as SDTFs recebem menos atenção científica (Tabela 1) (Santos et al., 2011; Schulz et al., 2018). Os estudos sobre o armazenamento de carbono nas SDTFs evidenciam que esses ecossistemas semiáridos respondem aos principais fatores ambientais sob a influência dos cenários globais, sendo necessárias modificações no uso e ocupação da terra para uma melhor compreensão da dinâmica de longo prazo (Corona-Núñez et al., 2018).

Para avançar no conhecimento da dinâmica da relação entre o CO₂ e a atmosfera na vegetação de Caatinga pesquisas foram desenvolvidas possibilitando o conhecimento dos mecanismos biofísicos e atmosféricos, estudos de caráter observacional e experimental voltados para avaliar o método Eddy Covariance utilizando dados medidos em estações micrometeorológicas na vegetação de Caatinga. Estudos conduzidos nas SDTF, especialmente na Caatinga, têm destacado a notável capacidade de adaptação a condições áridas. Apesar de sua aparente fragilidade, essa floresta apresenta uma biodiversidade vegetal rica, no entanto, a importância dessa vegetação ainda não foi devidamente reconhecida pelo poder público, resultando em um número limitado de artigos publicados (Tabela 1) devido ao baixo investimento em projetos e pesquisas científicas. Vale ressaltar que, nos últimos 23 anos, organizações de pesquisa, como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA – Semiárido) em Petrolina, PE, o Instituto Nacional do Semiárido (INSA) em Campina Grande, PB, e outras instituições de ensino (UFPE, UFRPE, UFRN, UFCG, entre outras), têm trabalhado para ampliar o conhecimento sobre o bioma Caatinga, abordando sua interação atmosfera-

superfície, mudanças no uso e conservação do solo (Tabela 1).

Tabela 1- Trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais entre os anos de 2000 a 2023 com uso de sensoriamento remoto na Floresta Tropical Sazonalmente Seca, a Caatinga - Brasil.

Título	Autores	Local	Método	Periódico
Gross primary productivity by remote sensing in the Serra das Confusões National Park, Piauí, Brazil.	Fernandes et al.(2023)	Parque Nacional Serra das Confusões - PI / Brasil	Modelos Paramétricos	Remote Sensing Applications: Society and Environment
Validação de um modelo espectral para determinação de fluxos de CO ₂ em áreas do Bioma Caatinga	VILAS et al. (2023)	Petrolina – PE e Araripina –PE / Brasil	Modelos de Regressão	JEAP
Evaluation of Water and Carbon Estimation Models in the Caatinga Biome Based on Remote Sensing.	Oliveira et al. (2023a)	Campina Grande – PB / Brasil	Modelos Paramétricos e Modelos de Processo	Forests
The Relevance of Maintaining Standing Forests for Global Climate Balance: A Case Study in Brazilian Forests.	Costa et al. (2023)	Serra Talhada – PE /Brasil	Modelos de Processo	Tropical Forests
Seasonal Ecosystem Productivity in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) Using Flux Tower Measurements and Remote Sensing Data.	Costa et al. (2022)	Seridó - RN / Brasil	Modelos Paramétricos e Modelos de Processo	Remote Sensing
Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil.	Oliveira et al.(2022)	Campina Grande - PB / Brasil	Modelos Paramétricos e Modelos de Processo	Science of The Total Environment
Exploring the ecosystem resilience concept with land surface model scenarios.	Seixas et al. (2022)	Petrolina – PE / Brasil	Modelos Paramétricos	Ecological Modelling
Sazonalidade do sequestro e estoque de carbono na caatinga, durante as estações seca e chuvosa.	Vieira et al. (2022)	Mossoró e Baraúna /RN Paulo Afonso, Rodelas e Jeremoabo, Abaíra, Érico Cardoso, Piatã, Serra do Barbado e Rio do Pires, Dunas e Veredas / BA - Brasil	Modelos Paramétricos	Revista Brasileira de Climatologia
Assessment of SITE for CO ₂ and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga)	Mendes et al. (2021)	Seridó - RN / Brasil	Modelos de Processo	Forests

Ecosystem)

Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers.	Oliveira et al. (2021)	Campina Grande - PB / Brasil	Modelos de Processo	Science of The Total Environment
Modelos da Produtividade Primária Bruta em área de floresta tropical em sazonalmente seca, usando dados reflectância da vegetação de caatinga.	Silva et al. (2021)	Petrolina – PE / Brasil	Modelos de Aprendizagem de Máquinas	Revista Brasileira de Geografia Física
CO ₂ flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga.	Gomes et al. (2021)	Piranhas – AL / Brasil	Modelos de Regressão	Revista Brasileira de Geografia Física
Seasonal variation in net ecosystem CO ₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest.	Mendes et al. (2020)	Seridó - RN / Brasil	Modelos de Processo	Scientific Reports
An assessment of the MOD17A2 gross primary production product in the Caatinga biome, Brazil.	Ferreira et al. (2020)	Seridó - RN / Brasil	Modelos Paramétricos e Modelos de Processo	International Journal of Remote Sensing Revista Brasileira de Geografia Física
Influência topoedafoclimática na produção primária bruta no semiárido.	Lacerda et al. (2020)	Petrolina, Lagoa Grande e Santa Maria da Boa Vista –PE / Brasil	Modelos Paramétricos	Revista Brasileira de Geografia Física
Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil.	Silva et al. (2017)	Serra Talhada – PE / Brasil	Modelos de Processo	Journal of Arid Environments
Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano.	Morais et al. (2017)	Petrolina – PE / Brasil	Modelos Paramétricos	Revista Brasileira de Meteorologia
Calibration of the maximum carboxylation velocity (V _{cmax}) using data mining techniques and ecophysiological data from the Brazilian semiarid region, for use in Dynamic Global Vegetation Models.	Rezende et al.(2016)	Petrolina – PE / Brasil	Modelos de Processo	Brazilian Journal of Biology

Sensoriamento remoto hyperspectral aplicado para análise dos indicadores de resiliência e suscetibilidade do bioma caatinga frente às mudanças climáticas.	Gomes et al. (2016)	Petrolina – PE / Brasil	Modelos de Regressão	Revista Brasileira de Geografia Física
Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo – PB.	Silva et al. (2013)	São Gonçalo – PB / Brasil	Modelos Paramétricos	Revista Brasileira de Meteorologia
Aspectos da Variabilidade Sazonal da Radiação, Fluxos de Energia e CO ₂ em Área de Caatinga.	Santos et al. (2012)	Petrolina – PE / Brasil	Modelos de Processo	Revista Brasileira de Geografia Física
Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro.	Oliveira et al. (2006)	Petrolina – PE / Brasil	Modelos de Processo	Revista Brasileira de Meteorologia

Fonte: Elaborada pelos autores (2023)

Nos estudos apresentados na tabela 1, a análise abrangente e detalhada revela que, em sua maioria, os padrões sazonais e anuais de troca de CO₂ na Caatinga atuaram como um sumidouro eficaz, o que significa que houve uma absorção líquida de carbono. Este fenômeno é corroborado por diversas fontes científicas renomadas, incluindo os estudos de Mendes et al. (2020), Ferreira et al. (2020), Silva et al. (2017) e Oliveira et al. (2006).

Contrariando algumas suposições anteriores, que a caatinga era considerada como uma floresta insignificante, de baixa produtividade primária, uma das conclusões mais marcantes e relevantes deste estudo é que a Caatinga, de fato, desempenha um papel significativo como um robusto sequestrador de CO₂ da atmosfera. A complexa dinâmica do balanço de carbono neste bioma está intrinsecamente ligada às flutuações sazonais das precipitações (Costa et al., 2022; Oliveira et al., 2022; Mendes et al., 2020).

Um aspecto particularmente interessante é que, mesmo nas estações mais secas, o balanço de troca de carbono (NEE) permanece equilibrado, posicionando a Caatinga como um eficaz sumidouro de CO₂. A complexa interação entre a sazonalidade das chuvas e as trocas de carbono na Caatinga sugere que as mudanças climáticas sazonais têm um papel crucial na modulação das taxas de fixação de carbono nesse ecossistema (Mendes et al., 2020). Além disso, as implicações deste estudo são significativas para desvendar incertezas e desmistificar concepções equivocadas sobre o papel da Caatinga no contexto do balanço de carbono regional e global.

Este estudo assume uma relevância excepcional, especialmente quando contextualizado e comparado com outras florestas tropicais de grande importância ecológica e climática, como é o caso da Amazônia. A descoberta de que a Caatinga atua como um significativo sequestrador de carbono oferece uma perspectiva renovada e crucial para o entendimento dos ecossistemas brasileiros e sua contribuição para os balanços globais de carbono. Portanto, é imperativo que essas evidências sejam devidamente integradas e consideradas em iniciativas de políticas públicas robustas e estratégicas voltadas para a conservação, preservação e manejo

sustentável da Caatinga.

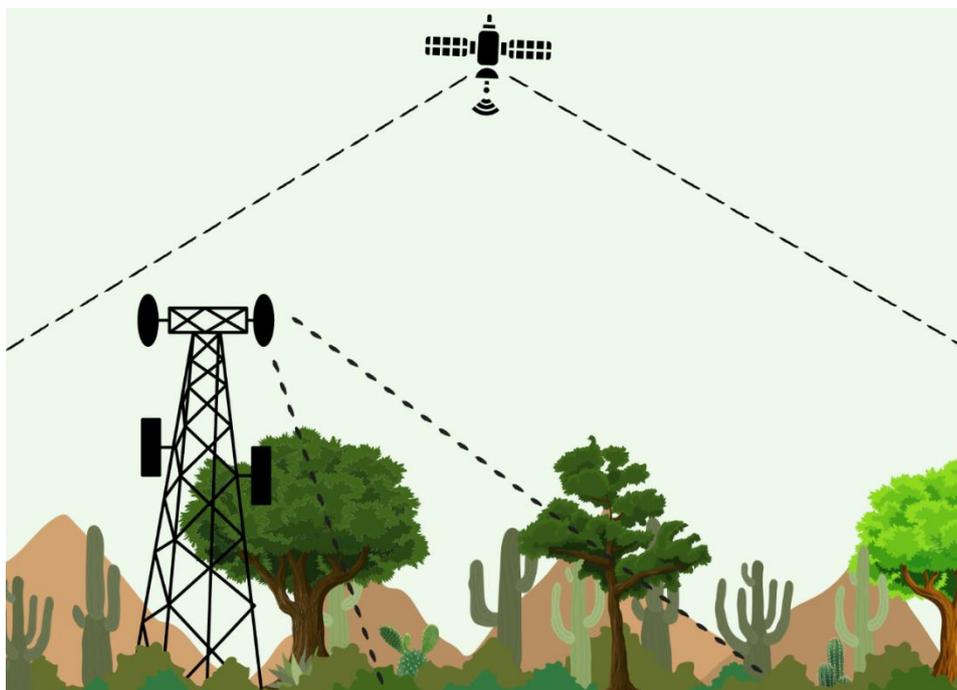
Essa incorporação não apenas validaria a importância intrínseca desse bioma único, mas também poderia direcionar recursos, estratégias e esforços para maximizar seu potencial como um aliado crítico na mitigação das mudanças climáticas e na proteção da biodiversidade regional e global.

2.2 Métodos de estimativas de carbono por sensoriamento remoto

Para aprimorar a modelagem das variações nos fluxos de carbono utilizando dados de sensoriamento remoto (Ren et al., 2017) e compreender a dinâmica vegetal (Wang et al., 2018), os modelos destinados à estimativa de carbono têm recebido considerável atenção na comunidade científica (Jiang et al., 2013; Marshall, Tu e Brown, 2018; Meacham-Hensold et al., 2019; Silva et al., 2021; Schubert et al., 2012; Zhang et al., 2014).

A quantificação dos fluxos de carbono para avaliar variações espaço-temporais nos ecossistemas florestais envolve vários métodos utilizados para medir essas propriedades, evidenciando discrepâncias estruturais (Ma et al., 2014). As estimativas diferem substancialmente em termos de magnitude e distribuição espacial em escalas regionais e globais (Jiang et al., 2013), tornando necessária a utilização de diferentes métodos (Wang et al., 2018). Os modelos de estimativa de sensoriamento remoto podem ser categorizados em quatro grupos principais: modelos de regressão, modelos paramétricos, modelos de processos e modelos de aprendizagem de máquina (Zhu, Zhao e Xie, 2023) (Figura 2).

Figura 2 - Esquema do processo de medições em torre de fluxos e sensores orbitais na SDTF, a Caatinga.



Fonte: Elaborada pelos autores (2023)

Os modelos de regressão são elaborados com base em variáveis altamente correlacionadas com GPP,

como a fluorescência de clorofila induzida por energia solar (SIF), também conhecida como NIRv (índice proxy de NIR), resultando em uma estrutura de modelo relativamente simples e de alta usabilidade (Yu; Zhang; Sun, 2021). No entanto, é importante observar que os coeficientes de regressão podem variar entre diferentes tipos funcionais de plantas (TFP). Estudos também indicaram que os modelos de regressão, baseados na relação entre GPP em locais de torres de fluxo e outras variáveis (como FPAR de campo e índice de vegetação), apresentaram baixa robustez ao serem expandidos para uma escala regional (Yu, Zhang e Sun, 2021; Zhu, Zhao e Xie, 2023).

Alguns modelos de regressão foram criados com a premissa de que as relações entre os dados de campo e os pixels correspondentes na imagem de satélite são constantes (Sarkar et al., 2022), a exemplo os modelos regionais de GPP, NEE e Reco foram desenvolvidos por Silva (2022) nestes foram obtidas expressões de regressão envolvendo dados da torre micrometeorológica com as reflectâncias FieldSpec 3 destinados a estimar a GPP, NEE e Reco na floresta de caatinga, foram aplicadas as reflectâncias do produto MOD09GA. Os resultados apontaram que os modelos desenvolvidos são adequados para estimar a GPP, NEE e a Reco com dados de refletâncias do visível e infravermelho próximo e envolvendo ainda aspectos fenológicos para o ecossistema de Caatinga.

Outro tipo de modelos são os modelos paramétricos, eles oferecem uma abordagem estruturada e simplificada para entender os intrincados processos fotossintéticos que ocorrem nos ecossistemas vegetais. Entre esses modelos, os de eficiência de uso de luz ganham destaque por sua aplicabilidade e eficácia, conforme destacado por Yu, Zhang e Sun (2021). Estes modelos são projetados para quantificar a Taxa de Fotossíntese Bruta (GPP) ao integrar a eficiência de uso de luz com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR). A APAR, neste contexto, representa a fração da radiação solar que as plantas absorvem e convertem em energia química, refletindo assim a capacidade do ecossistema em realizar a fotossíntese eficientemente.

Vale ressaltar que a base teórica desses modelos se alinha com o conceito de Eficiência de Uso de Radiação (RUE), inicialmente proposto por Monteith em 1972. A RUE serviu como fundamento para uma série de modelos subsequentes que empregam técnicas avançadas de sensoriamento remoto para avaliar a GPP e outros fluxos de carbono. A utilização de sensores remotos tem permitido uma análise mais precisa e abrangente das interações entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera, facilitando a compreensão das trocas energéticas e de carbono. Portanto, a integração de modelos paramétricos e tecnologias de sensoriamento remoto representa uma abordagem promissora para o estudo e monitoramento dos ciclos de carbono em diferentes tipos de vegetação (Jiang et al., 2013; Sun et al., 2019). A GPP tem sido estimada de maneira mais precisa por meio de modelos baseados em sensoriamento remoto, sendo o RUE um parâmetro biofísico crucial que quantifica a capacidade das plantas de converter a luz absorvida em carboidratos por meio da fotossíntese (Monteith, 1972).

O sensor MODIS, embarcado nos satélites Terra e Aqua, faz parte dos sistemas de observação da Terra da NASA, oferecendo uma visão abrangente de fenômenos terrestres, atmosféricos e oceânicos. Este sensor fornece onze produtos, incluindo o MOD17A2H, que monitora a Produção Primária Bruta e Líquida. O guia do usuário (Running; Zhao, 2015) descreve o algoritmo utilizado para estimar a GPP, conforme Equação 1. A fração de 0,45 da R_g no algoritmo MOD17A2H refere-se a PAR, com os valores de R_g provenientes da Reanálise do GMAO/NASA e a fração de radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) obtida do MOD15A2H da coleção 6 (Equação 2).

$$GPP = \epsilon_{max} \times f_{Tmin} \times f_{DPV} \times PAR \times FPAR \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde FPAR é a fração de PAR ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), e PAR pode ser calculado a partir da radiação solar total de ondas curtas (SWRad, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$):

$$\text{PAR} = \text{Rg} \times 0,4$$

Eq. (2)

Apesar de o MOD17A2H apresentar algumas inconsistências, é amplamente utilizado, e ao longo dos anos, melhorias tecnológicas foram implementadas para aprimorar o produto. Estudos conduzidos em Florestas Tropicais Sazonalmente Secas validaram as estimativas do algoritmo MOD17A2H. Oliveira et al. (2023), ao observar o estado da Paraíba, nordeste do Brasil, constataram que a GPP do MOD17A2H apresentou um comportamento temporal mais próximo das observações.

Em outro estudo, Costa et al. (2022) desenvolveram pesquisas na Estação Ecológica do Seridó (ESEC-Seridó) no estado do Rio Grande do Norte, no semiárido brasileiro, neste caso, a GPP MODIS demonstrou uma boa relação com o GPP medido pela torre em seco, sugerindo um acoplamento entre a emergência de novas folhas e a fenologia da capacidade fotossintética local. Oliveira et al. (2022), em sua pesquisa, apresentaram estimativas mais precisas do MOD17A2H na Caatinga densa, enquanto áreas de Caatinga esparsa exibiram menor GPP.

No estudo conduzido por Ferreira et al. (2020), a validação das estimativas MOD17A2H GPP foi realizada por meio da comparação com dados micrometeorológicos medidos in situ. Os resultados indicaram que, embora o produto MOD17A2H represente o comportamento anual do GPP, o algoritmo pode ser aprimorado para fornecer informações de GPP mais semelhantes aos dados medidos de superfície em tais coberturas de terra. Silveira et al., (2018) destacam a relevância de trabalhos relacionados à biomassa e ao carbono em ecossistemas tropicais, pois essas florestas contribuem significativamente para a absorção de carbono, proporcionando estabilidade ambiental.

As medições realizadas por meio de torres de covariância de redemoinhos (EC) representam uma metodologia robusta e confiável para avaliar uma gama diversificada de processos biofísicos, geoquímicos e fisiológicos. Essas medições proporcionam insights valiosos sobre a dinâmica e as variações temporais e espaciais dos fluxos de energia, vapor d'água e dióxido de carbono, conforme destacado por Christian et al. (2015). Dentro desse contexto, o método baseado em modelos de processo tem sido particularmente eficaz para quantificar o fluxo líquido de troca de dióxido de carbono, conhecido como NEE (Troca Líquida de Carbono), em diferentes escalas temporais. Jiang et al. (2013) enfatizam a relevância desse enfoque, sublinhando sua aplicabilidade e precisão na análise da dinâmica dos fluxos de carbono e suas interações com o ambiente. Portanto, a combinação dessas técnicas de medição e modelagem proporciona uma compreensão mais aprofundada e abrangente dos processos ecossistêmicos e dos impactos das mudanças ambientais.

A instalação de torres de medição de covariância começou na década de 1990 e revolucionou a pesquisa do ciclo de carbono, fornecendo conjuntos de dados valiosos sobre os componentes do balanço de carbono nos ecossistemas terrestres (Barcza et al., 2020). O método EC utiliza dois instrumentos de resposta rápida (ou seja, 10 Hz), um analisador de gás infravermelho (IRGA), que mede a concentração do gás de interesse (neste caso, CO₂), e um anemômetro sônico que mede a velocidade vertical do vento. A covariância das variáveis simultâneas é o fluxo de gás, que no caso do CO₂ é a troca líquida do ecossistema (NEE).

A GPP é então derivado da troca líquida de NEE no ecossistema usando uma variedade de métodos de divisão de fluxo. Os dados fornecidos pelas torres EC, onde a medida NEE no ecossistema, são particionados para estimar dois principais fluxos de carbono: a GPP, que é a fotossíntese aparente (Jia et al., 2020), e a Reco, que é a combinação da respiração autotrófica e heterotrófica (Barcza et al., 2020; Flores-Rentería et al., 2023). A troca líquida de CO₂ entre o ecossistema e a atmosfera, NEE conforme a Equação 3, refere-se ao equilíbrio entre o carbono assimilado e emitido, sendo a absorção ou assimilação de carbono via fotossíntese da vegetação denominada Produção Primária Bruta (GPP) Equação 5 e a emissão através da respiração dos ecossistemas (Reco) Equação 4 (Gao et al., 2015; Jia et al., 2020; Sun et al., 2020).

A partição do NEE entre GPP e Reco ocorre conforme equações:

$$NEE = GPP - Reco \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde: onde NEE é o fluxo de carbono líquido ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), GPP é a produção primária bruta ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Reco é a respiração do ecossistema ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

$$Reco = R_{ref} \cdot \frac{e^{(T_{ref} - T_0)}}{e^{(T_{ref} - T_0)} - 1} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde: Reco é a respiração do ecossistema, T_{ref} é a temperatura de referência, T_{soil} é a temperatura do solo à profundidade de 5 cm e T_0 é constante igual a 46,02 °C, conforme (Lloyd; Taylor, 1994) .

$$GPP = NEE - Reco \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde: GPP é a produção primária bruta ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), NEE é o fluxo de carbono líquido ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Reco é a respiração do ecossistema ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

A técnica de EC fornece estimativas integradas dos fluxos de carbono no dossel e subdossel em diferentes escalas temporais, ou seja, a cada meia hora (Chi et al., 2021). Essa técnica utiliza as velocidades verticais do vento e as taxas de mistura de CO_2 entre as copas das florestas e as interfaces atmosféricas (Njoroge et al., 2021). Os métodos de covariância de vórtices turbulentos oferecem medições diretas e contínuas que abrangem escalas diurnas, sazonais e interanuais (Jiang et al., 2013). É importante observar que as medições das torres apresentam desafios relacionados à escala espacial. No entanto, as estimativas desse sistema representam apenas os fluxos na escala da torre (Jiang et al., 2013), e é notável a escassez de torres de fluxos nas florestas sazonalmente secas (Park, Im e Kim, 2019). Os dados coletados nas EC de CO_2 têm sido utilizados para apoiar o desenvolvimento de modelos que incorporam dados de sensoriamento remoto por meio de satélites (Coops et al., 2007).

Na última década, ocorreram avanços significativos na quantificação e compreensão dos padrões espaço-temporais do GPP terrestre, utilizando observações atmosféricas, terrestres e espaciais. Os modelos de Aprendizado de Máquina - ML são conhecidos por seus algoritmos baseados em dados, amplamente utilizados na estimativa de parâmetros para modelos paramétricos e de processo, assim como na estimativa direta de GPP. Entretanto, independentemente da abordagem específica utilizada na aplicação desses métodos de aprendizado de máquina, eles têm se mostrado eficazes na redução das incertezas associadas à estimativa de GPP (Sarkar, Shankar e Parida, 2022).

Com a crescente eficiência dos algoritmos de ML, existe um amplo escopo para a compreensão da dinâmica do ciclo do carbono. O potencial das técnicas de ML é amplamente reconhecido na resolução de problemas não lineares complexos no campo da ecologia e geoinformática. Com o desenvolvimento da inteligência artificial, a avaliação e previsão do GPP têm sido objeto de pesquisas, destacando-se o desempenho de diferentes modelos de aprendizado de máquinas (Zhu, Zhao e Xie, 2023). Os modelos de aprendizado de máquina são reconhecidos por seus algoritmos baseados em dados, amplamente empregados na estimativa de parâmetros para modelos paramétricos e de processo, bem como na estimativa direta de GPP, já existem diferentes modelos de ML, se destacando os Máquina de Vetores de Suporte – SVM, Floresta aleatória – RF, Rede Neural Artificial - ANN e Rede Neural Profunda – DNN (Wang et al., 2023). No entanto, independentemente da abordagem específica utilizada para a aplicação desses métodos de aprendizado de máquina, eles demonstraram eficácia na redução das incertezas associadas à estimativa de GPP (Wang et al., 2023).

No estudo conduzido por Silva et al., (2021) os autores desenvolveram modelos locais de GPP na Caatinga, uma área de Floresta Tropical Sazonalmente Seca em Pernambuco. Utilizaram dados de reflectância do fieldspec, superfície do produto MOD09 do satélite MODIS/TERRA e reflectância de superfície (SR) do

Landsat-8. Os modelos foram construídos com diferentes combinações de bandas e transformações. A avaliação do desempenho incluiu índices estatísticos como o coeficiente de Pearson (r), erro médio quadrático (RMSE) e PBIAS, indicando que os modelos calibrados tiveram um bom desempenho na previsão usando as bandas do sensor OLI/Landsat 8 e do MODIS/Terra (MOD09GA)

3. Considerações finais

Devido à complexidade e especificidade das Florestas Tropicais Sazonalmente Secas, torna-se cada vez mais evidente a relevância e a aplicabilidade crescente do sensoriamento remoto como uma ferramenta indispensável para estudos e monitoramentos nessas regiões. A evolução e a disseminação de modelos de processos têm desempenhado um papel fundamental ao proporcionar avanços substanciais na validação e refinamento de modelos e produtos paramétricos específicos para esses ecossistemas. Contudo, é crucial destacar que, apesar desses avanços significativos, há uma lacuna notável no uso de técnicas de aprendizagem de máquinas nesses contextos. Isso sinaliza uma área promissora e necessita de uma maior atenção da comunidade científica para explorar o potencial dessas abordagens modernas e computacionalmente intensivas.

Adicionalmente, ao realizar uma análise mais profunda e abrangente do panorama de pesquisa, torna-se evidente que, em comparação com outros biomas de relevância no contexto brasileiro, como a Amazônia e o Cerrado, a Caatinga ainda carece de uma quantidade significativamente menor de estudos utilizando sensoriamento remoto. Este cenário sublinha a urgência e a importância de intensificar esforços de pesquisa, investimentos e colaborações interdisciplinares para preencher essas lacunas de conhecimento. A expansão e diversificação de estudos na Caatinga utilizando sensoriamento remoto não apenas enriqueceriam nosso entendimento sobre esse bioma singular, mas também teriam implicações práticas significativas para sua conservação, manejo sustentável e para a formulação de políticas públicas mais informadas e eficazes.

4. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco-FACEPE pelo auxílio financeiro, processo nº: BFP-0162-5.02/23. À Embrapa Semiárido pela disponibilização dos dados de campo. Ao laboratório de sensoriamento remoto e geoprocessamento - SERGEO, e a Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

5. Referencias

Barcza, Z.; Kern, A.; Davis, K. J.; Haszpra, L. Analysis of the 21-years long carbon dioxide flux dataset from a Central European tall tower site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 290, p. 108027, 2020. Elsevier.

Beuchle, R.; Grecchi, R. C.; Shimabukuro, Y. E.; et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116–127, 2015.

Cerqueira, D. B. De; W, Franca-Rocha. Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio de Contas - Ba. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 2413–2419, 2007.

Christian, B.; Joshi, N.; Saini, M.; et al. Seasonal variations in phenology and productivity of a tropical dry deciduous forest from MODIS and Hyperion. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214–215, p. 91–105, 2015.

Coops, N. C.; Black, T. A.; Jassal, R. (Paul) S.; Trofymow, J. A. (Tony); Morgenstern, K. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 3, p. 385–401, 2007.

Corona-Núñez, R. O.; Campo, J.; Williams, M. Aboveground carbon storage in tropical dry forest plots in Oaxaca, Mexico. **Forest Ecology and Management**, v. 409, p. 202–214, 2018.

Costa, G. B.; Mendes, K. R.; Viana, L. B.; et al. Seasonal Ecosystem Productivity in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) Using Flux Tower Measurements and Remote Sensing Data. **Remote Sensing**, v. 14, n. 16, p. 3955, 2022.

Fernandes, G. S. T.; Machado, I. L. S. S.; Guedes, F. R. C. M.; Sousa, M. K. M.; Lima, E. DE A. Gross primary productivity by remote sensing in the Serra das Confusões National Park, Piauí, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 29, p. 100890, 2023.

FERREIRA, R. R.; MUTTI, P.; MENDES, K. R.; et al. An assessment of the MOD17A2 gross primary production product in the Caatinga biome, Brazil. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1826063>, v. 42, n. 4, p. 1275–1291, 2020.

Flores-Rentería, D.; Delgado-Balbuena, J.; Campuzano, E. F.; Curiel Yuste, J. Seasonal controlling factors of CO₂ exchange in a semiarid shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico. **Science of The Total Environment**, v. 858, p. 159918, 2023. Elsevier.

Fu, Z.; Gerken, T.; Bromley, G.; et al. The surface-atmosphere exchange of carbon dioxide in tropical rainforests: Sensitivity to environmental drivers and flux measurement methodology. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 263, p. 292–307, 2018.

Gallon, M. M. P.; Sanches, L.; Paulo, S. R. Fluxo E Perfil De Dióxido De Carbono No Dossel Uma Floresta Tropical De Transição Amazônica. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_artigo.php?id_artigo=237>. Acesso em: 17/6/2019.

Gao, Y.; Yu, G.; Li, S.; et al. A remote sensing model to estimate ecosystem respiration in Northern China and the Tibetan Plateau. **Ecological Modelling**, v. 304, p. 34–43, 2015..

Gomes, D. Da S.; Santos, S. K. Dos; Silva, J. H. C. S.; et al. CO₂flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 01, p. 758–769, 2023.

Gomes, V. P.; Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B.; et al. Hyperspectral remote sensing applied for analysis of the resilience indicators and biome caatinga susceptibility to climate change. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 4, p. 1122–1136, 2016.

Jesus, J. B. De; Kuplich, T. M.; Barreto, Í. D. De C.; Gama, D. C. Dual polarimetric decomposition in Sentinel-1 images to estimate aboveground biomass of arboreal caatinga. **Remote Sensing Applications: Society and**

Environment, v. 29, p. 100897, 2023.

Jia, X.; Mu, Y.; Zha, T.; et al. Seasonal and interannual variations in ecosystem respiration in relation to temperature, moisture, and productivity in a temperate semi-arid shrubland. **Science of the Total Environment**, v. 709, p. 136210, 2020.

Jiang, Y.; Zhang, J.; Xu, X.; Dong, Z. A. GPP assimilation model for the southeastern Tibetan Plateau based on CO₂ eddy covariance flux tower and remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 213–225, 2013.

Leal De Oliveira, M. B.; Barbosa Santos, J.; Manzi, O. **Trocas De Energia E Fluxo De Carbono Entre A Vegetação De Caatinga E Atmosfera No Nordeste Brasileiro**. 2005.

Liu, J. F.; Chen, S. P.; Han, X. G. Modeling gross primary production of two steppes in Northern China using MODIS time series and climate data. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, p. 742–754, 2012.

Lloyd, J.; Taylor, J. A. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. **Functional Ecology**, v. 8, n. 3, p. 315, 1994.

Marshall, M.; Tu, K.; Brown, J. Optimizing a remote sensing production efficiency model for macro-scale GPP and yield estimation in agroecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 258–271, 2018.

Maselli, F.; Cherubini, P.; Chiesi, M.; et al. Start of the dry season as a main determinant of inter-annual Mediterranean forest production variations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 194, p. 197–206, 2014.

Meacham-Hensold, K.; Montes, C. M.; Wu, J.; et al. High-throughput field phenotyping using hyperspectral reflectance and partial least squares regression (PLSR) reveals genetic modifications to photosynthetic capacity. **Remote Sensing of Environment**, v. 231, p. 111176, 2019.

Mendes, K. R.; Campos, S.; Mutti, P. R.; et al. Assessment of SITE for CO₂ and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). **Forests 2021, Vol. 12, Page 86**, v. 12, n. 1, p. 86, 2021.

Monteith, J. L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, v. 9, n. 3, p. 747, 1972. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2401901?origin=crossref>>. Acesso em: 17/6/2019.

Moura, M. S. B. De; Galvincto, J. D.; Brito, L. T. De L.; et al. **Clima e água de chuva no Semi-Árido**. Petrolina, 2007.

Njoroge, B.; Li, Y.; Wei, S.; et al. An Interannual Comparative Study on Ecosystem Carbon Exchange Characteristics in the Dinghushan Biosphere Reserve, a Dominant Subtropical Evergreen Forest Ecosystem. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, n. October, 2021.

De Oliveira, M. L.; Dos Santos, C. A. C.; De Oliveira, G.; et al. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 815, p. 152207, 2022.

Environment, v. 835, p. 155490, 2022.

De Oliveira, M. L.; Dos Santos, C. A. C.; De Oliveira, G.; Perez-Marin, A. M.; Santos, C. A. G. 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, p. 148458, 2021.

De Oliveira, M. L.; Dos Santos, C. A. C.; Santos, F. A. C.; et al. Evaluation of Water and Carbon Estimation Models in the Caatinga Biome Based on Remote Sensing. **Forests**, v. 14, n. 4, 2023a.

De Oliveira, M. L.; Dos Santos, C. A. C.; Santos, F. A. C.; et al. Evaluation of Water and Carbon Estimation Models in the Caatinga Biome Based on Remote Sensing. **Forests 2023, Vol. 14, Page 828**, v. 14, n. 4, p. 828, 2023b.

Park, H.; Im, J.; Kim, M. Improvement of satellite-based estimation of gross primary production through optimization of meteorological parameters and high resolution land cover information at regional scale over East Asia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 271, p. 180–192, 2019.

Sarkar, D P.; Shankar, B.; R. Parida, B. Machine learning approach to predict terrestrial gross primary productivity using topographical and remote sensing data. **Ecological Informatics**, v. 70, n. December 2021, p. 101697, 2022.

Ren, Y.; Zhang, F.; Kung, H.; et al. Using the vegetation-solar radiation (VSr) model to estimate the short-term gross primary production (GPP) of vegetation in Jinghe county, XinJiang, China. **Ecological Engineering**, v. 107, p. 208–215, 2017.

Rezende, L. F. C.; Arenque-Musa, B. C.; Moura, M. S. B.; et al. Calibração da velocidade máxima de carboxilação (Vcmax), utilizando técnicas de mineração de dados e dados de ecofisiologia da região semiárida Brasileira, para uso em Modelos de Vegetação Globais Dinâmicos. **Brazilian Journal of Biology**, v. 76, n. 2, p. 341–351, 2016.

Running, S. W.; Zhao, M. **User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm**. 2015.

Sánchez, A. S.; Almeida, M. B.; Torres, E. A.; et al. Alternative biodiesel feedstock systems in the Semi-arid region of Brazil: Implications for ecosystem services. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2744–2758, 2018.

Santos, J. C.; Leal, I. R.; Almeida-Cortez, J. S.; Fernandes, G. W.; Tabarelli, M. Caatinga: The Scientific Negligence Experienced by a Dry Tropical Forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 276–286, 2011.

Santos, S. D. A.; Correia, M. D. F.; Aragão, M. R. Da S.; Silva, P. K. De O. Aspectos da Variabilidade Sazonal da Radiação, Fluxos de Energia e CO₂ em Área de Caatinga (Seasonal Variability Aspects of Radiation and Fluxes of Energy and CO₂ in a Caatinga Area). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 761, 2012.

Schubert, P.; Lagergren, F.; Aurela, M.; et al. Modeling GPP in the Nordic forest landscape with MODIS time

series data—Comparison with the MODIS GPP product. **Remote Sensing of Environment**, v. 126, p. 136–147, 2012.

Schulz, K.; Guschal, M.; Kowarik, I.; et al. Grazing, forest density, and carbon storage: towards a more sustainable land use in Caatinga dry forests of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 7, p. 1969–1981, 2018.

Seixas, H. T.; Brunzell, N. A.; Moraes, E. C.; De Oliveira, G.; Mataveli, G. Exploring the ecosystem resilience concept with land surface model scenarios. **Ecological Modelling**, v. 464, p. 109817, 2022.

Silva, B. B. Da; Galvêncio, J. D.; Montenegro, S. M. G. L.; et al. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 57–64, 2013.

Silva, N. B. J.; D. Galvêncio, J.; Queiroga M. R.; Moura, M. Modelos da Produtividade Primária Bruta em área de floresta tropical em sazonalmente seca, usando dados reflectância da vegetação de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física** v, v. 14, p. 3775–3784, 2021.

Silva, P. F. Da; Lima, J. R. De S.; Antonino, A. C. D.; 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..

Da Silveira, H. L. F.; Galvão, L. S.; Sanches, I. D. A.; De Sá, I. B.; Taura, T. A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 179–190, 2018.

Souza, L.; Souza, L. S. B. De; Moura, M. S. B. De; Sediyaama, G. C.; Silva, T. G. F. Da. Balanço de Radiação em Ecossistema de Caatinga Preservada Durante um Ano de Seca no Semiárido Pernambucano (Radiation Balance in Caatinga Ecosystem Preserved for a Year Drought in Semiarid Pernambuco). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 041–055, 2015.

Sun, J.; Zhou, T. C.; Liu, M.; Et Al. Water and heat availability are drivers of the aboveground plant carbon accumulation rate in alpine grasslands on the Tibetan Plateau. **Global Ecology and Biogeography**, v. 29, n. 1, p. 50–64, 2020.

Sun, Z.; Wang, X.; Yamamoto, H.; et al. Spatial pattern of GPP variations in terrestrial ecosystems and its drivers: Climatic factors, CO₂ concentration and land-cover change, 1982–2015. **Ecological Informatics**, v. 46, p. 156–165, 2018. Elsevier.

Sun, Z.; Wang, X.; Zhang, X.; et al. Evaluating and comparing remote sensing terrestrial GPP models for their response to climate variability and CO₂ trends. **Science of The Total Environment**, v. 668, p. 696–713, 2019. 9.

Tabarelli, M.; Leal, I. R.; Scarano, F. R.; Silva, J. M. C. Da. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, p. 25–29, 2018.

Tong, X.; Mu, Y.; Zhang, J.; Meng, P.; Li, J. Water stress controls on carbon flux and water use efficiency in a warm-temperate mixed plantation. **Journal of Hydrology**, v. 571, p. 669–678, 2019.

Vieira, L. A. F.; Tabarelli, M.; Souza, G.; Queiroz, R. T.; Santos, B. A. Divergent herb communities in drier and chronically disturbed areas of the Brazilian Caatinga. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 2022.

Vilas, C.; Macedo, G.; Baptista, D. M.; et al. Journal of Environmental do Bioma Caatinga Validation of a spectral model for CO₂ fluxes estimation in areas of the Caatinga Biome. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 08, n. 03, p. 226–239, 2023.

Wang, H.; Shao, W.; Hu, Y.; Cao, W.; Zhang, Y. Assessment of Six Machine Learning Methods for Predicting Gross Primary Productivity in Grassland. **Remote Sensing 2023, Vol. 15, Page 3475**, v. 15, n. 14, p. 3475, 2023..

Wang, J.; Wu, C.; Zhang, C.; et al. Improved modeling of gross primary productivity (GPP) by better representation of plant phenological indicators from remote sensing using a process model. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 332–340, 2018.

Yang, Y.; Shang, S.; Guan, H.; Jiang, L. A novel algorithm to assess gross primary production for terrestrial ecosystems from MODIS imagery), A novel algorithm to assess gross primary production forterrestrial ecosystems from MODIS imagery. **J. Geophys. Res. Biogeosci**, v. 118, p. 590–605, 2013.

Yu, T.; Zhang, Q.; Sun, R. Comparison of Machine Learning Methods to Up-Scale Gross Primary Production. **Remote Sensing 2021, Vol. 13, Page 2448**, v. 13, n. 13, p. 2448, 2021.

Zhang, F.; Lu, X.; Huang, Q.; Jiang, F. Impact of different ERA reanalysis data on GPP simulation. **Ecological Informatics**, v. 68, p. 101520, 2022.

Zhang, Q.; Cheng, Y.-B.; Lyapustin, A. I.; et al. Estimation of crop gross primary production (GPP): I. impact of MODIS observation footprint and impact of vegetation BRDF characteristics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 191, p. 51–63, 2014.

Zheng, C.; Tang, X.; Gu, Q.; et al. Climatic anomaly and its impact on vegetation phenology, carbon sequestration and water-use efficiency at a humid temperate forest. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 150–159, 2018.

Zhu, W.; Zhao, C.; Xie, Z. An end-to-end satellite-based GPP estimation model devoid of meteorological and land cover data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 331, n. 19, p. 109337, 2023.