



Análise espaço-temporal do fluxo de CO₂ em florestas Semidecidual e Decidual na Bahia

Ana Júlia Santos BRITO ^{*1}, Odair Lacerda LEMOS ², Jacqueline Lavinscky Costa MORAIS ², Juliana Santos Abrantes SILVA ², Talita Queiroz COELHO ², Ingrid Thalia Prado de CASTRO ², Lucas da Costa FONSECA ³, Roberta Aparecida FANTINEL ¹

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.

² Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, Brasil.

³ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil.

*E-mail: anabritopiata@gmail.com

Submetido em: 03/05/2025; Aceito em: 04/07/2025; Publicado em: 05/08/2025.

RESUMO: O estudo analisou o fluxo de CO₂ em duas formações florestais na Bahia (Decidual e Semidecidual), utilizando o sensoriamento remoto como método não destrutivo. Durante o crescimento, as florestas assimilam carbono pela fotossíntese, e na maturidade o estabilizam em suas estruturas. Para investigar variações temporais no fluxo de carbono, foram usadas imagens dos satélites Landsat 8 (2013–2018) e Sentinel 2 (2019–2022), escolhidas conforme a cobertura de nuvens. As análises foram feitas separando o ano em dois períodos: seco (abril a setembro) e chuvoso (setembro a abril), com imagens contendo até 30% de nuvens. Os índices espectrais NDVI e PRI foram aplicados para estimar os fluxos de CO₂, enquanto dados de temperatura e precipitação foram obtidos via NASA Power. A análise estatística foi realizada com o teste t, usando Excel e XLSTAT. Observou-se um fluxo positivo de CO₂ ao longo dos dez anos em ambas as áreas, indicando emissão líquida de carbono para a atmosfera. A floresta da Mata de Cipó apresentou maior emissão (0,412) que a FLONA (0,303). O padrão de fluxo variou entre estações e anos, sendo influenciado por temperatura e precipitação. Apesar das diferenças fisionômicas, ambas as florestas apresentaram correlação positiva entre si.

Palavras-chave: gases de efeito estufa; sensoriamento remoto; Caatinga; emissões de carbono; monitoramento ambiental.

Space-time analysis of CO₂ flux in semideciduous and deciduous forests in Bahia

ABSTRACT: The study analyzed CO₂ flux in two forest types in Bahia, Brazil (Deciduous and Semideciduous), using remote sensing as a non-destructive monitoring method. Forests absorb carbon through photosynthesis during growth and stabilize it during maturity. To examine temporal variations in carbon flux, satellite images from Landsat 8 (2013–2018) and Sentinel-2 (2019–2022) were used, selected based on cloud coverage. Analyses considered two seasonal periods: dry (April to September) and wet (September to April), using images with up to 30% cloud cover. The NDVI and PRI spectral indices were applied to estimate CO₂ fluxes, while temperature and precipitation data were obtained from NASA Power. Statistical analysis was performed using the t-test with Excel and XLSTAT. A positive CO₂ flux was observed over the 10 years in both study areas, indicating a net release of carbon from vegetation to the atmosphere. The Mata de Cipó forest exhibited higher emissions (0.412) compared to the FLONA (0.303). Flux patterns varied between seasons and years, influenced by temperature and precipitation. Despite their different physiognomies, both forests showed a positive correlation with each other.

Keywords: greenhouse gases; remote sensing; caatinga; carbon emissions; environmental monitoring.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com as mudanças climáticas no planeta Terra vem crescendo nas últimas décadas, principalmente em decorrência das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases, como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) (NUNES et al., 2023). Entre esses gases, o CO₂ tem recebido atenção especial por seu papel significativo no aumento do efeito estufa, devido à sua capacidade de reter a radiação refletida pela superfície terrestre (GUERRERO et al., 2024).

Neste contexto, o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem provocado alterações tanto na paisagem terrestre quanto na atmosfera, como a aceleração do encolhimento do ambiente glacial, o aumento das temperaturas médias dos oceanos (Araujo et al., 2018), intensificando a necessidade de estratégias que visem à redução dessas emissões.

O principal processo natural que influencia o efeito estufa é o sequestro de CO₂, no qual o dióxido de carbono

atmosférico é convertido em biomassa por meio da fotossíntese. As florestas desempenham um papel fundamental nesse processo, pois, ao longo de seu crescimento, absorvem carbono e o armazenam em suas estruturas vegetais. Estudos indicam que cerca de 50% da biomassa das florestas é composta por carbono (Shimamoto et al., 2014), ressaltando sua importância como sumidouros naturais de carbono (WRI BRASIL, 2021).

Dessa forma, as florestas desempenham um papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas, atuando como importantes sumidouros de carbono, ao absorverem cerca de 25% das emissões anuais de CO₂ provenientes de atividades humanas (GALILEU, 2024). No entanto, sua degradação tem efeitos negativos significativos, especialmente no que se refere à absorção e liberação de CO₂ (SILVA et al., 2022), uma vez que o desmatamento e a degradação florestal liberam o carbono armazenado na biomassa das árvores de volta à atmosfera (INSTITUTO CARBONO ZERO, 2024).

Para monitorar, quantificar e estimar estoques e fluxos de CO₂ em espécies florestais, existem métodos de análise destrutiva (abate de árvores) e não destrutiva (processamento digital de imagens). Os métodos destrutivos demandam muito esforço durante a execução para análise (Qureshi et al., 2012), já o uso do sensoriamento remoto (SR) vem sendo um método bastante utilizado e eficiente (GOMES et al., 2021b).

Diane da crescente busca por métodos mais ágeis e não invasivos, o SR tem se destacado como uma alternativa promissora para o monitoramento de estoques e fluxos de CO₂ em espécies florestais. Essa tecnologia permite a obtenção de informações detalhadas com menor esforço e maior eficiência, conectando a necessidade de análises precisas à facilidade de aplicação prática.

O SR consiste em um conjunto de técnicas para adquirir dados e identificar características específicas da superfície terrestre ou de objetos sem a necessidade de contato direto (BARROS; JUNIOR, 2023). SR é baseado na interação da energia ou radiação eletromagnética (REM) com o alvo, no qual este contém sua própria assinatura eletromagnética (MORAES, 2002). Segundo Rodríguez-Veiga et al. (2017), a utilização de dados por meio de sensores remotos orbitais é um método promissor, pois reduz o tempo e o custo em comparação a outros métodos, oferece avaliação rápida e incorpora a variabilidade da floresta em uma escala regional de estoque e fluxo de carbono.

Na utilização do SR, pesquisadores desenvolveram índices espectrais de vegetação (IVs) com o objetivo de monitorar e quantificar as condições espaciais das vegetações, baseando-se em dados de reflectância espectral da radiação eletromagnética (COSTA; LIMEIRA, 2022).

Os IVs são equações matemáticas geradas por algoritmos por meio de imagens dos sensores (MORAES, 2021). Exemplos de IVs amplamente empregados incluem o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o PRI (*Photochemical Reflectance Index*); quando combinados, permitem a obtenção de outro índice, denominado CO₂flux. O CO₂flux é utilizado para quantificar o sequestro de carbono, viabilizando o mapeamento da vegetação com atividade fotossintética (SILVA; ANJOS, 2021).

Nesse contexto, compreender as dinâmicas do sequestro de carbono em diferentes tipos de florestas é fundamental para a formulação de estratégias de conservação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Assim, o presente estudo teve como objetivo analisar as alterações espectrais

relacionadas ao fluxo de CO₂ em uma floresta estacional Decidual e em uma floresta Semidecidual localizadas no Estado da Bahia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em duas áreas distintas. A primeira localizada no município de Vitória da Conquista, região centro-sul da Bahia, que apresenta um clima tropical de altitude, do tipo Cwb (Köppen), com uma altitude de 891 m. No verão, as temperaturas frequentemente alcançam 30-32°C, ao passo que, durante o inverno, tornam-se mais amenas, podendo situar-se entre 10-15°C. O período de chuvas é mais concentrado no verão, de novembro a março, enquanto o inverno é mais seco. A precipitação anual média é de cerca de 900 a 1.000 mm, mas pode variar significativamente de ano para ano. A floresta dessa região é classificada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) como Floresta Estacional Semidecidual Montana, conhecida regionalmente como Mapa de Cipó (Figura 1).

Para delimitação da área de estudo, foi utilizado o software livre QGIS, versão 3.34.12 Desktop, com as funções de adição do vetor do tipo linha, classificado segundo o satélite presente no software.

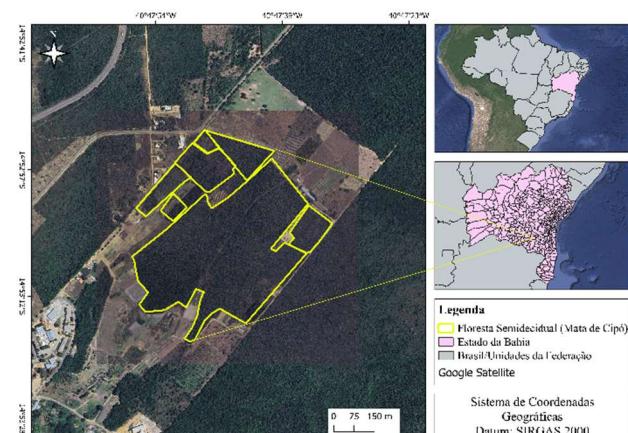


Figura 1. Localização da área de estudo, Florestal Estacional Semidecidual Montana.

Figure 1. Location of the study area, Montane Seasonal Semideciduous Forest.

A segunda área localiza-se no município de Contendas do Sincorá (Figura 2), região sudoeste da Bahia, a qual compartilha características climáticas similares à Vitória da Conquista. Está situada em uma área de transição entre a Caatinga e o Cerrado. Possui clima semiárido do tipo BSh (Köppen), com uma estação chuvosa mais concentrada e uma estação seca prolongada. Durante o verão, as temperaturas podem ultrapassar os 30°C, enquanto os invernos podem ser mais amenos, com mínimas em torno de 15-20°C. A precipitação anual geralmente fica em torno de 600-800 mm, com período chuvoso concentrado entre os meses de novembro e março, e a estação seca, caracterizada por baixa precipitação, ocorre nos meses de abril a outubro.

O limite da área de estudo foi obtido no portal de dados do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO, 2020), que possui os limites oficiais das Unidades de Conservação Federais. As áreas de estudo estão localizadas no Bioma Caatinga, que se destaca

por suas características climáticas singulares quando comparadas a outros biomas. Segundo a classificação de Köppen, o clima é identificado como BSh, o que significa um clima semiárido extremamente quente, com baixa precipitação e com distribuição irregular. Exibe uma diversidade em sua fisionomia, especialmente em relação à densidade e ao tamanho das plantas (SILVA et al., 2017).

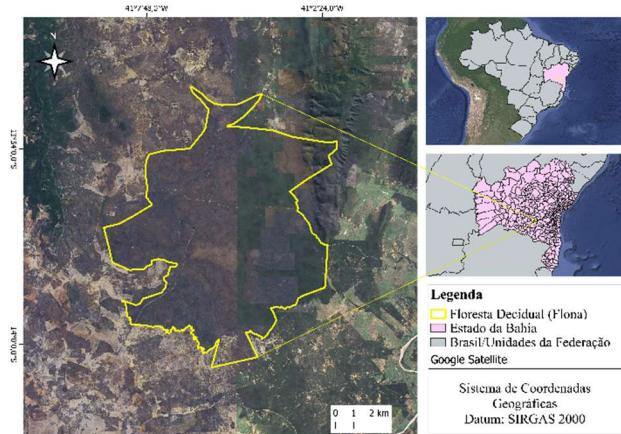


Figura 2. Localização da área de estudo, Florestal Estacional Decidual Montana.

Figure 2. Location of the study area, Montane Seasonal Deciduous Forest.

2.2. Imagens de Satélite

Para essa pesquisa foram utilizadas imagens do sensor Landsat 8 (LS8), que possui bandas multiespectrais com resolução espacial de 30 metros, abrangendo o período de 2013 a 2018, e imagens do sensor Sentinel 2 (S2), que contém bandas multiespectrais com resolução de 10 metros, abrangendo o período de 2019 a 2022. Optou-se por utilizar os dois sensores em virtude da falta de imagens de um único satélite, devido à presença de nuvens na área do estudo, para as épocas analisadas, impossibilitando assim a construção de uma série temporal consistente apenas com um único satélite.

A diferença de resolução espacial entre os sensores pode, de fato, influenciar a detecção de elementos na paisagem, uma vez que sensores com maior resolução (como o Sentinel-2) captam detalhes mais finos, enquanto sensores de menor resolução (como o Landsat 8) tendem a representar médias dentro de cada pixel, suavizando a variabilidade espacial. Contudo, diversos estudos confirmam que Landsat 8 e Sentinel-2 possuem alta compatibilidade espectral, apresentando fortes correlações na geração de índices como NDVI e EVI, com R^2 superiores a 0,90 (CHEN et al., 2018; AREKHI et al., 2019; LI et al., 2022).

Foi realizada uma seleção de cenas entre os meses de 20 de abril e 20 de setembro, representando os meses secos, e de 21 de setembro a 20 de abril, representando os meses chuvosos, com uma porcentagem de nuvens de até 30% nas imagens. No banco de dados da Floresta Estacional Semideciduosa (Mata de Cipó) entraram as seguintes quantidades de imagens (Tabela 1).

Essas regiões foram escolhidas por apresentarem uma diferença na sua fisionomia. A porcentagem de árvores caducifólias nas Florestas Estacionais Semideciduais fica entre 20% e 50%, enquanto nas Florestas Estacionais Decíduas esse valor é de aproximadamente 50% (POLETTI et al., 2023). No banco de dados da Floresta Nacional de Contendas do Sincorá (FLONA) entraram as seguintes quantidades de imagens (Tabela 2).

Tabela 1. Número de imagens selecionadas no banco de dados da Mata de Cipó para época seca e chuvosa em seus respectivos anos.
Table 1. Number of images selected from the Mata de Cipó database for the dry and rainy seasons across their respective years.

Ano	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Total
Seca	7	6	5	9	3	3	20	30	26	22	131
Chuva	4	5	15	4	11	6	30	21	13	4	113
Total	11	11	20	13	14	9	50	51	39	26	244

Tabela 2. Número de imagens selecionadas no banco de dados da Floresta Nacional Contendas do Sincorá para época seca e chuvosa em seus respectivos anos.
Table 2. Number of images selected from the Contendas do Sincorá National Forest database for the dry and rainy seasons across their respective years.

Ano	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Total
Seca	7	7	5	8	2	4	10	11	16	13	83
Chuva	1	5	9	8	5	7	18	15	6	2	76
Total	8	12	14	16	7	11	28	26	22	15	159

2.3. Pré-Processamento de imagens

Para análise do CO₂Flux na vegetação, foi utilizada a integração de dois índices espectrais, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Equação 1) e o PRI (*Photochemical Reflectance Index*) (Equação 2). O índice NDVI é expresso pela razão entre as bandas espectrais na região do vermelho (R) e do infravermelho próximo (NIR). Já o PRI é expresso pela razão entre a feição de absorção no azul (B) e o pico de reflectância do verde (G), conforme as equações abaixo:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR}-\text{R}}{\text{NIR}+\text{R}} \quad (01)$$

$$\text{PRI} = \frac{\text{B}-\text{G}}{\text{B}+\text{G}} \quad (02)$$

Os valores do PRI são apresentados de forma negativa, sendo necessário transformá-los para valores positivos a fim de normalizar a vegetação verde e corrigir a fração iluminada no uso da luz durante a fotossíntese, gerando o índice sPRI (*Photochemical Reflectance Index rescaled for positive values*), conforme a Equação 3 (SASAGAWA et al., 2022).

$$\text{sPRI} = \text{PRI} + \frac{1}{2} \quad (03)$$

O CO₂Flux (Equação 4) mede a eficiência do sequestro de carbono pela vegetação, e a capacidade da planta de realizar esse processo depende da sua atividade fotossintética (SILVA; ANJOS, 2021). Sua estimativa foi obtida pela seguinte equação:

$$\text{CO}_2\text{Flux} = \text{NDVI} \times \text{sPRI} \quad (04)$$

Os dados foram processados na plataforma do Google Earth Engine (GEE), mediante script e posteriormente exportados em forma de tabelas os valores do índice. Para a confecção dos mapas utilizou-se o software QGIS. Os dados de precipitação e temperatura foram obtidos por meio do site NASA Power, no qual os parâmetros meteorológicos são derivados do modelo de assimilação GMAO MERRA-2 da NASA e do GEOS 5.12.4 FP-IT, que são processados diariamente e anexados ao final da série temporal diária e são atualizados a cada mês (NASA POWER, 2021).

2.3. Análise estatística

Após a obtenção dos dados dos fluxos de CO₂, precipitação e temperatura, realizou-se o teste de ANOVA - normalidade para averiguar se existe diferença significativa (*p*-valor < 0,05). Posteriormente, foi realizado o teste de Tukey e a linha de tendência R² no XLSTAT e no Excel para analisar a correlação dos dados entre si.

3. RESULTADOS

A partir das imagens espectrais adquiridas, foram gerados os resultados para os fluxos de CO₂. Além disso, os dados de precipitação (mm) e temperatura (°C) foram obtidos por meio do banco de dados do NASA Power (Tabelas 1 e 2). Ressalta-se que ambas estão divididas de acordo com os satélites utilizados. Na qual os primeiros valores estão relacionados ao Landsat e os abaixo, ao Sentinel.

Analizando a Tabela 3, observa-se que nos anos de 2013, 2017, 2019 e 2022, quando comparados às duas épocas estudadas, a seca foi a que obteve o maior valor de CO₂Flux (0,562, 0,672, 0,253, 0,273, respectivamente). Isso pode ser

explicado pelo fato de que, nesse intervalo, a temperatura foi inferior (21,24, 19,97, 21,54 e 21,05°C, respectivamente) ao período chuvoso, com 23,01, 23,59, 24,64 e 23,05°C, influenciando a taxa fotossintética da vegetação.

Os demais anos ainda na Tabela 3, o valor máximo foi registrado na estação chuvosa, sendo para a Mata de Cipó 2014 (0,563 na chuva e 0,500 na seca), 2015 (0,514 na chuva e 0,474 na seca), 2016 (0,464 na chuva e 0,458 na seca), 2018 (0,586 na chuva e 0,480 na seca) e 2021 (0,279 na chuva e 0,216 na seca). Já para a FLONA (Tabela 4), com exceção de 2022, todos os demais anos obtiveram maiores índices na estação chuvosa. Esse fenômeno é característico da caatinga devido à irregularidade nos índices pluviométricos e, consequentemente, às variações de temperatura (TROVÃO et al., 2007). Observando os valores mais baixos dos fluxos de CO₂ nas florestas, tem-se que, utilizando o Landsat 8, para a mata de Cipó, houve um menor valor de 0,458 e 0,464 no ano de 2016 para os períodos estudados (Tabela 3). Enquanto que para a FLONA, o menor foi de 0,229 em 2013 durante o período seco e 0,409 em 2018 no chuvoso (Tabela 4).

Tabela 3. Resultados de CO₂Flux, Precipitação (mm) e temperatura (°C) durante o período seco e chuvoso para os respectivos anos estudados para a Floresta Semidecidual Montana - Mata de Cipó.

Table 3. CO₂ flux, precipitation (mm), and temperature (°C) results during the dry and rainy seasons for the respective years studied in the Montane Semideciduous Forest – Mata de Cipó.

LANDSAT 8									
	SECA			CHUVA			MÉDIA E TOTAL		
ANO	CO ₂ Flux	P(mm)	T(°C)	CO ₂ Flux	P(mm)	T(°C)	CO ₂ Flux	P(mm)	T(°C)
2013	0,562	200,38	21,24	0,525	416,60	23,01	0,543	616,98	22,13
2014	0,500	89,65	21,24	0,563	458,79	23,43	0,532	548,44	22,24
2015	0,474	126,56	21,70	0,514	290,03	25,02	0,494	416,59	22,36
2016	0,458	125,56	21,71	0,464	442,97	23,64	0,460	569,53	22,68
2017	0,672	295,32	19,97	0,581	479,89	23,59	0,627	722,47	21,78
2018	0,480	121,29	21,03	0,586	395,51	24,19	0,553	601,18	22,61
SENTINEL 2									
2019	0,253	168,75	21,54	0,217	374,42	24,63	0,235	564,26	23,09
2020	0,230	295,31	20,83	0,281	374,42	24,05	0,226	669,26	22,44
2021	0,216	162,71	21,42	0,279	751,28	23,51	0,247	913,99	22,47
2022	0,273	142,29	21,05	0,167	514,38	23,05	0,220	656,67	22,05

Tabela 4. Resultados de CO₂Flux, Precipitação (mm) e temperatura (°C) durante o período seco e chuvoso para os respectivos anos estudados para a Floresta decidual - FLONA.

Table 4. CO₂ flux, precipitation (mm), and temperature (°C) results during the dry and rainy seasons for the respective years studied in the Deciduous Forest – FLONA.

LANDSAT 8									
	SECA			CHUVA			MÉDIA E TOTAL		
ANO	CO ₂ Flux	P(mm)	T(°C)	CO ₂ Flux	P(mm)	T(°C)	CO ₂ Flux	P(mm)	T(°C)
2013	0,267	110,75	23,33	0,516	478,00	24,90	0,392	511,53	24,12
2014	0,229	94,92	23,23	0,487	532,62	24,57	0,358	627,54	23,90
2015	0,272	152,93	22,15	0,468	406,05	26,40	0,370	528,98	24,78
2016	0,350	36,90	23,65	0,605	358,60	25,59	0,477	385,50	24,62
2017	0,399	71,10	22,12	0,431	432,48	25,16	0,415	503,52	23,64
2018	0,402	84,37	22,92	0,409	516,80	25,57	0,405	601,17	24,25
SENTINEL 2									
2019	0,134	79,10	23,42	0,162	479,87	26,12	0,148	558,97	24,77
2020	0,198	179,30	22,43	0,204	432,42	25,47	0,201	611,72	23,95
2021	0,140	94,98	23,60	0,196	911,19	24,57	0,168	1006,17	24,09
2022	0,112	459,83	21,69	0,078	429,93	24,12	0,095	889,76	22,91

Utilizando o Sentinel 2, na Mata de Cipó, obtém-se um menor valor de 0,216 no período seco para o ano de 2021 e 0,167 em 2022 para o período chuvoso. Já para a FLONA, no período seco o menor valor foi de 0,112 e para o período

chuvisco, 0,078, ambos no ano de 2022. A seguir, os resultados das médias totais do CO₂Flux para as duas áreas estudadas (Mata de Cipó e FLONA) durante o período seco e chuvoso.

Tabela 5. Média total do CO₂Flux para a Mata de Cipó e FLONA durante os dois períodos estudados e os respectivos anos.

Table 5. Mean CO₂ flux for Mata de Cipó and FLONA during the two study periods and their respective years.

Período	Mata de Cipó	Flona
Seco	0,4118	0,2503
Chuvoso	0,4177	0,3556
Média Total	0,415	0,303

Apesar das diferenças na resolução espacial entre os sensores Landsat 8 (30 m) e Sentinel-2 (10 m), estudos têm demonstrado alta consistência nas séries temporais desses sensores, principalmente na estimativa de variáveis relacionadas à vegetação e à biomassa florestal. Arekhi et al. (2019) e Puliti et al. (2020) destacaram a alta correlação espacial e temporal entre os dois sensores e que a sua integração permite avaliações confiáveis em seus estudos. Embora as análises desses autores não tenham sido diretamente relacionadas ao fluxo de CO₂, os resultados permitem constatar a confiabilidade na relação dos sensores Landsat 8 e Sentinel-2.

Foi realizada a correlação do CO₂Flux com a temperatura dos anos de 2013 a 2022 durante o período seco e chuvoso na Mata de Cipó utilizando o Satélite Landsat 8 (Figura 3A e 3B). No qual os valores de 2013 a 2018 obtiveram resultados negativos, já 2019 a 2022 uma correlação positiva entre o CO₂Flux e a temperatura, ou seja, quando há um alto CO₂Flux, a temperatura também está alta.

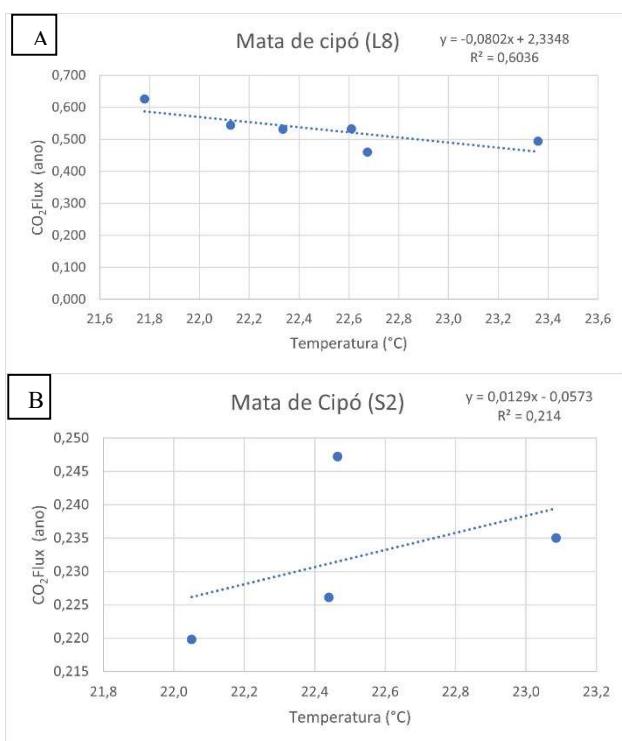


Figura 3. Correlação do CO₂Flux com a temperatura dos anos de 2013 a 2018 durante o período seco e chuvoso na Mata de Cipó utilizando o satélite Landsat 8 (A). Correlação do CO₂Flux com a temperatura dos anos de 2019 a 2022 durante o período seco e chuvoso na Mata de Cipó utilizando o Sentinel-2 (B).

Figure 3. Correlation between CO₂Flux and temperature from 2013 to 2018 during the dry and rainy seasons in Mata de Cipó, using Landsat 8 satellite data (A); Correlation between CO₂Flux and temperature from 2019 to 2022 during the dry and rainy seasons in Mata de Cipó, using Sentinel-2 (B).

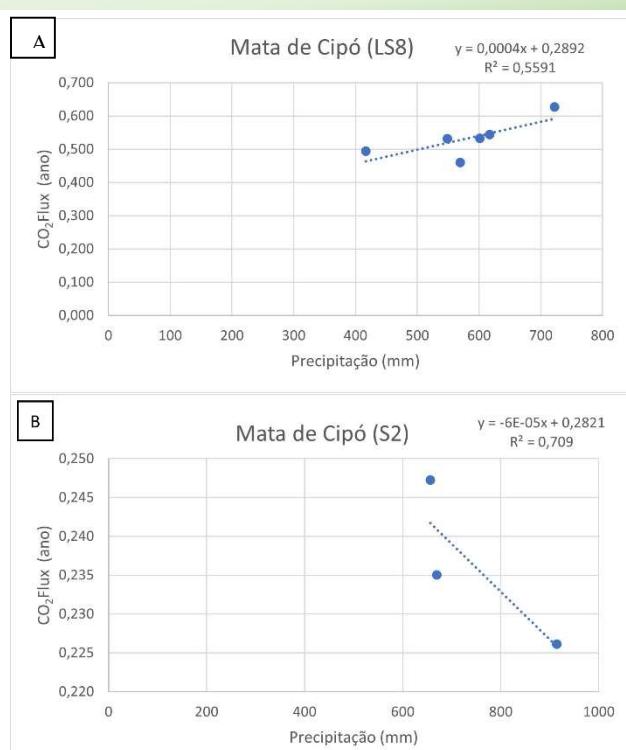


Figura 4. Correlação do CO₂Flux com a precipitação dos anos de 2013 a 2018 durante o período seco e chuvoso na Mata de Cipó utilizando o Landsat-8 (A); Correlação do CO₂Flux com a precipitação dos anos de 2019 a 2022 durante o período seco e chuvoso na Mata de Cipó utilizando o Sentinel-2 (B).

Figure 4. Correlation between CO₂Flux and precipitation from 2013 to 2018 during the dry and rainy seasons in Mata de Cipó, using Landsat-8 (A); Correlation between CO₂Flux and precipitation from 2019 to 2022 during the dry and rainy seasons in Mata de Cipó, using Sentinel-2 (B).

A seguir, estão apresentadas as Figuras 4A e 4B que mostram a correlação entre o CO₂Flux e a precipitação para o período de estudo. A correlação do CO₂Flux com a temperatura para a FLONA durante os anos de 2013 a 2022 foi positiva, ou seja, altos fluxos estão associados a altas temperaturas (Figura 5A e 5B).

Para a correlação do índice com a precipitação para a FLONA, o comportamento é negativo, quanto maior a precipitação, menor será o CO₂Flux, observando uma alta correlação para os anos de 2013 a 2018 (76%) e baixa para os anos de 2019 a 2022 (44%) (Figura 6A e 6B). Além disso, observa-se que o CO₂Flux para as duas florestas possui uma correlação positiva entre si (Figura 7), constatando que ambas contêm características parecidas no fluxo de carbono, no qual, quando o fluxo está alto em uma, também estará alto na outra.

Realizou-se o teste t de Student a 5% de probabilidade e foi constatada a diferença estatística do CO₂Flux para as duas florestas por meio do valor de p, uma vez que este foi menor que o valor de significância estabelecido.

4. DISCUSSÃO

Os fluxos de CO₂ observados são representados por valores que refletem a assimilação de CO₂ pelo processo fotossintético no ecossistema e valores que remetem à transferência de CO₂ para a atmosfera por meio da respiração (OLIVEIRA et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2023). Sendo assim, valores positivos nos fluxos de CO₂ sugerem que há

Análise espaço-temporal do fluxo de CO₂ em florestas semidecidual e decidual na Bahia

emissões de carbono da vegetação para a atmosfera, decorrentes da respiração das plantas. Enquanto números negativos indicam que o carbono está sendo assimilado da atmosfera para a vegetação, devido à fotossíntese em ação (OLIVEIRA et al., 2006).

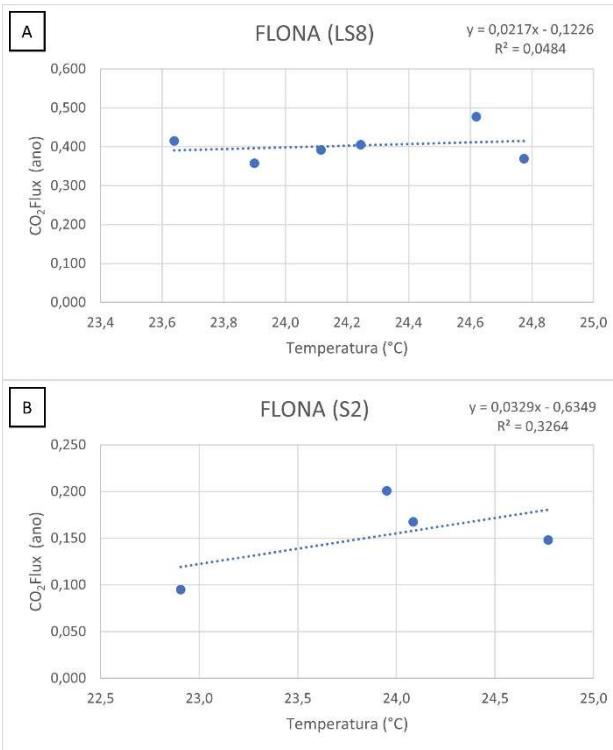


Figura 5. Correlação do CO₂Flux com a temperatura dos anos de 2013 a 2018 durante o período seco e chuvoso na FLONA, utilizando o Landsat-8 (A); Correlação do CO₂Flux com a temperatura dos anos de 2019 a 2022 durante o período seco e chuvoso na FLONA, utilizando o Sentinel-2 (B).

Figure 5. Correlation between CO₂Flux and air temperature from 2013 to 2018 during the dry and rainy seasons in FLONA, using Landsat-8 (A); Correlation between CO₂Flux and air temperature from 2019 to 2022 during the dry and rainy seasons in Mata de Cipó, using Sentinel-2 (B).

Gomes et al. (2021a) também constataram que, em épocas nas quais a temperatura está elevada, há um menor valor de CO₂Flux. Constatado e explicado também por Oliveira et al. (2006) e Santos et al. (2023) que na vegetação da Caatinga há mais emissão do CO₂ no período seco, sendo um indicador de baixa atividade fotossintética, justificando-se pelo fato da fotossíntese ser minimizada em função do caráter caducifólio da vegetação e devido à queda das folhas da vegetação, possui uma diminuição da atividade metabólica do ecossistema nesse período.

Outra explicação destacada por Gomes et al. (2021b) é que devido ao alto índice pluviométrico que obtiveram para a época chuvosa, há uma influência nas plantas xerófitas que são arbustivas e arbóreas, regenerando sua área foliar durante essa estação e resultando em um aumento na absorção e consequentemente aumento no fluxo de carbono, visto que parte desse elemento é extraído da atmosfera e usado em vários processos vitais das plantas.

Pela vegetação da Caatinga necessitar de uma adaptação durante o período seco, para evitar perda de água pela respiração (SANTOS et al., 2023). Oliveira et al. (2006) demonstram que a taxa de liberação de CO₂ torna-se nula

devido ao fechamento dos estômatos e à perda das folhas como resultado do déficit hídrico, sendo destacada também por Santos et al. (2012). Sendo uma característica da vegetação caducifólia, às vezes age como uma fonte, outras vezes atua como um dreno (OLIVEIRA et al., 2023).

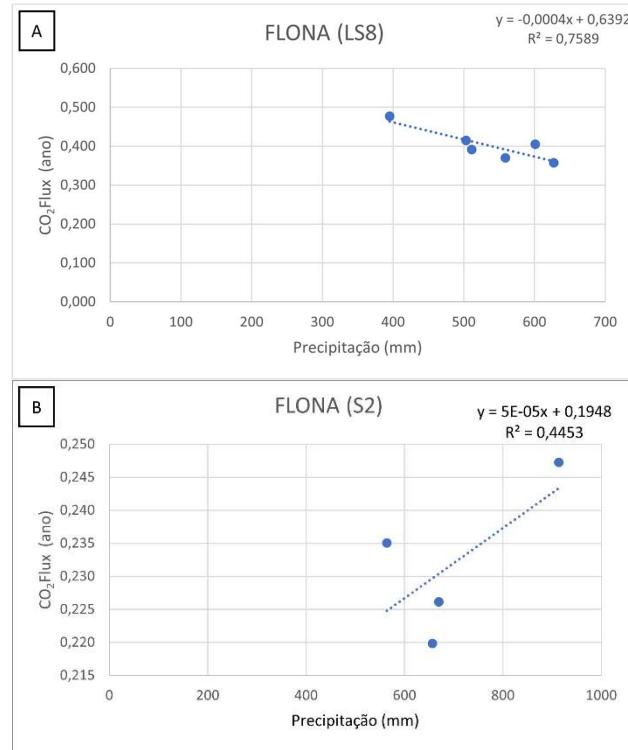


Figura 6. Correlação do CO₂Flux com a precipitação dos anos de 2013 a 2018 durante o período seco e chuvoso na FLONA utilizando o Landsat-8 (A); Correlação do CO₂Flux com a precipitação dos anos de 2019 a 2022 durante o período seco e chuvoso na FLONA utilizando o Sentinel-2 (B).

Figure 6. Correlation between CO₂Flux and precipitation from 2013 to 2018 during the dry and rainy seasons in FLONA, using Landsat-8 (A); Correlation between CO₂Flux and precipitation from 2019 to 2022 during the dry and rainy seasons in FLONA, using Sentinel-2 (B).

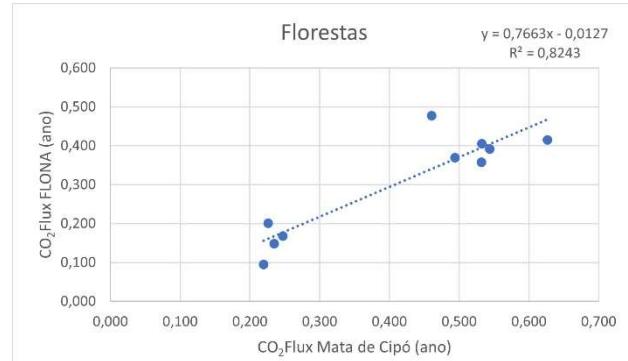


Figura 7. Correlação entre o CO₂Flux da Mata de Cipó e o CO₂Flux da FLONA dos anos de 2013 a 2022, utilizando o Landsat-8 e Sentinel-2.

Figure 7. Correlation between CO₂Flux in Mata de Cipó and CO₂Flux in FLONA from 2013 to 2022, using Landsat-8 and Sentinel-2.

Conforme descrevem Santos et al. (2012), as folhas desempenham um papel importante nas atividades fotossintéticas, contribuindo para a absorção de CO₂ e

emissão de O₂ na atmosfera. Assim, as análises realizadas permitem inferir que os valores positivos indicaram que houve emissões de carbono da vegetação para a atmosfera, decorrentes da respiração das plantas. Dessa maneira, mediante médias das florestas estudadas, tem-se que a Mata de Cipó obtém uma maior liberação de CO₂ com 0,415, enquanto a FLONA obteve uma média de 0,303, conforme destacado na Tabela 5.

Segundo a correlação de dados realizada, os valores de 2013 a 2018 obtiveram uma correlação negativa entre o CO₂Flux e a temperatura para a Mata de Cipó, ou seja, quando há um alto CO₂Flux, a temperatura está mais baixa (Figura 3). Gharun et al. (2025) observam que, em temperaturas elevadas, o fluxo de CO₂ pelas plantas diminui devido ao aumento da taxa de respiração e ao fechamento dos estômatos.

Analizando o CO₂Flux em relação à precipitação para a Mata de Cipó, observa-se uma correlação positiva entre esses parâmetros, ou seja, quando o CO₂Flux é alto, a precipitação também é elevada nos anos de 2013 a 2018 (Figuras 5 e 6). López-Ballesteros et al. (2016) destacaram que, em ecossistemas semiáridos, pulsos de precipitação, especialmente de pequena e média intensidade, resultam em aumentos significativos nas emissões de CO₂ do solo nos dias subsequentes ao evento de chuva, exercendo um impacto relevante no ciclo anual de carbono.

Analizando as Figuras 3B, 4A, 5A, 5B, 6B, observou-se que houve uma correlação positiva entre o CO₂Flux, a temperatura e a precipitação, ou seja, quando há um alto CO₂Flux, também há uma elevada temperatura e precipitação. Esse padrão de correlação positiva entre fluxo de CO₂, temperatura e precipitação também foi identificado por Raich; Schlesinger (1992), em uma análise global das trocas de carbono entre solo e atmosfera.

Já nas Figuras 3A, 4B e 6A apresentaram comportamento inverso, com correlação negativa: quanto maior a precipitação, menor o CO₂Flux. Esse padrão pode ser explicado por limitações fisiológicas ou microbiológicas associadas ao excesso de umidade no solo, o que é comum em florestas sazonais secas. Estudos realizados em áreas de Caatinga confirmam esse comportamento. Melo et al. (2024), ao analisarem fragmentos de floresta sazonalmente seca no semiárido paraibano, observaram que altos níveis de umidade do solo, associados à precipitação, provocaram redução nos fluxos de CO₂ do solo.

De forma semelhante, Mendes et al. (2020), utilizando torre de fluxo em ecossistema de Caatinga no Seridó, identificaram redução na emissão de CO₂ durante períodos úmidos, sugerindo que a atividade respiratória da vegetação e do solo pode ser restrinida em condições de saturação hídrica. Costa et al. (2023) também observaram esse padrão na área de Caatinga semiárida, onde a alta umidade inibiu a atividade microbiana responsável pela respiração do solo.

5. CONCLUSÕES

O índice espectral para as duas florestas estudadas se comporta de maneira diferente com relação aos parâmetros de temperatura e precipitação.

Apesar de serem floresta Decidual e Semidecidual (fisionomias diferentes), possuem uma correlação positiva entre elas, demonstrando a semelhança para fluxos de CO₂.

Apesar da discrepância observada entre os valores do índice de fluxo de CO₂ quando utilizados os dois satélites, é

importante destacar que os dados utilizados neste estudo mantêm sua validade científica. A principal diferença entre os dois sensores está na resolução espacial (30 metros no Landsat e 10 metros no Sentinel), o que pode gerar variações nos valores extraídos, especialmente em áreas heterogêneas ou com cobertura vegetal complexa.

Ainda assim, a metodologia adotada garantiu a consistência interna das análises, respeitando as particularidades de cada sensor e aplicando os devidos ajustes na extração dos índices.

Em ambas as florestas, o uso de sensoriamento remoto multiespectral permitiu identificar a dinâmica dos fluxos de CO₂ para as áreas de estudo (mata de cipó e FLONA).

5. REFERÊNCIAS

- ARAUJO, I. L.; COSTA, H. K. M.; MAKUCH, Z. Climate change review and the CCS technology contribution to the climate mitigation challenges. *Ambiente e Sociedade*, v. 25, p. 1-18, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210036r1vu2022L2OA>
- AREKHI, M.; SHARIFI, A.; SHARIFI, M. A. Comparative evaluation of the spectral and spatial consistency of Sentinel-2 and Landsat-8 OLI data for Igneada Longos Forest. *Remote Sensing*, v. 11, n. 5, e573, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11050573>
- BARROS, P. H. B.; JUNIOR, A. M. F. Combinando Inteligência Artificial e imagens de satélite para a previsão de sinistros agrícolas: Uma nota, *Revista Brasileira de Economia*, v. 77, n. 1, e012023, 2023. <https://doi.org/10.5935/0034-7140.20230001>
- CHEN, J.; LIU, T.; XU, H.; LI, W. A preliminary investigation on comparison and transformation of Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLII-3, p. 2619-2624, 2018. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-2619-2018>
- COSTA, A. da S.; LAMEIRA, O. A. O uso do NDVI derivado das imagens Pléiades na análise da estrutura da vegetação em dois fragmentos florestais. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1, e54711124170, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24170>
- COSTA, C. R. G.; LIMA, R. A.; MOURA, J. M. A.; LIMA, A. M. N. Temporal dynamics of CO₂ efflux and litter deposition in a dry tropical forest in the Brazilian semi-arid region. *Revista Valore*, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2023.
- GALILEU. Mudanças climáticas ameaçam o sequestro de carbono nas florestas, diz estudo. *Revista Galileu*, 2024. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/um-sol-planeta/noticia/2024/01/mudancas-climaticas-ameacam-sequestro-de-carbono-nas-florestas-diz-estudo.ghtml>. Acessado em: 03 Mai. 2025.
- GHARUN, M.; SHEKHAR, A.; HÖRTNAGL, L.; KREBS, L.; ARRIGA, N.; MIGLIAVACCA, M.; ROLAND, M.; GIELEN, B.; MONTAGNANI, L.; TOMELLERI, E.; SIGUT, L.; PEICHL, M.; ZHAO, P.; SCHMIDT, M.; GRUNWALD, T.; KORKIAKOSKI, M.; LOHILA, A.; BUCHMANN, N. Impact of winter warming on CO₂ fluxes in evergreen needleleaf forests. *Biogeosciences*, v. 22, n. 5, p. 1393-1411, 2025. <https://doi.org/10.5194/bg-22-1393-2025>

- GOMES, D. da S.; BARBOSA, A. da S.; SANTOS, T. de M.; SANTOS, S. K. dos; SILVA, J. H. C. S.; AQUINO, I. de S. Cinética de liberação de CO₂ e decomposição da fitomassa em sistemas de uso e manejo do solo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, e981011413, 2021a. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11413>
- GOMES, D. S. da; SANTOS, S. K. dos; SILVA, J. H. C.; SANTOS, T. de M.; SILVA, E. de V.; BARBOSA, A. da S. CO₂Flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga, **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 1898-1908, 2021b. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1898-1908>
- GUERREIRO, S. F.; KASPARY, R. M.; SOUZA, F. L. P.; MARTINS, M. S.; CAMPOS, V.; SARTORI, A. A. C. Integração de índices espectrais na estimativa de biomassa e carbono em florestas de *Eucalyptus grandis*: um estudo de caso com NDVI e CO₂Flux. **Geociências**, v. 43, n. 3, p. 433–448, 2024. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v43i3.18171>
- ICMBIO_Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Mapa temático e dados geoestatísticos das unidades de conservação federais**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/acesso-a-informacao/paginas-em-migracao/mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-unidades-de-conservacao-federais-1>. Acessado em: 11 Jul. 2025.
- INSTITUTO CARBONO ZERO. **A Floresta Amazônica e o papel crucial no sequestro de carbono**. Instituto Carbono Zero, 2024. Disponível em: <https://www.institutocarbonozero.com.br/floresta-amazonia-co2>. Acessado em: 03 Mai. 2025.
- LÓPEZ-BALLESTEROS, A.; SERRANO-ORTIZ, P.; SÁNCHEZ-CAÑETE, E. P.; OYONARTE, C.; KOWALSKI, A. S.; PÉREZ-PRIEGO, Ó.; DOMINGO, F. Enhancement of the net CO₂ release of a semiarid grassland in SE Spain by rain pulses. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 121, n. 5, p. 1215-1230, 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JG003091>
- MELO, D. M. A.; SILVA, B. K. N.; JÚNIOR, D. S. C.; VASCONCELOS, E. S. A. G.; CUNHA, J. E. B. L.; MARÍN-PÉREZ, A. M.; SANTOS, D. Correlação entre o fluxo de CO₂ e variáveis físicas numa floresta tropical sazonalmente seca no Semiárido paraibano. **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, p. 1-7, 2024.
- MENDES, K. R.; MEIRELLES, M. L.; GOMES, A. C.; OLIVEIRA, R. C.; ANDRADE, A. P.; SOUZA, C. A.; COSTA, D. A.; SANTOS, J. M. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, e14510, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71297-7>
- MORAES, E. de C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE-8984-PUD/62, 2002. Cap. 1.
- NASA/POWER. **NASA's Portal: Prediction of Worldwide Energy Resources**. Disponível em <https://power.larc.nasa.gov/>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- NUNES, E. H.; PECORARO, C. A.; GONÇALVES, J. C.; MIRANDA, K. D. S.; OLIVEIRA, P. A. V. O.; JUNIOR, V. H. B.; FILHO, J. T. Methods for determining the emission of greenhouse gases in swine farming, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 195-201, 2023. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n3p195-201>
- OLIVEIRA, C. L.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; DANTAS, A. C.; SOUZA, E. S.; FERREIRA, R. C. A Caatinga emite ou sequestra carbono? **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 791-804, 2023. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p791-804>
- OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIRA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e a atmosfera no Nordeste Brasileiro, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 378-386, 2006.
- PAHLEVAN, N.; SCHOTT, J. R.; FRANZ, B. A.; HERMANN, M. Harmonized Landsat–Sentinel-2 reflectance products for land and water applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 253, e112165, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>
- POLETI, P. L.; MARIANO, G. T.; SANTOS, M. T.; CORRÊA, G. C.; CARDOSO-LEITE, E. Composição florística de fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual em Boituva, SP, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, e64127, 2023. <https://doi.org/10.5902/1980509864127>
- PULITI, S.; BREIDENBACH, J.; SCHUMACHER, J.; HAUGLIN, M.; KLINGENBERG, T. F.; ASTRUP, R. Above-ground biomass change estimation using national forest inventory data with Sentinel-2 and Landsat 8. **arXiv preprint**, e14262, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.14262>
- QIN, I.; XU, D.; HOU, L.; SHEN, B.; XIN, X. Comparing vegetation indices from Sentinel-2 and Landsat-8 under different vegetation gradients based on a controlled grazing experiment. **Ecological Indicators**, v. 133, e108363, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108363>
- QURESHI, A.; PARIVA, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. Uma revisão dos protocolos utilizados para avaliação do estoque de carbono em paisagens florestais. **Ciência e Política Ambiental**, v. 16, p. 81-89, 2012.
- RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus B**, v. 44, n. 2, p. 81-99, 1992. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v44i2.15428>
- RODRÍGUEZ-VEIGA, P.; WHEELER, J.; LOUIS, V.; TANSEY, K.; BALZTER, H. Quantifying forest biomass carbon stocks from space. **Current Forestry Reports**, v. 3, p. 1-18, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0052-5>
- SANTOS, C. V. B.; BAPTISTA, G. M. de M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, A. B.; FRANCA-ROCHA, W. J. S.; CARVALHO, H. F. S.; GALVÍNCIO, J. D. Validação de um modelo espectral para determinação de fluxos de CO₂ em áreas do Bioma Caatinga. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, n. 3, p. 226-239, 2023. <https://doi.org/10.24221/jeap.8.3.2023.4724.226-239>
- SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S.; SILVA, P. K. O. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO₂ em área de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 761-773, 2012. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i4.232866>

SASAGAWA, T.; AKITSU, T. K.; IDE, R.; TAKAGI, K.; TAKANASHI, S.; NAKAJI, T.; NASAHARA, K. N. Accuracy Assessment of Photochemical Reflectance Index (PRI) and Chlorophyll Carotenoid Index (CCI) Derived from GCOM-C/SGLI with In Situ Data. **Remote Sensing**, v. 14, n. 21, e5352, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14215352>.

SHINAMOTO, C. Y.; BOTOSO, P. C.; MARQUES, M. C. M. How much carbon is sequestered during the restoration of tropical forests? Estimates from tree species in the Brazilian Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, v. 329, p. 1-9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.002>

SILVA, M. A.; LACERDA, C. S. A. Análise do sequestro de carbono na região do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros utilizando técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 9, n. 3, p. 251-270, 2021. <https://doi.org/10.3895/rbgeo.v9n3.13542>

SILVA, A. C. F.; FREIRE, F. J.; BORGES, C. H. A.; ARAUJO, E. C. G.; SANTANA, G. M.; NETO, E. M. C.; SANQUETTA, C. R. Teores de carbono em espécies florestais da caatinga. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 71-85, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509842456>

SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; LEAL, I. R. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomassas/biomassas-e-ecossistemas/biomassas/arquivos-biomassas/5_livro_ecologia_e_conservao_da_caatinga_2013.pdf. Acesso em: 3 de maio de 2025.

TROVÃO, D. M. B.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A.; NETO, J. D. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 307-311, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000300010>

WRI_World Resources Institute Brasil. **Florestas absorvem duas vezes mais CO₂ do que emitem por ano**. WRI Brasil, 22 Jan. 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/florestas-absorvem-duas-vezes-mais-co2-do-que-emitem-por-ano>. Acesso em: 15 jul. 2025.

Agradecimentos: Aos integrantes do Laboratório de Geotecnologias Aplicadas – GEOTech, da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB.

Contribuições dos autores: A.J.S.B.: planejamento e execução de estudos, escrita, mapas, gráficos; O.L.L.: orientação e supervisão; J.L.C.M., J.S.A.S., R.A.F.: redação do artigo original e correções; I.T.P.C.: redação do artigo e planejamento; T.Q.C.: mapas. Todos os autores leram o artigo na sua versão final e aprovaram a sua publicação.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos via e-mail, mediante solicitação ao autor correspondente ou ao segundo autor.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflitos de interesses.



Copyright: © 2025 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NonCommercial \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).