

# Modelos de Fluxos de Carbono em uma Área de Floresta Tropical Zonalmente Seca (Caatinga)

## Carbon Flux Models in a Zonally Dry Tropical Forest Area (Caatinga)

Joélia Natália Bezerra da Silva<sup>1</sup>

Rodrigo de Queiroga Miranda<sup>2</sup>

Gabriel Antônio Silva Soares<sup>3</sup>

Magna Soelma Beserra de Moura<sup>4</sup>

Josicléda Domiciano Galvêncio<sup>5</sup>

### Palavras-chave

Sensoriamento remoto  
Modelagem  
Semiárido

### Resumo

Estudos sobre trocas de energia em ecossistemas desempenham um papel importante na compreensão dos fluxos de carbono diante dos diferentes padrões da vegetação. No contexto das áreas semiáridas, entender a variabilidade na absorção de carbono é fundamental para quantificar e antecipar os impactos das alterações do ecossistema de caatinga. O objetivo deste estudo é calibrar e avaliar modelos para a Produção Primária Bruta (GPP), o Fluxo Líquido do Ecossistema (NEE) e a Respiração do Ecossistema (Reco) no bioma de caatinga. Foram obtidas medições da NEE, calculado em intervalos de 30 minutos usando o software EddyPro 3.6, a partir de dados brutos medidos a 10 Hz. A GPP foi estimada pela partição do NEE e Reco, todos medidos em micromoles de CO<sub>2</sub> por metro quadrado por segundo ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) na torre de covariância de vórtices turbulentos (EC), instalada em uma reserva legal, na Embrapa Semiárido, em Petrolina - Pernambuco, em um recorte do dossel da caatinga. Após as medições dos fluxos de carbono e da respiração do ecossistema foram realizadas medidas de campo com espectrorradiômetro portátil FieldSpec HandHeld para obter a reflectância do dossel em torno da torre de covariância de vórtices turbulentos, as medições foram realizadas no ano de 2015 em uma área de caatinga preservada. Os modelos de regressão linear múltipla foram desenvolvidos, para estimar os fluxos de carbono, a partir de imagens orbitais, permitindo estimar com precisão GPP, NEE e Reco, utilizando-se o produto MODIS/Terra Reflectância Superficial Diária (MOD09GA). Os principais resultados mostram a eficácia dos modelos desenvolvidos, destacando-se o modelo de GPP com melhores índices estatísticos ( $R=0,97$ ;  $R^2=0,95$ ; Erro Padrão da Estimativa=0,20). As medições observadas na torre EC apontaram que os modelos desenvolvidos para estimar a NEE, GPP e Reco, com dados da reflectância do visível e do infravermelho próximo, os modelos representaram adequadamente o período seco e capturaram com precisão os aspectos fenológicos do ecossistema da caatinga.

### Keywords

Remote sensing  
Modeling  
Semi-arid

### Abstract

Studies on energy exchange in ecosystems are critical for understanding carbon flows amid different vegetation patterns. In semi-arid areas, comprehending the variability in carbon absorption is essential for quantifying and anticipating the impacts of changes in the caatinga ecosystem. This study aims to calibrate and evaluate models for Gross Primary Production (GPP), Net Ecosystem Exchange (NEE), and Ecosystem Respiration (Reco) in the caatinga biome. NEE measurements were obtained and calculated at 30-minute intervals using EddyPro 3.6 software, from raw data measured at 10 Hz. GPP was estimated by partitioning NEE and Reco, all measured in micromoles of CO<sub>2</sub> per square meter per second ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) using the eddy covariance (EC) tower, installed in a legal reserve at Embrapa Semiárido, in Petrolina, Pernambuco, within a section of the caatinga canopy. Following the measurement of carbon fluxes and ecosystem respiration, field measurements were conducted using a portable FieldSpec HandHeld spectroradiometer to obtain the reflectance of the canopy around the turbulent eddy covariance tower. These measurements were carried out in 2015 in a preserved caatinga area. Multiple linear regression models were developed to estimate carbon fluxes from orbital images, enabling accurate estimation of GPP, NEE, and Reco, using the MODIS/Terra Daily Surface Reflectance product (MOD09GA). The primary results demonstrate the effectiveness of the developed models, particularly the GPP model, which exhibited the best statistical indices ( $R = 0.97$ ;  $R^2 = 0.95$ ; Root Mean Square Error = 0.20). Observations from the EC tower indicated that the models developed to estimate NEE, GPP, and Reco, using visible and near-infrared reflectance data, accurately represented the dry period and effectively captured the phenological aspects of the caatinga ecosystem.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. [joelia.silva@ufpe.br](mailto:joelia.silva@ufpe.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. [rodrigo.qmiranda@gmail.com](mailto:rodrigo.qmiranda@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. [gabriel.antonios@ufpe.br](mailto:gabriel.antonios@ufpe.br)

<sup>4</sup> Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE, Brasil. [magna.moura@embrapa.br](mailto:magna.moura@embrapa.br)

<sup>5</sup> Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. [josicleda.galvencio@ufpe.br](mailto:josicleda.galvencio@ufpe.br)

## INTRODUÇÃO

Nos últimos vinte anos foram alcançados avanços notáveis na quantificação e compreensão dos padrões espaço-temporais dos fluxos de carbono terrestre. O constante progresso do sensoriamento remoto tem desempenhado um papel fundamental na melhoria dos modelos de estimativa dos fluxos de carbono, esses avanços contribuíram substancialmente para o aprimoramento da nossa compreensão sobre a dinâmica dos fluxos de carbono em escala local, regional e global (Prakash Sarkar *et al.*, 2022; Silva, Silva, Santos, Silva, Galvêncio, 2017; Silva, Galvêncio, Silva, Soares, Tiburcio, Barros, 2024).

As terras áridas abrangem mais de 40% (Jesus *et al.*, 2023; Xue *et al.*, 2023), da superfície terrestre, englobando diversos biomas que se estendem por aproximadamente dois quintos do planeta, sendo o domínio semiárido o mais representativo (Jesus *et al.*, 2023). No Brasil, a floresta tropical sazonalmente seca brasileira (caatinga), destaca-se como o quarto maior bioma do Brasil (Silva; Lima, Antonino; Souza; Souza; Silva; Alves, 2017; Silva; Galvêncio; Silva; Soares; Silva, 2024; Silva; Galvêncio; Silva; Soares; Tiburcio; Barros, 2024), abrangendo uma vasta extensão no Nordeste, com cerca de 912.529 km<sup>2</sup> (Tabarelli *et al.*, 2018). A resiliência ambiental da caatinga é atribuída à sua riqueza de espécies endêmicas, apresentando um potencial significativo para o sequestro de carbono e a mitigação dos impactos nesse ecossistema (Borges *et al.*, 2020). No contexto da caatinga, os padrões fenológicos da vegetação desempenham um papel crucial na regulação da produtividade sazonal e anual, contribuindo como um importante sumidouro na absorção do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Silva; Lima, Antonino; Souza; Souza; Silva; Alves, 2017; Silva; Galvêncio; Miranda; Moura, 2024).

A estimativa dos fluxos de carbono a partir de produtos de sensoriamento remoto por satélites tem experimentado um crescimento significativo. Embora os dados provenientes do MOD17A2H sejam amplamente reconhecidos, eles apresentam potenciais fontes de erro relacionadas tanto à entrada de dados quanto aos parâmetros que descrevem as propriedades biofísicas da vegetação e do próprio algoritmo (Wang *et al.*, 2017).

A análise da dinâmica do carbono em ecossistemas ao longo de períodos extensos é uma tarefa desafiadora e em constante evolução, requerendo a aplicação de diversos conjuntos de

dados e métodos de simulação (Silva *et al.*, 2021). A integração de dados provenientes dos sensores orbitais e sensores que são instalados na superfície terrestre, capturaram informações espectrais detalhadas sobre objetos, e emerge como uma abordagem essencial para monitorar o armazenamento de carbono em florestas tropicais sazonalmente secas (Silva *et al.*, 2021; Silva; Lima, Antonino; Souza; Souza; Silva; Alves, 2017).

A medição de carbono utiliza três principais métodos: amostragens diretas com derrubada de vegetação, equações alométricas e técnicas de sensoriamento remoto (Cerqueira; Washington Franca-Rocha, 2007; Prakash Sarkar *et al.*, 2022). Diversos métodos estão disponíveis para extrapolar informações das torres de covariância de vórtices turbulentos (EC) de fluxo, originalmente em escala local, para uma escala regional. Estes métodos incluem abordagens estatísticas, como modelos de regressão e semiempíricos, técnicas de aprendizado de máquina (ML), como redes neurais e árvores de decisão, além de métodos baseados em modelos intrínsecos de eficiência no uso da água (Silva, Galvêncio, Silva, Soares, Tiburcio, Barros, 2024).

Existe um notável interesse no desenvolvimento de modelos destinados ao monitoramento de variáveis ambientais vinculadas ao balanço de carbono, especificamente relacionadas à Produção Primária Bruta (GPP), Fluxo Líquido do Ecossistema (NEE), e Respiração do Ecossistema (Reco), adaptados às características microclimáticas locais.

No bioma Caatinga, há uma escassez de análises de precisão utilizando métodos diversos de sensoriamento remoto. Esta pesquisa visa explorar uma abordagem alternativa para determinar o balanço de carbono na Caatinga, utilizando sensoriamento remoto. A proposta é desenvolver modelos híbridos que combinem diferentes faixas espectrais especificamente do visível e do infravermelho próximo, esses modelos serão validados comparando-os com a Reco, NEE e GPP derivada de medidas de fluxo de carbono da EC em um ecossistema de Caatinga, visando facilitar a análise das condições climáticas em áreas de florestas sazonalmente secas. A hipótese subjacente busca avaliar a precisão do monitoramento do balanço de carbono na vegetação da Caatinga por meio de modelos calibrados para florestas tropicais sazonalmente secas, integrando dados de campo e informações de imagens orbitais multiespectrais e hiperespectrais.

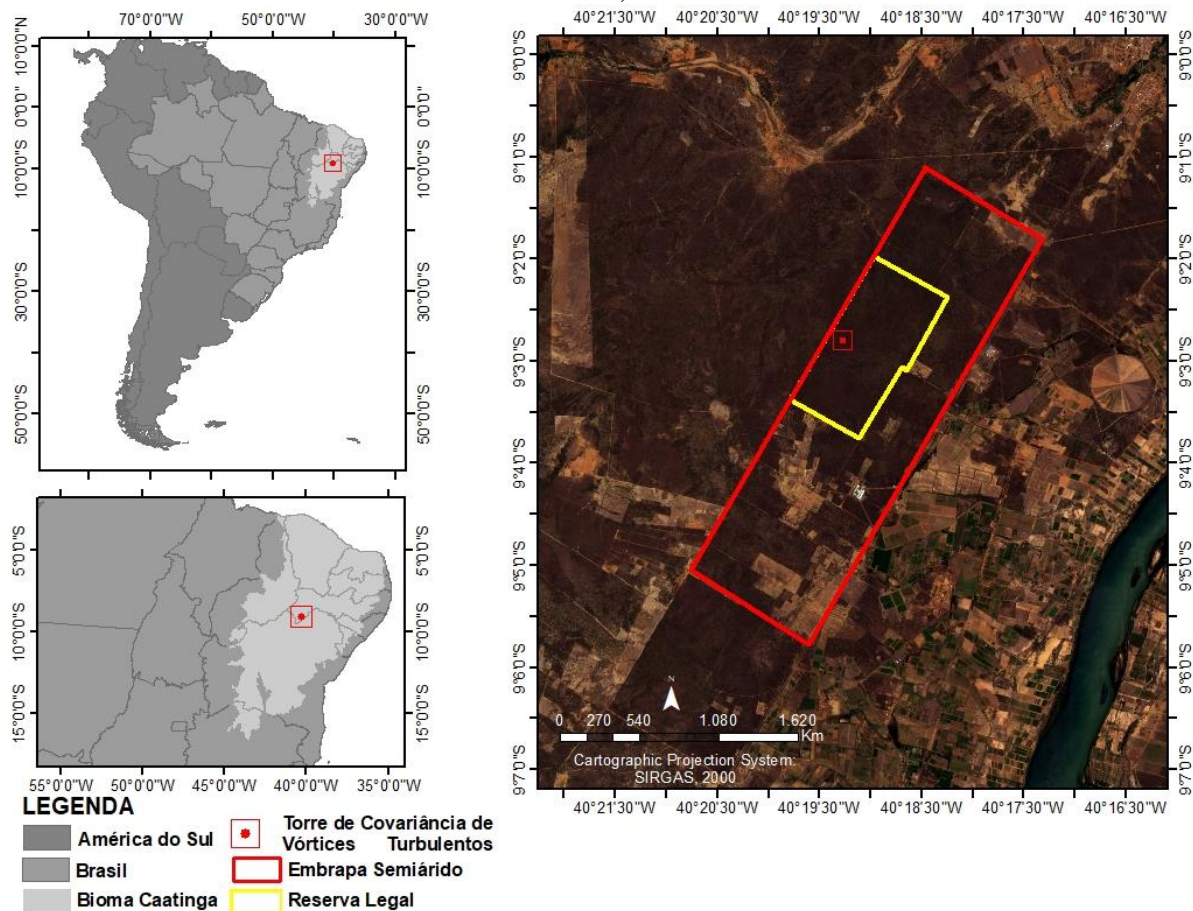
## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a Caatinga, uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca, localizada no Município de Petrolina, PE, Brasil. O ponto destacado (Figura 1) corresponde uma área de Reserva Legal na Embrapa Semiárido, onde está instalado um sistema de Covariância de Vórtices Turbulentos. A vegetação nesta área consiste em

formação lenhosa de porte médio e baixo, espécies espinhosas de folhas pequenas e finas, cactáceas e bromeliáceas (Kiill, 2017). A altura média do dossel é de 4,5 m (Miranda *et al.*, 2020). O clima é semiárido BSh de acordo com a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), com a estação chuvosa entre janeiro e abril, com precipitação pluvial média anual de 578 mm, temperatura média anual de 26,0 °C (Moura *et al.*, 2007).

Figura 1 - Floresta Tropical Sazonalmente Seca – Caatinga, Oeste do Estado de Pernambuco, Petrolina, Brasil.



Fonte: IBGE (2000). Elaborado pelos autores (2024).

### Obtenção de dados na torre de fluxos

O Fluxo líquido do ecossistema (NEE) foi calculado em intervalos de 30 minutos através do software EddyPro, versão 3.6, usando dados brutos medidos a 10 Hz. A Produção Primária Bruta (GPP) foi estimada pela partição do Fluxo Líquido do Ecossistema (NEE) em Respiração do Ecossistema (Reco), conforme as Equações 1, 2 e 3. O método noturno foi adotado para estimar a Reco (Lloyd; Taylor, 1994; Reichstein *et al.*, 2005) (Equação 2). Este procedimento, juntamente com o gap filling, foi realizado

usando o pacote REddyProc no ambiente R (The R Foundation, 2018). Todos os dados utilizados referem-se ao ano de 2015 e serviram como base para a criação e calibração dos modelos desenvolvidos neste estudo. A partição do NEE entre GPP e Reco foi realizada de acordo com a Equação 1:

$$NEE = GPP - Reco \quad (1)$$

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 ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

$$\text{Reco} = \text{Rref EE0} \left( \frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right) \quad (2)$$

Reco é a respiração do ecossistema, Tref é a temperatura de referência (C°), Tsoil é a temperatura do solo à profundidade de 5 cm e T0 é constante igual a 46,02 °C, conforme (Lloyd; Taylor, 1994).

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

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 ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

### Obtenção e pré-processamento de dados hiperespectrais

As medidas radiométricas dos dosséis vegetais foram coletadas de janeiro a agosto de 2015 em dias aleatórios, selecionando datas próximas aos registros observados dos fluxos de carbono da torre micrometeorológica, em doze ocasiões durante o período analisado.

As medições de reflectância espectral ocorreram a cerca de 10 metros acima do solo, em quatro direções (Norte, Sul, Leste e Oeste), ao redor da torre EC. Em cada data e área amostral, foram realizadas quatro leituras e em seguida calculada a média aritmética para cada coleta. Neste estudo, foram preferencialmente utilizados os dados de reflectância obtidos com o HandHeld, semelhantes ao comprimento de onda do MOD09GA, para cada banda do visível e infravermelho próximo. O pixel da torre foi empregado para extrair a refletância do MOD09GA.

### Obtenção e processamento de imagens orbitais

Os dados de refletância da superfície terrestre (MOD09GA) foram utilizados na pesquisa, envolvendo doze cenas durante o período analisado. As análises foram conduzidas no pixel que abrange a torre equipada com o sistema de vórtices turbulentos, uma vez que o

pixel estava completamente contido na área correspondente à caatinga preservada.

Os valores de pixel de MOD09GA de oito dias foram representados pela refletância, sendo selecionados pixels com ângulos de visualização ideais e impactos mínimos de sombra de nuvens ou nuvens. As séries temporais extraídas foram submetidas a garantia de Qualidade/Controle de Qualidade (QA/QC) para assegurar a qualidade do produto MOD09GA.

O MOD09GA consiste em sete bandas com resolução diária, apresentando valores de refletância da superfície com 500 m de resolução espacial no visível ( $\rho_1 = 620\text{--}670 \text{ nm}$ ;  $\rho_3 = 459\text{--}479 \text{ nm}$ ;  $\rho_4 = 545\text{--}565 \text{ nm}$ ), infravermelho próximo ( $\rho_2 = 841\text{--}876 \text{ nm}$ ;  $\rho_5 = 1230\text{--}1250 \text{ nm}$ ), e infravermelho médio ( $\rho_6 = 1628\text{--}1652 \text{ nm}$ ;  $\rho_7 = 2105\text{--}2155 \text{ nm}$ ).

### Calibração e validação dos modelos de Reco, NEE e GPP

As estimativas dos fluxos de carbono derivados das faixas espectrais do espectrorradiômetro portátil FieldSpec HandHeld foram criadas usando métodos estatísticos. Inicialmente, foram calculadas estatísticas descritivas, incluindo média, mediana e desvio padrão, para cada modelo desenvolvido. Além disso, análises de correlação e regressão linear múltipla foram conduzidas para estabelecer os modelos, considerando as reflectâncias do espectrorradiômetro e os fluxos de carbono provenientes da torre de Covariância de Vórtices Turbulentos.

### Modelo de Regressão Linear Múltipla

Análises de regressão linear múltipla (Equação 4) foram conduzidas usando o software SPSS®.

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (4)$$

Os modelos resultantes da regressão linear múltipla foram definidos pelas variáveis espectrais e fluxos de carbonos derivados da torre micrometeorológica (Tabela 1). A correlação foi obtida usando um nível de significância de 0,05, ou seja 95% de confiabilidade.

**Tabela 1** - Variáveis incluídas no modelo para estimativa da taxa de troca de dióxido de carbono em micromoles de CO<sub>2</sub> por metro quadrado por segundo ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

Variáveis dependentes	Variáveis independentes
Reco	$\rho$ 550 (Verde-Green)
	$\rho$ 775 (Infravermelho Próximo- NIR)
NEE	$\rho$ 470 (Azul)
	$\rho$ 775 (Infravermelho Próximo- NIR)
GPP	Reco
	$\rho$ 470 (Blue – Azul)
	$\rho$ 775 (Infravermelho próximo – NIR)
	NEE
	Reco

Fonte: Os autores (2024).

### Teste de Durbin - Watson

Os modelos de regressão linear múltipla foram ajustados com base na análise da aplicabilidade do teste Durbin-Watson (DW) (Equação 5), para avaliar a presença de autocorrelação nos resíduos e garantir a premissa de independência dos erros. Portanto, se o valor de DW for maior que o limite superior, não há autocorrelação; se for menor que o limite inferior, há autocorrelação positiva; e se estiver entre os dois limites, o teste é inconclusivo. Além disso, a normalidade da distribuição dos erros também foi verificada através da probabilidade do valor esperado.

O valor de Durbin-Watson (d) estatístico é dada pela fórmula apresentada na equação 5:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n \{e_i - (e_{i-1})\}^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (5)$$

### Fator de Inflação da Variância

Foi empregado o Fator de Inflação da Variância (VIF - Variance Inflation Factor), um índice que detecta a multicolinearidade no modelo de regressão (Equação 6).

$$FIV = \frac{1}{1-R_i^2} \quad (6)$$

O VIF é calculado para cada variável independente e uma pontuação elevada indica uma alta multicolinearidade, o que pode prejudicar a precisão dos coeficientes de regressão estimados. Em termos de escala, o VIF pode variar de 1 em diante, e valores maiores que 10 são frequentemente considerados indicativos de multicolinearidade problemática.

### Índice de Kappa

A confiabilidade dos resultados obtidos neste estudo foi analisada de acordo com os intervalos dos valores do Índice Kappa propostos por

Landis e Koch (1977). Esses intervalos são descritos na equação a seguir e são amplamente utilizados para avaliar a concordância entre os dados observados e os dados previstos.

$$Kappa = \frac{N * (\sum_{i=1}^r [x_{ii}] - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i}))}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad (7)$$

O Índice Kappa, é uma medida de concordância estatística entre observações reais e as previstas, varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1 o valor do Índice Kappa, maior é a exatidão da previsão em relação aos dados observados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base em critérios estatísticos, escolheu-se as variáveis espectrais que apresentaram a melhor correlação com o modelo, para a Respiração do Ecossistema (Reco), Fluxo Líquido do Ecossistema (NEE) e a Produtividade Primária Bruta. Análises de regressão utilizando diferentes faixas espectrais (Azul, Verde, Vermelho e Infravermelho Próximo - NIR) foram utilizadas para estimar Reco, NEE e GPP.

Alguns estudos têm empregado a regressão linear para avaliar Reco, NEE e GPP, por exemplo, Li *et al.* (2016) conduziram análises de regressão linear múltipla com conjuntos de parâmetros otimizados para gerar estimativas de GPP, Reco e NEE. Chu *et al.* (2018) investigaram a distribuição da precipitação e seus impactos sobre o NEE por meio de regressão linear. Zhang *et al.* (2019) avaliaram o desempenho fotossintético do ecossistema em três períodos de seca extrema em uma estepes semiárida da Mongólia, aplicando o GPP para a padronização de vários modelos de regressão linear.

### Modelo de regressão linear múltipla para estimativa do Reco

De acordo com os critérios escolhidos para a criação do modelo Reco, o resultado mais eficaz foi alcançado ao incorporar informações de duas faixas espectrais,  $\rho$  550 (Verde) e  $\rho$  775 (Infravermelho Próximo - NIR), como mostrado na Tabela 2. Essa abordagem permitiu uma melhor compreensão e previsão do Reco. Ressalta-se que a média da respiração do ecossistema em 2015 foi de  $1,91 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , com as percentagens de refletância no verde e infravermelho sendo, respectivamente, 8% e 22% (Tabela 2). Resultados similares foram encontrados no estudo de Flores-Rentería *et al.* (2023) em que realizaram no Deserto de Chihuahuan, no Nordeste do México, um estudo

utilizando a técnica de covariância de redemoinhos para investigar como os fatores ambientais afetam a troca de  $\text{CO}_2$  ao longo do ano, os resultados apontaram que a média anual da Reco foi de  $1,45 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Modelos baseados em refletância de superfície foram desenvolvidos para aprimorar a compreensão da Reco em diversos sítios, com o uso de índices espectrais (Lees *et al.*, 2018). De acordo com o estudo conduzido por Jägermeyr *et al.* (2014) os autores criaram um modelo de Reco utilizando a temperatura da superfície terrestre MODIS (LST) e o índice de vegetação aprimorado (EVI), os modelos utilizam a refletância do NIR. Wu *et al.* (2014) utilizaram o NDVI e o LST derivados do MODIS (tanto LST diurno quanto noturno) em sua capacidade de explicar as variações de Reco.

**Tabela 2** - Estatísticas descritivas das bandas espectrais  $\rho$  550 e  $\rho$  775, juntamente com a respiração do Ecossistema - Reco (em  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), derivados da torre de variância vórtices turbulentos e da refletância medida no dossel na área da Caatinga preservada em Petrolina - PE, no ano de 2015

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	N
Reco	1,91	1,19	15
$\rho$ 550	0,0848	0,03754	15
$\rho$ 775	0,2268	0,07618	15

Fonte: Os autores (2024).

Neste modelo específico, vale ressaltar que o coeficiente de correlação alcançou um valor considerável, apresentando  $r = 0,75$  e  $r^2 = 0,56$ , e demonstrando uma significância estatística inferior a 0,05. Estes resultados destacam de

maneira substancial o grau de associação existente entre a variável dependente Reco e as variáveis independentes  $\rho$  550 e  $\rho$  775, conforme apresentado detalhadamente na Tabela 3.

**Tabela 3** - Parâmetros estatísticos da regressão linear múltipla para desenvolvimento do modelo Reco ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) derivado do método de covariância de vórtices turbulentos para uma área de caatinga preservada em Petrolina - PE

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Alteração de R quadrado	Alteração F	Sig. Alteração o F	Durbin-Watson	kappa
1	0,75	0,56	0,49	0,81	0,56	0,56	0,05	1,347	0,25

Fonte: Os autores (2024).

O modelo Reco apresentou um erro padrão de  $0,81 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , indicando alta magnitude de erro. O teste de Durbin-Watson resultou em  $1,347 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  sinalizando autocorrelação positiva. Os valores baixos do VIF (Variance Inflation Factor) de 1,94 indicou a possibilidade de sobreajuste, podendo haver alguma variabilidade nas relações entre as variáveis, considerado aceitável, dado sua proximidade de 2 no intervalo de confiança de 95%, no entanto, a ausência de multicolinearidade foi evidenciada pela

tolerância de 0,51 (Tabela 4), o índice de Kappa foi 0,25 indicando concordância fraca sugerindo novas calibrações.

Há uma quantidade significativamente menor de modelos bem-sucedidos de Reco em comparação com o GPP, devido à maior dificuldade em explicar a variação entre ecossistemas, especialmente utilizando sensoriamento remoto (Jägermeyr *et al.*, 2014; Lees *et al.*, 2018).

**Tabela 4-** Coeficientes e indicadores de ajustamento do  $\rho$  550 e  $\rho$  775 do modelo Reco desenvolvido para estimar a respiração do ecossistema (Reco) na caatinga.

Modelo	Coeficientes	95,0% Intervalo de Confiança para B		Estatísticas de colinearidade	
		Limite inferior	Limite superior	Tolerância	VIF
(Constante)	1,336	-0,154	2,827		
1 $\rho$ 550	-30,631	-48,243	-13,020	0,516	1,940
$\rho$ 775	13,913	5,236	22,590	0,516	1,940

Fonte: Os autores (2024).

O valor previsto para cada observação é o valor intercepto, ou seja, a constante é igual a 1,336, mais o coeficiente de regressão do  $\rho$  550 é de -30,631 multiplicado pelo valor da independente, mais o coeficiente de regressão  $\rho$  775 que é de 13,913 multiplicado pelo valor da variável independente.

O modelo final desenvolvido, neste estudo, para estimativa do Reco ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

$$\text{Reco} = 1,336 + (-30,631) \times \rho \text{ 550} + 13,913 \times \rho \text{ 775} \quad (8)$$

Em que,  $\rho$  550 (verde) e  $\rho$  775 (Infravermelho Próximo – NIR) são as reflectâncias nas faixas 550 nm e 775 nm, respectivamente.

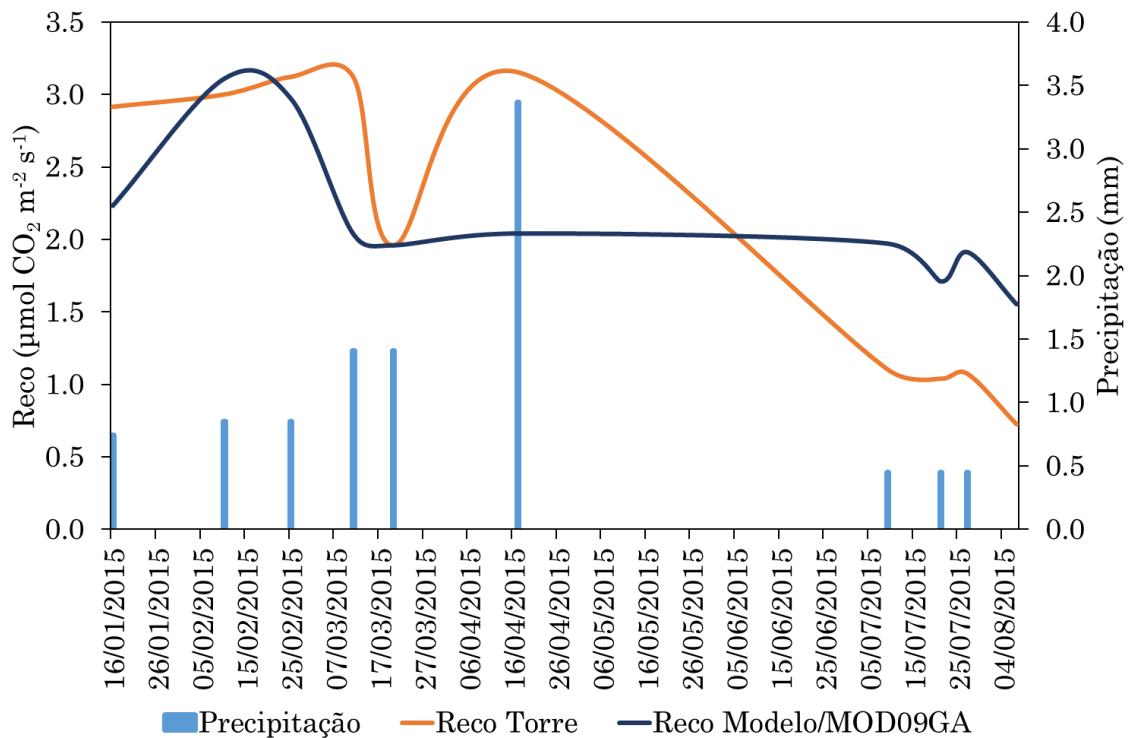
### Variabilidade temporal da Reco média diária

A avaliação da Respiração do Ecossistema (Reco) baseou-se na comparação dos dados de vórtices turbulentos medidos na área de Caatinga preservada ao longo de 2015. A Reco medida pelo Sistema de Vórtices Turbulentos (EC) apresentou uma média de 1,91  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , enquanto o modelo Reco desenvolvido e aplicado aos dados do sensor MOD09GA (Modelo Desenvolvido/MOD09GA) para o mesmo ano registrou uma média de 2,06  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Isso representa aproximadamente 93% de precisão na média do valor estimado em comparação com o valor observado na torre EC. Esses resultados indicam precisão do modelo

desenvolvido quando aplicado aos dados do MODIS.

Em 2015, um baixo volume pluviométrico indicou restrição à respiração dos ecossistemas semiáridos devido à escassez de água, limitando o Reco (Figura 2) (Jia *et al.*, 2020). Estudos globais realçaram os impactos da redução da precipitação, evidenciando uma correlação sazonal fraca ou ausente entre Reco (Gao *et al.*, 2015; Jia *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2020). O modelo desenvolvido neste estudo demonstrou eficácia em lidar com ecossistemas secos e períodos de redução de precipitação. As curvas sazonais de Respiração do Ecossistema (Reco) apresentaram padrões semelhantes durante a maior parte do período analisado (Figura 2), comparando valores observados na torre com estimativas do modelo aplicado aos dados do MODIS. A proximidade foi notável no período seco, enquanto houve afastamento no período chuvoso, é possível notar que o pico de precipitação no período entre vinte de março a dezessete de abril. As Chuvas mínimas podem estimular a liberação de CO<sub>2</sub>, especialmente pela respiração microbiana (Gao *et al.*, 2015; Jia *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2020). Durante déficits hídricos mais intensos, a transpiração das plantas é reduzida, levando a uma menor fotossíntese, perda de cobertura do dossel e aumento da exposição à radiação e insolação. Essas condições resultam em variações significativas de temperatura, redução de umidade e aumento da atividade microbiana, contribuindo para a perda de CO<sub>2</sub>.

Figura 2 - Variação temporal da Respiração do Ecossistema (Reco) derivada do sistema de vórtices turbulentos e do modelo desenvolvido aplicado aos dados do sensor MOD09GA (Modelo Desenvolvido/MOD09GA), juntamente com os registros de precipitação pluvial

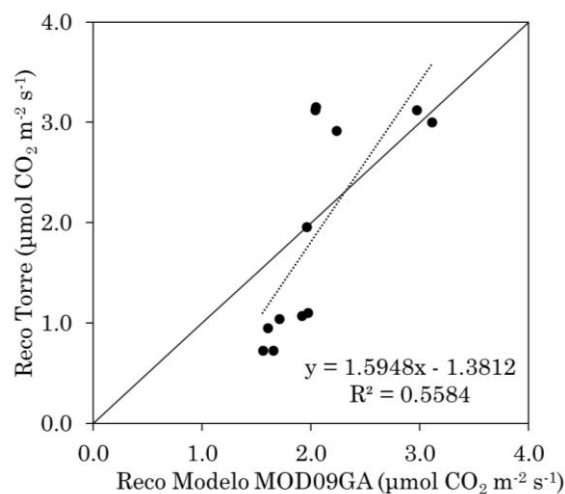


Fonte: Os autores (2024).

A Reco do modelo desenvolvido/MOD09GA não acompanhou a curva de precipitações, este modelo necessita de novas calibrações, no entanto, não existem modelos de Reco calibrados para a vegetação de Caatinga utilizando imagens orbitais, sendo possível utilizar esse modelo na ausência de um modelo melhor calibrado para esta vegetação. As análises estatísticas revelaram que é viável estimar com

considerável precisão a respiração do ecossistema utilizando dados de refletância da faixa do visível. Dessa forma, o modelo desenvolvido neste estudo desempenha um papel significativo na avaliação espacial e temporal da respiração do ecossistema em florestas tropicais secas, abrangendo diversas escalas, incluindo regional e local.

Figura 3 - Regressão Linear Simples entre a Respiração do Ecossistema - Reco derivada do sistema de vórtices turbulentos, da Reco do modelo desenvolvido/MOD09GA.



Fonte: Os autores (2024).



A validação/verificação do modelo desenvolvido neste estudo, utilizando dados do MODIS, revelou significância estatística ( $p < 0,04$ ) e um coeficiente de determinação de 0,5584 (Figura 3). Os dados estão bem distribuídos na linha de tendência, mas indicam uma tendência de sobrestimativa em relação aos dados da Torre, principalmente para Reco menor que  $2,0 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Essa sobrestimativa do MODIS pode estar associada à sua resolução espacial, que representa a média de um pixel de 500 metros. A Reco Modelo Desenvolvido/MOD09GA mostrou-se mais confiável, embora tenha superestimado os valores tanto na estação chuvosa quanto na estação seca, conseguindo capturar eficientemente a sazonalidade da precipitação na área de estudo.

É relevante destacar a escassez de dados observados ou estimados de Respiração do Ecossistema (Reco) por meio de sensoriamento

remoto. Enquanto existem vários modelos para estimar a Produção Primária Bruta (GPP) utilizando sensores orbitais, há uma limitada disponibilidade de métodos semelhantes para a estimativa de Reco, principalmente para a vegetação da Caatinga.

### *Modelo de regressão linear múltipla para estimativa do NEE*

Após diversas tentativas para criar o modelo de Fluxo Líquido do Ecossistema (NEE), o resultado mais eficaz foi alcançado ao utilizar duas faixas espectrais,  $\rho$  470 (Azul) e  $\rho$  775 (Infravermelho Próximo - NIR), juntamente com o Reco (Tabela 5). Vale observar que o fluxo líquido médio do ecossistema para o ano de 2015 foi de  $1,66 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , enquanto a refletância na faixa azul foi de 0,06% e no infravermelho foi de 22% no mesmo ano (Tabela 5).

**Tabela 5** – Estatísticas descritivas dos dados do modelo NEE, provenientes das bandas espectrais  $\rho$  470,  $\rho$  775 e dos fluxos de Reco  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  derivados vórtices turbulentos e da refletância medida no dossel na área da Caatinga preservada em Petrolina - PE, no ano de 2015

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	N
NEE	1,6605	0,43361	14
$\rho$ 470	0,0601	0,03481	14
$\rho$ 775	0,2246	0,07860	14
Reco	1,9100	1,19017	14

Fonte: Os autores (2024).

O modelo apresentou um coeficiente de correlação de  $r = 0,36$  e  $r^2 = 0,13$ , com um nível de significância inferior a 0,05. Esses resultados refletem o grau de associação entre a variável

dependente Reco e as variáveis independentes  $\rho$  470 e  $\rho$  775, o índice de Kappa foi 0,65 indicando concordância moderada (Tabela 6).

**Tabela 6** - Parâmetros estatísticos da regressão linear múltipla para desenvolvimento do modelo NEE ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) derivado do método de covariância de vórtices turbulentos para uma área de caatinga preservada em Petrolina - PE

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Alteração de R quadrado	Alteração o F	Sig. Alteração F	Durbin-Watson	Kappa
1	0,36	0,13	-0,23	0,79	0,13	0,35	0,78	2,43	0,65

Fonte: Os autores (2024).

Observa-se que o modelo de Fluxo Líquido do Ecossistema (NEE) desenvolvido demonstra boa capacidade de representação das estimativas, conforme indicado pelo VIF que variou entre 2,4

e 3,15 (Tabela 7). Nota-se que o modelo de NEE desenvolvido pode representar bem as estimativas, uma vez que o VIF esteve entre 2,4 e 3,15 (Tabela 7).

**Tabela 7** - Coeficientes e indicadores de ajustamento do  $\rho$  470,  $\rho$  775 e Reco ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) desenvolvido para estimar o fluxo líquido do ecossistema (NEE) na Caatinga.

Modelo	95,0% Intervalo de Confiança para B			Estatísticas de colinearidade	
	Coeficientes	Limite inferior	Limite superior	Tolerância	VIF
(Constante)	1,611	0,831	2,392		
1 $\rho$ 470	13,180	2,098	24,261	0,318	3,149
$\rho$ 775	-5,913	-10,198	-1,628	0,417	2,400
Reco	0,306	0,017	0,596	0,397	2,516

Fonte: Os autores (2024).

Os parâmetros e variáveis do modelo de NEE ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) desenvolvido neste estudo foram:

$$\text{NEE} = 1,611 + 13,180 \times \rho 470 + (-5,913) \times \rho 775 + 0,306 \times \text{Reco} \quad (9)$$

Em que, Reco é a respiração do ecossistema,  $\rho$  470 (azul),  $\rho$  775 (Infravermelho Próximo – NIR) são as reflectâncias no comprimento de onda de 470 nm e 775 nm, respectivamente.

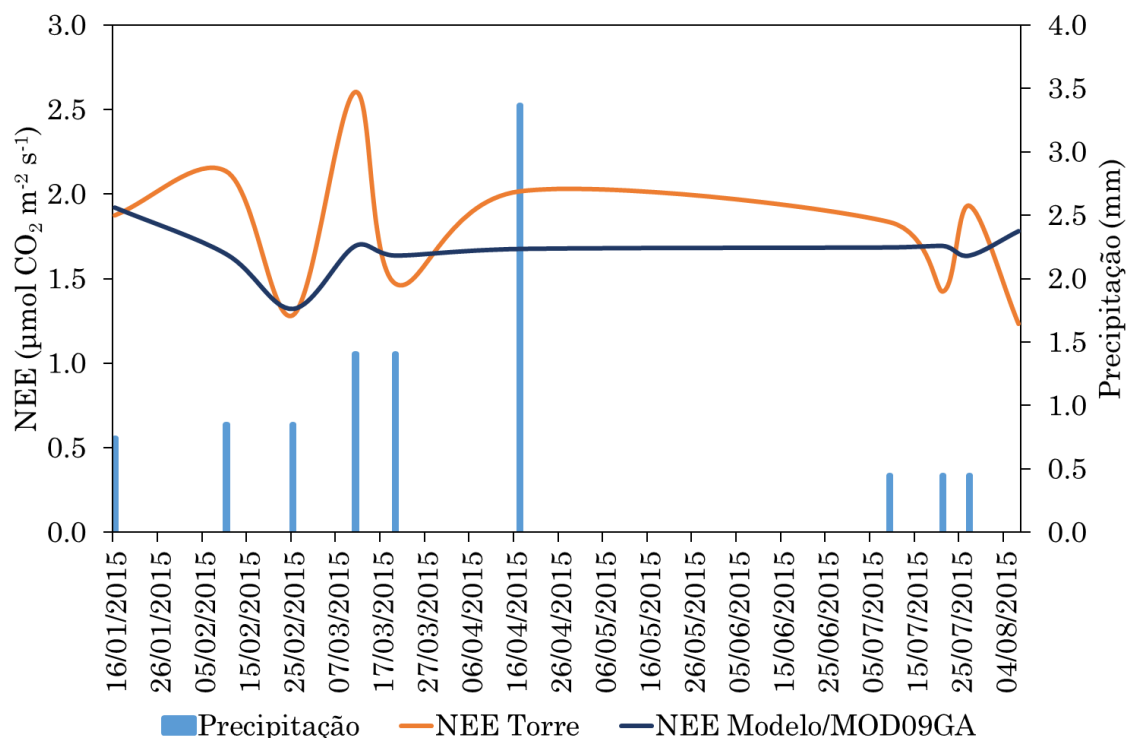
### Variabilidade temporal da NEE média diária

A avaliação do fluxo líquido do ecossistema (NEE) foi realizada comparando os dados

obtidos pelos vórtices turbulentos na área de Caatinga preservada durante o ano de 2015. Ao longo do ano, a NEE medida pelo Sistema de Vórtices Turbulentos apresentou uma média de  $1,6605 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , enquanto o modelo de NEE derivado da regressão registrou uma média de  $1,556 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Os resultados deste estudo estão em consonância com pesquisas em diversos ambientes semiáridos, como indicado por Silva, Galvêncio, Miranda, Moura (2024), que, após eventos de precipitação, registrou NEE de 1,4 e  $3,6 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para pastagem e Caatinga, respectivamente. A média anual variou entre  $-3,25 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para pastagem e  $-3,42 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para Caatinga.

Figura 4 - Variação temporal do Fluxo Líquido do ecossistema (NEE) derivada do sistema de vórtices turbulento e do modelo desenvolvido aplicado aos dados do sensor MOD09GA (Modelo Desenvolvido/MOD09GA), juntamente com os registros de precipitação pluvial.



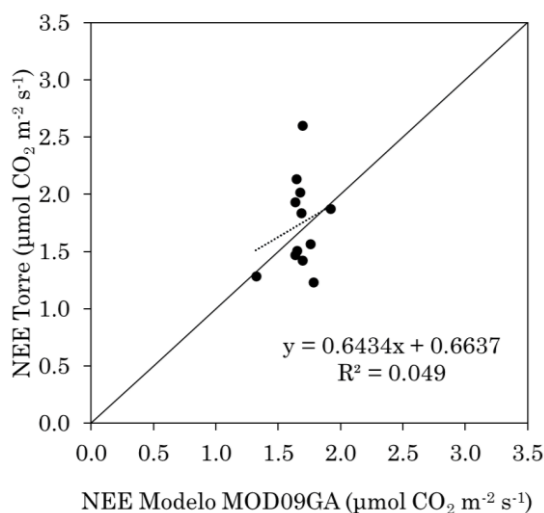
Fonte: Os autores (2024).

O modelo desenvolvido apresentou um padrão temporal consistente para a NEE, como ilustrado na Figura 4. É evidente que o modelo responde bem às variações em períodos de chuvas e secas mais regulares, embora tenha sido subestimado o valor extremo medido de  $2,6 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Em comparação com os dados observados pela Torre, a NEE modelada exibiu um padrão sazonal semelhante durante a maior parte do período analisado, com valores baixos em um fragmento preservado de Caatinga devido ao déficit de umidade do solo, impactando a vegetação, conforme observado em estudos anteriores (Mendes *et al.*, 2021; Pereira *et al.*,

2020; Silva; Lima; Antonino; Souza; De Souza; Silva; Alves, 2017).

A regressão linear simples entre a NEE do sistema de vórtices turbulentos e a NEE do Modelo Desenvolvido/MOD09GA para 2015 resultou em um coeficiente de determinação de 0,049 (Figura 5). A distribuição dos dados na linha de tendência mostra uma superestimativa no modelo NEE da Torre. Apesar das estatísticas consideradas fracas, é importante destacar que, devido à ausência de modelos calibrados para este ecossistema, o modelo desenvolvido pode ser útil até que uma compreensão mais aprofundada seja alcançada (Figura 5).

Figura 5 - Regressão Linear Simples entre a NEE derivada do sistema de vórtices turbulentos, da NEE derivada do modelo desenvolvido/MOD09GA.



Fonte: Os autores (2024).

### Modelo de regressão linear múltipla para estimativa da GPP

Dentre os testes para desenvolver o modelo de Produção Primária Bruta (GPP), o melhor resultado foi alcançado ao utilizar as variáveis independentes NEE, Reco,  $\rho$  470 (Azul) e  $\rho$  775 (Infravermelho Próximo - NIR). A estatística

descritiva dos dados de entrada, indicando uma média de  $0,8998 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para GPP,  $1,9100 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para Reco e  $1,6605 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para NEE. Além disso, a refletância na faixa azul foi de 6%, enquanto no infravermelho foi de 22%, ambos referentes ao ano de 2015 (Tabela 8).

**Tabela 8** - Estatísticas descritivas dos dados do modelo GPP, provenientes das bandas espectrais  $\rho$  470,  $\rho$  775 e dos fluxos de Reco e NEE  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  derivados vórtices turbulentos e da refletância medida no dossel na área da Caatinga preservada em Petrolina - PE, no ano de 2015.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	N
GPP	0,8998	0,84015	14
$\rho$ 470	0,0601	0,03481	14
$\rho$ 775	0,2246	0,07860	14
Reco	1,9100	1,19017	14
NEE	1,6605	0,43361	14

Fonte: Os autores (2024).

Para o modelo GPP foi obtida uma correlação muito alta,  $r = 0,97$ , e  $r^2 = 0,95$  (Tabela 9). Com nível de significância de  $< 0,00$ . O modelo obteve o erro padrão de 0,20, ou seja, considerado baixo.

O índice de Kappa foi calculado como 0,65, indicando uma concordância moderada entre os dados observados e os dados previstos (Tabela 9).

**Tabela 9** - Parâmetros estatísticos da regressão linear múltipla para desenvolvimento do modelo GPP ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) derivado do método de covariância de vórtices turbulentos para uma área de caatinga preservada em Petrolina - PE

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Alteração de R quadrado	Alteração F	Sig. Alteração F	Durbin-Watson	Kappa
1	0,97	0,95	0,94	0,20	0,95	52,4	0,00	2,43	0,64

Fonte: Os autores (2024).

O VIF demonstrou que o modelo pode estimar a GPP de forma muito precisa, como mostrado na Tabela 10. Além disso, não foi identificada nenhuma multicolinearidade no modelo, o que confirma a robustez das estimativas.

O modelo de GPP ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) desenvolvido neste estudo foi:

$$GPP = 0,284 + 1,947 \times \rho 775 + (-5,598) \times \rho 470 + 0,551 \times Reco + (-0,323) \times NEE \quad (10)$$

Em que,  $\rho 470$  (azul) e  $\rho 775$  (infravermelho próximo - NIR) são as reflectâncias nas faixas espectrais de 470 nm e 775 nm, respectivamente.

**Tabela 10** - Coeficientes e indicadores de ajustamento do  $\rho 470$ ,  $\rho 775$  e Reco ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) do modelo desenvolvido para estimar a Produtividade Primária Bruta (GPP) na caatinga.

Modelo	Coeficientes	95,0% Intervalo de Confiança para B		Estatísticas de colinearidade		
		Limite inferior	Limite superior	Tolerância	VIF	
1	Constante	0,284	-0,530	1,098		
	$\rho 470$	-5,598	-14,142	2,947	0,187	5,360
	$\rho 775$	1,947	-1,585	5,479	0,214	4,670
	Reco	0,551	0,337	0,764	0,255	3,914

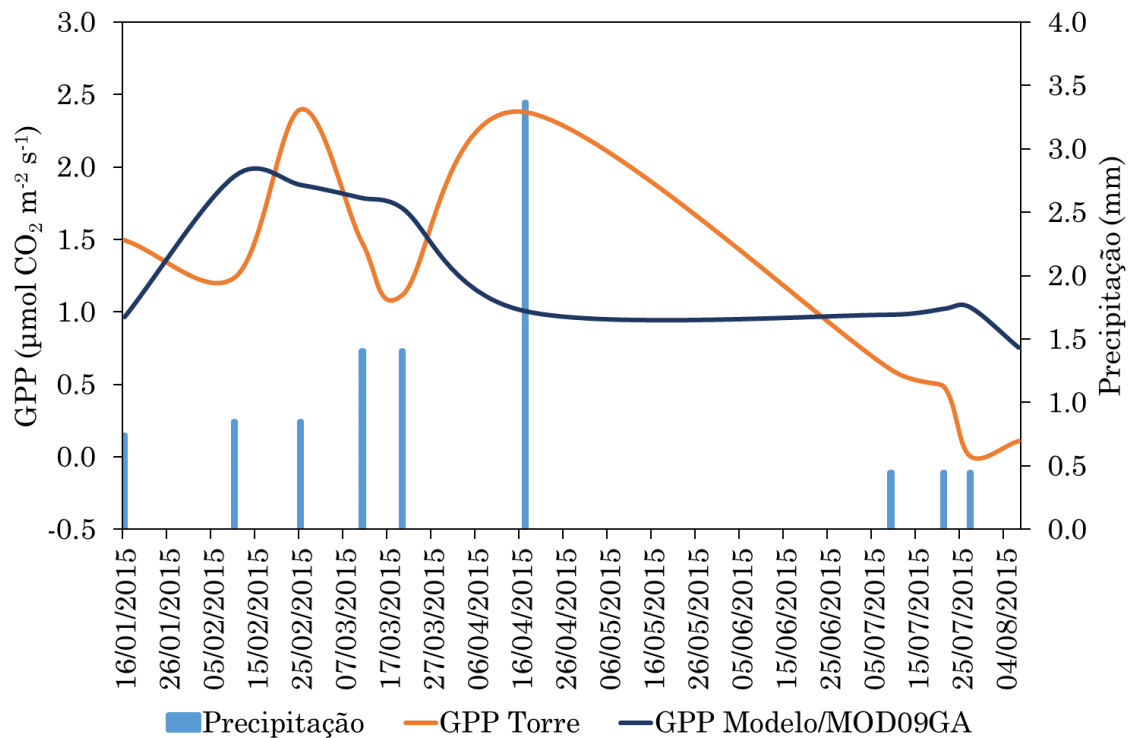
Fonte: Os autores (2024).

### Variabilidade temporal da GPP diária

A GPP foi avaliada por meio da comparação dos dados de vórtices turbulentos, medidos na área de Caatinga preservada durante o ano de 2015.

A GPP medida pelo Sistema de Vórtices Turbulentos apresentou uma média de  $0,8998 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , enquanto o modelo de GPP desenvolvido pela regressão demonstrou uma média de  $1,1380 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Figura 6 - Variação temporal do GPP derivada do sistema de vórtices turbulento e da Reco derivada modelo desenvolvido aplicado aos dados do sensor MOD09GA - Modelo Desenvolvido/MOD09GA e precipitação pluvial.



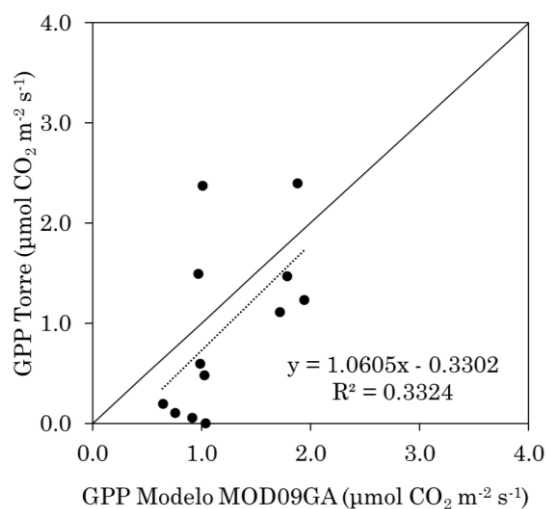
Fonte: Os autores (2024).

A GPP exibiu um padrão sazonal semelhante durante a maior parte do período analisado. Durante a estação chuvosa de janeiro a março, a GPP do Modelo Desenvolvido/ MOD09GA não acompanhou bem as chuvas, respondendo mais lentamente, em relação a GPP da Torre, que teve uma assimilação mais lenta após as precipitações de janeiro a março. Este atraso na resposta às chuvas observado no Modelo Desenvolvido/ MOD09GA é consistente com estudos em ambientes áridos e semiáridos (Hao *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2020). Em abril, apesar do aumento da pluviosidade, as estimativas de GPP do Modelo Desenvolvido/MOD09GA diminuiu, estendendo-se até junho. Durante esses meses, ambos seguiram um padrão sazonal semelhante, mas a GPP do Modelo Desenvolvido/MOD09GA superestimou a GPP da Torre. A falta de chuvas nesse período resultou em estresse hídrico,

sendo o principal fator para a redução na assimilação da GPP. No geral, o Modelo Desenvolvido/MOD09GA superestimou os valores, na estação seca, mas conseguiu capturar bem a sazonalidade da precipitação na área de estudo (Figura 6).

A análise de regressão simples entre a GPP da Torre e a GPP do Modelo Desenvolvido/MOD09GA para o ano de 2015 revelou um coeficiente de correlação de  $r=0,3324$  (Figura 7). Esses resultados estão alinhados com pesquisas realizadas em várias regiões do mundo. No estudo conduzido por Maselli *et al.* (2017) na Ilha de Pianosa, foi identificada uma tendência média baixa de GPP ( $0,11 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ). Além disso, em um estudo realizado por (Morais, 2019) no sítio da Embrapa Semiárido - Brasil, a análise da GPP registrada pelo EC durante o período de 2011 a 2015 indicou uma média de  $1,91 \pm 2,31 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .

Figura 7 - Regressão Linear Simples entre a Produção Primária Bruta- GPP derivada do sistema de vórtices turbulentos, da Produção Primária Bruta - GPP derivada Modelo desenvolvido/MOD09GA.



Fonte: Os autores (2024).

Quando se avaliaram os modelos de GPP e os comparou com a GPP de referência derivada do sistema de vórtices turbulentos, observou-se que o modelo desenvolvido a partir de reflectâncias *in situ* apresentou resultados superiores no padrão sazonal da região, destacando-se com uma presença mais significativa no valor da GPP.

## CONCLUSÕES

Os fluxos de carbono e a respiração do ecossistema na Caatinga são essenciais para abordar os desafios ambientais atuais nesta significativa região semiárida. Nesse estudo evidenciam, dentre outros aspectos, a importância de modelos calibrados para este tipo específico de vegetação e clima, visando representar as estimativas de Reco, NEE e GPP do ecossistema da caatinga.

As variáveis que apresentaram melhor correlação com os dados medidos e observados foram para a estimativa da GPP e NEE, enquanto o Reco mostrou ser menos representativo, indicando a necessidade de aprimoramentos, mas é possível considerar sua utilização, na ausência de um modelo de Reco melhor calibrado.

As diferenças observadas entre os dados medidos pelo do sistema de vórtice turbulento e os estimados por meio do Modelo desenvolvido/MOD09GA de Reco, NEE e GPP, na estação chuvosa, com ênfase ao mês de abril, é possível observar que as estimativas foram menos precisas, evidenciando a necessidade de calibrar modelos com dados meteorológicos,

destaca-se que a precipitação desempenha um papel crucial na capacidade da Caatinga de capturar CO<sub>2</sub>.

O uso do conjunto de dados terrestre e orbitais das bandas do sensor MODIS/Terra (MOD09GA) apresentou sobrestimação podendo estar associada à sua resolução espacial, que representa a média de um pixel de 500 metros. No entanto, os resultados dos modelos se apresentaram bem melhores do que os até então existentes para estimativas de produção primária bruta e respiração de ecossistema secos, em especial no bioma Caatinga.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco-FACEPE pelo auxílio financeiro do processo n<sup>o</sup>: IBPG-0030-9.25/18. À Embrapa Semiárido pela disponibilização dos dados de campo. Ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento - SERGEO, e a Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Austrália, v. 22, n.6, p.711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BORGES, C. K.; DOS SANTOS, C. A.; CARNEIRO, R. G.; DA SILVA, L. L.; DE

- OLIVEIRA, G.; MARIANO, D.; SILVA, M. T.; DA SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G.; PEREZ-MARIN, A. M.; DE MEDEIROS, S. S. **Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid region**, Bethesda, v. 192, p. 524-542, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08484-y>
- CERQUEIRA, D. B.; WASHINGTON FRANCA-ROCHA. Relationship between vegetation types and CO<sub>2</sub> flow in the Caatinga Biome: Case study in Rio de Contas - Ba. **Proceedings XIII Brazilian Symposium on Remote Sensing**, Florianópolis, p. 2413–2419, 2007. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.00.29/doc/2413-2419.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2024
- CHU, X.; HAN, G.; XING, Q.; XIA, J.; SUN, B.; YU, J.; LI, D. Dual effect of precipitation redistribution on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a coastal wetland in the Yellow River Delta. **Agricultural and Forest Meteorology**, Guelph, v. 249, p. 286–296, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.002>
- FLORES-RENTERÍA, D.; DELGADO-BALBUENA, J.; CAMPUZANO, E. F.; CURIEL YUSTE, J. Seasonal controlling factors of CO<sub>2</sub> exchange in a semiarid shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico. **Science of The Total Environment**, Amsterdam v. 858, n. 3, p. 159918, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159918>
- GAO, Y.; YU, G.; LI, S.; YAN, H.; ZHU, X.; WANG, Q.; S.H.I, P.; ZHAO, L.; LI, Y.; ZHANG, F.; WANG, Y.; ZHANG, J. A remote sensing model to estimate ecosystem respiration in Northern China and the Tibetan Plateau. **Ecological Modelling**, Texas, v. 304, p. 34–43, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.03.001>
- HAO, Y.; WANG, Y.; MEI, X.; CUI, X. The response of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange to small precipitation pulses over a temperate steppe. **Plant Ecology**, v. 2, p. 335–347, 2010. <https://doi.org/10.1007/S11258-010-9766-1>
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapas cartográficos: IBGE, 2000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 10 maio, 2023.
- JÄGERMEYR, J.; GERTEN, D.; LUCHT, W.; HOSTERT, P.; MIGLIAVACCA, M.; NEMANI, R. A high-resolution approach to estimating ecosystem respiration at continental scales using operational satellite data. **Global Change Biology**, v. 20, n. 4, p. 1191–1210, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12443>
- 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. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2022.100897>
- JIA, X.; MU, Y.; ZHA, T.; WANG, B.; QIN, S.; TIAN, Y. 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136210>
- KIILL, L. H. P. **Characterization of the vegetation of the Embrapa Semiarid legal reserve**. 1. Ed. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172951/1/SDC281.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2023
- LANDIS J. R.; KOCH G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**. Washington, p. 159 – 174, v. 33, n. 1, 1977. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- LEES, K. J.; QUAIFFE, T.; ARTZ, R. R. E.; KHOMIK, M.; CLARK, J. M. Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands – A review. In **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 615, p. 857–874, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.103>
- LI, Q.; XIA, J.; SHI, Z.; HUANG, K.; DU, Z.; LIN, G.; LUO, Y. Variation of parameters in a Flux-Based Ecosystem Model across 12 sites of terrestrial ecosystems in the conterminous USA. **Ecological Modelling**, Texas, v. 336, p. 57–69, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.05.016>
- LIU, J. F.; CHEN, S. P.; HAN, X. G. Modeling gross primary production of two steps in Northern China using MODIS time series and climate data. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, p. 742–754, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.068>
- LLOYD, J.; TAYLOR, J. A. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. **Functional Ecology**, v. 8 n. 3, p. 315-323, 1994. <https://doi.org/10.2307/2389824>
- MASELLI, F.; VACCARI, F. P.; CHIESI, M.; ROMANELLI, S.; D'ACQUI, L. P. Modeling and analyzing the water and carbon dynamics of Mediterranean macchia by the use of ground and remote sensing data. **Ecological Modeling**, v. 351, p. 1–13, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.012>
- MENDES, K. R.; CAMPOS, S.; MUTTI, P. R.; FERREIRA, R. R.; RAMOS, T. M.; MARQUES, T. V.; REIS, J. S.; VIEIRA, M. M DE L.; SILVA, A. C. N.; MARQUES, A. M. S.; SILVA, D. T. C., SILVA, D. F.; OLIVEIRA, C. P.; GONÇALVES, W. A.; COSTA, G. B.; POMPELLI, M. F.; MARENCO, R. A, ANTONINO, A. C. D.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, C. M. S. E. Assessment of SITE for CO<sub>2</sub> and Energy Fluxes

- Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). **Forests**, v. 12, p. 86, 2021. <https://doi.org/10.3390/F12010086>
- MIRANDA, R. Q.; NÓBREGA, R. L. B.; MOURA, M. S. B.; RAGHAVAN, S.; GALVÍNIO, J. D. Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 101992, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101992>
- MORAIS, Y. C. **Spatial and temporal variation of gross primary production in the caatinga biome**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). UFPE, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33940>. Acesso em: 01 nov, 2019.
- MOURA, M. S. B.; GALVÍNIO, J. D. G.; BRITO, L. T. L.; SOUZA, L. S. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, T. G. F. Climate and rainwater in the Semi-Arid. In: BRITO, L.T. L.; MOURA, M. S. B.; GAMA, G.F.B (org.). **Potentialities of rainwater in the Brazilian Semi-Arid**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/159649/1/OPB1515.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2022.
- PEREIRA, M. P. S.; MENDES, K. R.; JUSTINO, F.; COUTO, F.; SILVA, A. S.; SILVA, D. F.; MALHADO, A. C. M. Brazilian Dry Forest (Caatinga) Response To Multiple ENSO: the role of Atlantic and Pacific Ocean. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135717, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135717>
- PRAKASH. S.; D., SHANKAR, B.; RANJAN PARIDA, B. Machine learning approach to predict terrestrial gross primary productivity using topographical and remote sensing data. **Ecological Informatics**, v. 70, p. 101697, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101697>
- REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; PAPAIE, D.; AUBINET, M.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; BUCHMANN, N.; GILMANOV, T.; GRANIER, A.; GRÜNWARD, T.; HAVRÁNKOVÁ, K.; ILVESNIEMI, H.; JANOUS, D.; KNOHL, A.; LAURILA, T.; LOHILA, A.; LOUSTAU, D.; MATTEUCCI, G.; VALENTINI, R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 9, n. 11, p. 1424–1439, 2005. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2005.001002.X>
- SILVA, J. N. B.; GALVÍNIO, J. D.; MIRANDA, R. D. Q.; MOURA, M. S. B. Temporal and spatial estimation of the performance of calibrated regression models for carbon fluxes in the Caatinga Seasonally Dry Tropical Forest area. **Revista Da Casa Da Geografia de Sobral (RCGS)**, v. 26, n. 1, p. 183–206, 2024. <https://doi.org/10.35701/rcgs.v26.975>
- SILVA, J. N. B.; GALVÍNIO, J. D.; MIRANDA, R. D. Q.; MOURA, M.S.B. Models of Gross Primary Productivity in seasonally dry tropical forest areas, using reflectance data from caatinga vegetation. **Brazilian Journal of Physical Geography**, v. 14, p. 3775–3784, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3775-3784>
- SILVA, J. N. B.; SILVA, J. L. B.; SANTOS, A. M.; SILVA, A. C.; GALVÍNIO, J. D. Vegetation Index as a Subsidy in the Identification of Areas With Potential for Desertification. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4 n. 2, p. 358–367, 2017. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1469.358-367>
- SILVA, J. N. B.; GALVÍNIO, J. D.; SILVA, J. L. B.; SOARES, G. A. S.; SILVA, J. F. B. Analysis of the spatial distribution of carbon fluxes in the caatinga ecosystem. **Brazilian Journal of Remote Sensing**, v. 123, p. 115–123, 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11332937>
- SILVA, P. F.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; DE SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>
- SILVA, J. N. B.; GALVÍNIO, J. D.; SILVA, J. L. B.; SOARES, G. A. S.; TIBURCIO, I. M.; BARROS, J. P. F. G. Estimates of carbon sequestration by different methods in forest ecosystems: an approach to the seasonally dry tropical forest (Caatinga). **Brazilian Journal of the Environment**, v. 93, p. 75–93, 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11267197>
- SUN, J.; ZHOU, T. C.; LIU, M.; CHEN, Y. C.; LIU, G. H.; XU, M.; SHI, P. L.; PENG, F.; TSUNEKAWA, A.; LIU, Y.; WANG, X. D.; DONG, S. K.; ZHANG, Y. J.; LI, Y. N. 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, p. 50–64, 2020. <https://doi.org/10.1111/geb.13006>
- TABARELLI, M.; LEAL, I. R.; SCARANO, F. R.; SILVA, J. M. C. Caatinga: legacy, trajectory and challenges towards sustainability. **Science and Culture**, n. 70, v. 4, p. 25–29, 2018. <https://doi.org/10.21800/2317-66602018000400009>
- THE R FOUNDATION. **A: The R Project for Statistical Computing**. 2018. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 10 maio, 2023.
- VAIDYA, S.; SCHMIDT, M.; RAKOWSKI, P.; BONK, N.; VERCH, G.; AUGUSTIN, J.; SOMMER, M.; HOFFMANN, M. A novel robotic chamber system allowing to accurately and precisely determine spatio-temporal CO<sub>2</sub> flux dynamics of heterogeneous croplands.



**Agricultural and Forest Meteorology**, v. 296, p. 108206, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108206>

WANG, L.; ZHU, H., LIN, A.; ZOU, L.; QIN, W.; DU, Q. Evaluation of the Latest MODIS GPP Products across Multiple Biomes Using Global Eddy Covariance Flux Data. **Remote Sensing**, n. 9 v. 5, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9050418>

WU, C.; GAUMONT-GUAY, D.; ANDREW BLACK, T.; JASSAL, R. S.; XU, S.; CHEN, J. M.; GONSAMO, A. Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 94, p. 80–90, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.018>

XUE, Y.; LIANG, H.; ZHANG, H.; YIN, L.; FENG, X. Quantifying the policy-driven large scale vegetation restoration effects on evapotranspiration over drylands in China. **Journal of Environmental Management**, n. 345, p. 118723, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118723>

ZHANG, X.; ZHANG, F.; QI, Y.; DENG, L.; WANG, X.; & YANG, S. New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV). **International Journal of Applied Earth Observation and**

**Geoinformation**, v. 78, p. 215–226, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2019.01.001>

ZHOU, Y.; LI, X.; GAO, Y.; HE, M.; WANG, M.; WANG, Y.; ZHAO, L., LI, Y. Carbon fluxes response of an artificial sand-binding vegetation system to rainfall variation during the growing season in the Tengger Desert. **Journal of Environmental Management**, v. 266, p. 110556, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110556>

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Joélia Natália Bezerra da Silva: Conceitualização, Curadoria dos dados, Análise dos dados, Redação do manuscrito original, Recebimento de financiamento.

Rodrigo de Queiroga Miranda: Análise de dados, Curadoria de dados.

Gabriel Antônio Silva Soares: Design da apresentação de dados.

Magna Soelma Beserra de Moura: Metodologia, Disponibilização de ferramentas.

Josiclêda Domiciano Galvêncio: Supervisão, Validação de dados e experimentos.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.