



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.8.3.2023.4724.226-239



Validação de um modelo espectral para determinação de fluxos de CO₂ em áreas do Bioma Caatinga

Validation of a spectral model for CO₂ fluxes estimation in areas of the Caatinga Biome

Cloves Vilas Boas dos Santos^{a*}, Gustavo Macedo de Mello Baptista^b, Magna Soelma Beserra de Moura^c, Ardemírio de Barros Silva^d, Washington de Jesus Sant'Anna da Franca-Rocha^d, Herica Fernanda de Sousa Carvalho^a, Josicléda Domiciano Galvêncio^a

^a Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro de Filosofia e Ciências Humanas (CFCH). Avenida Professor Moraes Rego, n. 1235, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 50670-901. E-mail: cloves.vilasboas@ufpe.br*, hericacarvalho@ufpe.br, josicleda.galvencio@ufpe.br (*Autor correspondente).

^b Universidade de Brasília-UnB, Instituto de Geociências (IG). Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC – Ala Central, Brasília, Distrito Federal, Brasil. CEP: 70910-900. E-mail: gmbaptista@gmail.com.

^c Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Embrapa Semiárido. Rodovia BR-428, Km 152, S/N, Zona Rural, Petrolina, Pernambuco, Brasil. CEP: 56302-970. E-mail: magna.moura@embrapa.br.

^d Universidade Estadual de Feira de Santana-UEFS, Departamento de Ciências Exatas (DEXA). Avenida Transnordestina, S/N, Novo Horizonte, Feira de Santana, Bahia, Brasil. CEP: 44036-900. E-mail: abarros@uefs.br, wrocha@uefs.br.

ARTICLE INFO

Recebido 15 Out 2021
Aceito 22 Ago 2023
Publicado 31 Ago 2023

ABSTRACT

Developing models with high coverage and low cost are essential for monitoring carbon dioxide (CO₂) fluxes in ecosystems. The study aimed to validate a method for determining CO₂ fluxes using multispectral data in areas of preserved caatinga and ecological succession. The Forest Carbon Sequestration Index (CO₂flux) was applied for spectral modelling in 20 scenes of the OLI sensor (Landsat-8). The model validation process used CO₂ flux data measured on the surface using micrometeorological towers. According to the time of passage of the Landsat-8 satellite, different time scales of the CO₂ flow data from the tower were used considering intervals of half an hour, 1 (one), and 2 (two) hours. The Shapiro-Wilk test was used to verify data normality, and as most of the variables did not present normal distribution, the data were submitted to the Spearman correlation test, and then the best model was recommended by analyzing its coefficient of determination (R²) and the square root mean error (RSME). The CO₂flux spectral index proved to be compatible for evaluating the estimation parameters of CO₂ fluxes in the caatinga when compared with CO₂ fluxes of the pixel corresponding to the location of the tower, with correlations presenting values ranging from $\rho = -0.86$ to $\rho = -0.72$. The proposed model presented a high correlation with the observed data, obtaining R² = 0.81 and RSME = 1.6, confirming an efficient adjustment for the evaluation of CO₂ fluxes and great potential in the use of multispectral images for monitoring the CO₂ flux capturing the effects of seasonal changes in the dynamics of carbon fluxes.

Keywords: Dry forest, carbon, CO₂flux, OLI, Landsat-8.

RESUMO

O desenvolvimento de modelos com alta cobertura e baixo custo são fundamentais para o monitoramento dos fluxos de dióxido de carbono (CO₂) nos ecossistemas. O estudo objetivou validar um método para determinação de fluxos de CO₂ utilizando dados multiespectrais em áreas de caatinga preservada e em sucessão ecológica.



Aplicou-se o Índice de Sequestro Florestal de Carbono (CO₂flux) para a modelagem espectral em 20 cenas do sensor OLI (Landsat-8). No processo de validação do modelo, dados de fluxos de CO₂ medidos em superfície com o uso de torres micrometeorológicas foram utilizados. De acordo com o momento de passagem do satélite Landsat-8, foram utilizadas diferentes escalas temporais dos dados de fluxo de CO₂ da torre considerando intervalos de meia hora, 1 (uma) e 2 (duas) horas. O teste Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar normalidade dos dados, e como maioria das variáveis não apresentaram distribuição normal, os dados foram submetidos ao teste de correlação de Spearman, e em seguida foi recomendado o melhor modelo analisando o seu coeficiente de determinação (R²) e a raiz quadrada do erro médio (RSME). O índice espectral CO₂flux mostrou-se compatível para avaliação dos parâmetros de estimativas dos fluxos de CO₂ na caatinga quando comparados com fluxos de CO₂ do pixel correspondente a localização da torre, com correlações apresentando valores variando de $\rho = -0,86$ a $\rho = -0,72$. O modelo proposto apresentou alta correlação com os dados observados obtendo R² = 0,81 e RSME = 1,6, constatando um ajuste eficiente para a avaliação dos fluxos de CO₂ e grande potencial no uso de imagens multiespectrais para o monitoramento do fluxo de CO₂ capturando os efeitos das mudanças sazonais da dinâmica dos fluxos de carbono.

Palavras-chave: Floresta seca, carbono, CO₂flux, OLI, Landsat-8.

Introdução

Os fluxos de dióxido de carbono (CO₂) são de grande importância na compreensão do funcionamento dos agroecossistemas e na avaliação de mudanças existentes entre eles e a atmosfera em decorrência das alterações ambientais e das mudanças climáticas (Moura et al., 2011), de modo que a alteração do uso da terra e o manejo inadequado na agricultura afetam diretamente a dinâmica desses fluxos (Fleischer et al., 2016).

O monitoramento dos fluxos de CO₂ é amplamente realizado por meio de sensores instalados em torres micrometeorológicas (Jardim et al., 2022), localizadas nos principais ecossistemas do mundo e organizadas em redes regionais de monitoramento de fluxos (Baldocchi, 2019; Baldocchi & Penuelas, 2019). Nessas torres, o método empregado para a quantificação dos fluxos de CO₂ é o de covariância dos vórtices turbulentos (do inglês, “*eddy covariance*”), sendo a metodologia mais avançada e eficiente para medição dos fluxos de diversos gases existentes na atmosfera (Baldocchi & Penuelas, 2019; Cui & Chui, 2019). No entanto, mesmo com o avanço na cobertura mundial com sistemas de superfície para medição de gases, as torres ainda cobrem um pequeno percentual de área terrestre, havendo a necessidade de uso de sensoriamento remoto para ampla amostragem espacial e temporal.

Os produtos obtidos a partir de dados de satélites com boas resoluções espaciais e boa frequência de revisita, a exemplo da série Landsat, possuem uma longa série de dados, pois sua missão teve início nos anos 70, e dentre as missões tem-se a

do Landsat-8 que transporta os sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) fornecendo dados multiespectrais e imageando na região do visível, infravermelho e termal (Embrapa, 2023).

A obtenção de dados na superfície tem permitido a validação de produtos oriundos de sensoriamento remoto, com isso tem sido possível a proposição de modelos calibrados para aplicações espaciais. Especificamente, modelos de estimativa de fluxos de CO₂ com base em dados de satélite não foram validados para áreas de caatinga. Porém, essas informações são muito necessárias, pois trata-se de uma extensa área de florestas tropicais secas, cujas espécies vegetais são altamente adaptadas ao déficit hídrico e ao calor extremo.

Dados orbitais têm sido utilizados como uma alternativa ao monitoramento de componentes do ciclo do carbono, a exemplo da produção primária bruta (Morais et al., 2017; Sun et al., 2019; Silva et al., 2021); dos fluxos de CO₂ (Rahman et al., 2000, 2001; Fuentes et al., 2006; Silva & Baptista, 2015ab) e do sequestro de carbono (Baptista, 2004; Martins & Baptista, 2013; Gomes et al., 2016, 2021; Teobaldo & Baptista, 2016).

A dinâmica do CO₂ por sensoriamento remoto tem sido avaliada também utilizando índices espectrais de vegetação. De acordo com Rahman et al. (2000) e Baptista (2004), é possível determinar o sequestro de carbono na vegetação por meio da integração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI proposto por Rouse et al. (1973) com o Índice de Reflectância Fotoquímica, do inglês

Photochemical Reflectance Index – PRI” proposto por Gamon et al. (1997). Para o uso desses produtos na análise desses fluxos, são extraídas informações referentes a atividade fotossintética e a eficiência do uso da luz, e essas precisam ser modeladas junto aos parâmetros mensurados em superfície, a fim de proporcionarem um modelo consistente e representativo para determinação dos fluxos de CO₂.

É importante ressaltar que esses modelos precisam ser avaliados em diferentes contextos ou regiões, a exemplo do bioma Caatinga, situado na região semiárida do Brasil. A vegetação da caatinga é adaptada à reduzida precipitação (menor que 1.000 mm por ano), elevada temperatura (médias entre 23 e 27°C) (Menezes et al., 2012) e evapotranspiração (em torno de 2.000 mm) (Lima et al., 2015), ajustando seus mecanismos fisiológicos para melhorar a eficiência do uso da água e da fixação de carbono, de maneira que a aplicação de modelos espectrais para a resposta da vegetação em relação ao CO₂ precisam de ajustes, validando-os para as características desse ecossistema.

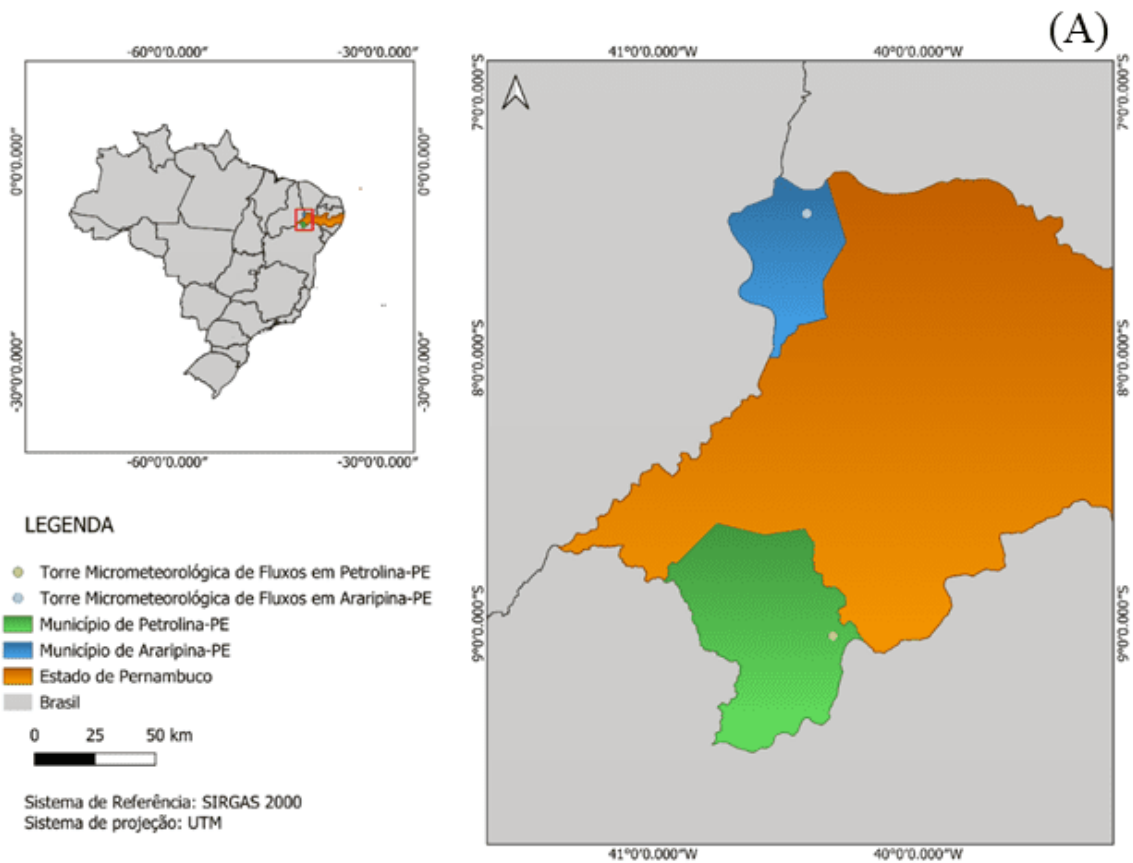
Em função da extensão e representatividade das áreas ocupadas pelas florestas secas, é importante o desenvolvimento de estudos que façam o uso de técnicas de sensoriamento remoto que permitam a avaliação das características biofísicas e estruturais do bioma Caatinga.

Portanto, o objetivo do presente estudo foi validar um método para determinação de fluxos de CO₂ utilizando dados multiespectrais em áreas de caatinga preservada e em sucessão ecológica, com vistas à sua aplicação em outras áreas de floresta tropicais sazonalmente secas, como a Caatinga brasileira.

Material e Métodos

Sítios de estudo

O estudo ocorreu em duas áreas no bioma Caatinga, sendo uma em Petrolina e outra em Araripina, ambas no Estado de Pernambuco, conforme a Figura 1.



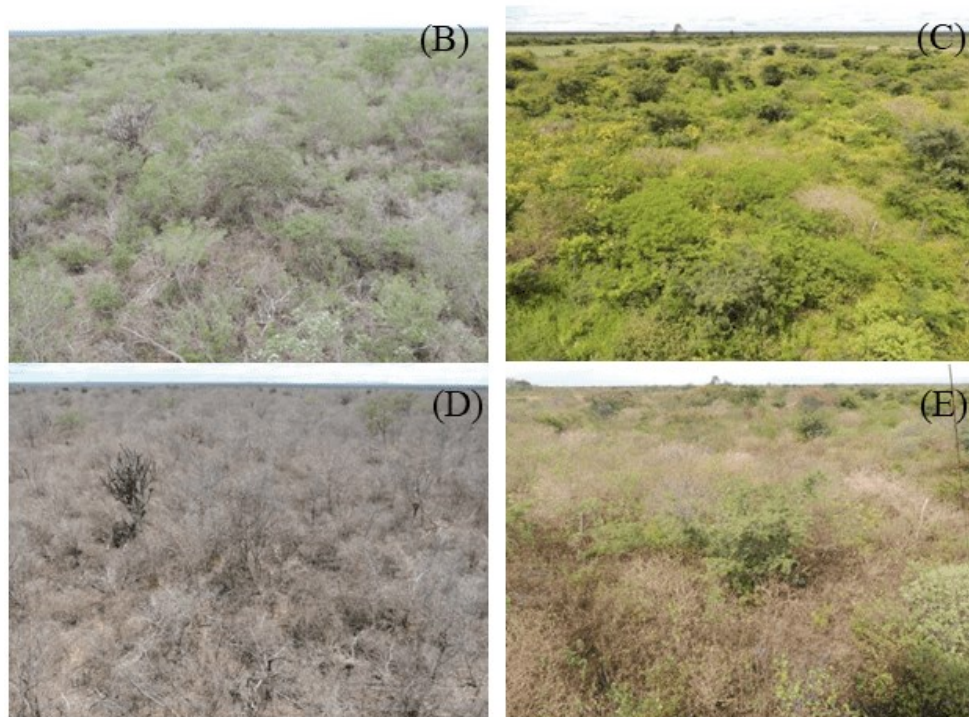


Figura 1. Mapas e imagens das áreas de estudo. A.) Áreas onde estão localizadas as torres de fluxos; B. Dossel da caatinga preservada em período chuvoso; C. Dossel da caatinga em sucessão ecológica em período chuvoso; D. Dossel da caatinga preservada em período seco; E. Dossel da caatinga em sucessão ecológica em período seco. Fonte: Embrapa Semiárido (2023).

Em Petrolina, a área selecionada tem predominância de caatinga preservada e encontra-se situada na estação experimental pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) (09°02' S; 40°19' W). De acordo com Alvares et al. (2013), a região possui clima semiárido, com temperatura média anual de 26°C e precipitações anuais de 510 mm, em média. A área experimental possui uma torre micrometeorológica, que está instalada em uma área com relevo plano de, aproximadamente, 600 hectares de caatinga, composta por espécies hiperxerófilas de porte arbóreo-arbustivo, com 5 m de altura, em média.

Por sua vez, a área de estudo em Araripina, onde está situada outra torre de fluxos, apresenta uma vegetação com predominância de caatinga, em processo de sucessão ecológica, e está localizada no campo experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) (07°27' S; 40°25' W, 788 m), na região do Araripe. O relevo dessa área também é pouco movimentado e, segundo Pires et al. (2017), o solo é do tipo Latossolo Amarelo, o clima local é classificado como BSw^h, ou seja, é uma área semiárida com uma precipitação média anual de 752 mm. A temperatura anual média dessa região é de 24°C e, de acordo com Alvares et al. (2013), a região

apresenta alta temperatura do ar, baixa umidade relativa do ar e grande amplitude térmica diária, chegando a 15°C.

A região do Araripe apresenta modificações ocorridas no ambiente devido a alteração da cobertura vegetal de áreas nativas, por meio do desmatamento para a extração de lenha, visando a geração de energia para as indústrias gesseiras (Sá et al., 2008). O histórico de antropização da área de estudo nessa região remete ao corte seguido de queimada e cultivos de feijão em 1977, seguido pelo cultivo de milho, mandioca e sorgo até 1997, e permanecendo um tempo sem uso, até 2009, com pastejo animal em períodos chuvosos. A vegetação encontra-se em regeneração, com espécies de porte arbustivo-herbáceo, com altura média de 1,2 m (Pires et al., 2017).

A escolha das duas áreas se deu à representatividade e às particularidades dos ambientes, bem como à disponibilidade de infraestrutura de monitoramento dos elementos ambientais, principalmente do fluxo de carbono monitorados entre 2013 e 2016, em ambas as torres.

Imagens de satélite

Foram selecionadas 20 cenas do satélite Landsat-8, ponto/órbita 217/66 e 217/65, referentes

ao sensor *Operational Land Imager* (OLI), adquiridas gratuitamente por meio da plataforma de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS.

As datas das imagens selecionadas para sítio de caatinga preservada foram: 30/05, 01/07, 17/07, 03/09, 05/10 e 21/10 do ano 2013; 09/01, 25/01, 30/03 e 04/07 do ano 2014; e 28/01, 13/02 e 07/07 do ano 2015. No sítio de caatinga em sucessão ecológica, as datas foram: 19/09 do ano 2013; 02/06, 04/07 e 20/07 do ano 2014; e 31/01, 16/02 e 22/05 do ano 2016.

De acordo com o arquivo de metadados das imagens, o horário de imageamento do satélite Landsat-8 no local foi por volta de 09h50 min (hora local) e o critério adotado para a seleção das imagens foi disponibilidade de dados para esses dias de passagem do satélite sobre as áreas de estudo e a ausência de nuvens no pixel avaliado nas imagens.

O produto utilizado do satélite Landsat-8 foi o nível 1 da coleção 1, ou seja, dados de radiância no nível do sensor, expressa em números digitais. O sistema sensor tem uma resolução espacial de 30 m e as bandas utilizadas apresentam a seguinte resolução espectral: azul (450–515 nm), verde (535 – 600 nm), vermelho (630 – 680 nm) e infravermelho próximo (845 – 885 nm).

Pré-processamento digital de imagens

Na fase de pré-processamento das imagens, foi realizada a conversão dos números digitais para radiância, e para isso foi utilizado o software *Environment for Visualizing Images* (ENVI) versão 5.2 por meio do módulo *Calibration Radiometric*. Em seguida, a correção atmosférica foi realizada utilizando o modelo de transferência radiativa (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model - MODTRAN4*) (Adler-Golden et al., 1998), que se baseia nos parâmetros físicos da atmosfera (Silva & Baptista, 2015a; Lentiluce & Adler-Golden, 2019) e que possui alta precisão na correção atmosférica da imagem (Wang et al., 2019). Para a correção atmosférica foi utilizada no mesmo software, o módulo *FLAASH*, e os parâmetros utilizados para executar a função foram: atmosfera tropical, aerossol rural e altitude do terreno de acordo com o ponto em cada local de amostragem.

Com isso, o banco de imagens Landsat-8/OLI para as áreas de estudo foi convertido para reflectância de superfície e ficou apto para os procedimentos metodológicos de modelagem dos fluxos de CO₂, descritos a seguir.

Processamento Digital das Imagens para cálculo dos índices espectrais de vegetação nas imagens OLI (Landsat-8)

Para o cômputo dos fluxos de CO₂, foi utilizado o Índice de Sequestro Florestal de Carbono (CO₂flux) proposto por Rahman et al. (2000), sendo necessário o cálculo dos índices NDVI e PRI. O NDVI utiliza-se da refletância das regiões do vermelho e infravermelho próximo (Equação 1).

$$NDVI = \frac{(R_5 - R_4)}{(R_5 + R_4)} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde R é a reflectância dos comprimentos de onda das bandas do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente 5 e 4 do sensor OLI.

O PRI (Equação 2), expressa a diferença entre a feição de absorção na faixa do azul e o pico de reflectância na faixa do verde, podendo ser correlacionado com o uso eficiente da luz no processo fotossintético (Baptista, 2004).

$$PRI = \frac{(R_2 - R_3)}{(R_2 + R_3)} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde R é a reflectância dos comprimentos de onda, das bandas do azul e verde, respectivamente 2 e 3 do sensor OLI.

Segundo Rahman et al. (2000), para a determinação do índice CO₂flux, o PRI precisa ser reescalado para valores positivos (sPRI), conforme a Equação 3.

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Com isso, o Índice CO₂flux (Equação 4) foi determinado com a multiplicação do NDVI e sPRI, como proposto por Rahman et al. (2000).

$$CO_2flux = NDVI * sPRI \quad (\text{Eq. 4})$$

As equações foram executadas usando uma rotina de processamento por meio do módulo *Band Math* do software ENVI, versão 5.2.

Dados micrometeorológicos na superfície

Para a validação dos resultados encontrados por meio do CO₂flux nas imagens de satélite, foram utilizados dados mensurados em superfície obtidos por meio de sensores instalados em torres de fluxos localizadas nos sítios de estudo, cujos detalhes podem ser obtidos em Souza et al. (2015ab), para

Petrolina-PE, e, em Pires et al. (2017), para Araripina-PE.

Para a determinação dos fluxos de CO₂ na superfície foi utilizado um analisador de gás ao infravermelho de caminho aberto, do inglês “*InfraRed Gas Analyzer – IRGA*” (Modelos LI-7500 e LI-7550, Li-Cor INC., Lincoln, Nebraska, EUA); enquanto o anemômetro sônico tridimensional (Modelo CSAT-3, *Campbell Scientific Inc.*, Logan, Utah, EUA) foi utilizado para medição da velocidade e direção do vento. Esses sensores foram instalados nas torres micrometeorológicas, respectivamente a 16 m e 8 m de altura para o sítio de caatinga preservada e de caatinga em sucessão ecológica, conectados a um datalogger modelo (CR1000, *Campbell Scientific Inc.*, Logan, UT, EUA) com medições programadas na frequência de 10 Hz, e armazenamento os dados em um cartão de memória.

Para o cômputo dos fluxos em intervalos de 30 minutos, utilizou-se o software Alteddy versão 3.6 (Alterra, *University of Wageningen*, The Netherlands). De acordo com as exigências do método, foram realizadas correções e filtragem de dados de acordo com Foken et al. (2004). O *gapfilling* e a partição dos fluxos foi realizada conforme Falge et al. (2001) e Reichstein et al. (2005), utilizando-se rotina desenvolvida em R chamada REdDyProc (Wutzler et al., 2018).

Dessa forma, para as datas de aquisição das imagens Landsat-8, constitui-se um banco de dados micrometeorológicos, em intervalos de 30 minutos, que foram ainda agrupados para intervalos de meia, uma e duas horas. A comparação com os dados de satélite foi considerada por meio do valor do pixel correspondente à área da torre.

Também foram adquiridos dados de precipitação pluviométrica das estações agrometeorológicas localizadas nos campos experimentais, tanto na área da EMBRAPA, como no IPA, para os anos de 2013 a 2016.

Análise estatística

Os procedimentos estatísticos foram utilizados para a comparação dos resultados gerados a partir das imagens de satélite com os dados mensurados em campo, com o objetivo de verificar a correlação entre as variáveis estudadas. Foi verificada a distribuição dos dados por meio do teste de normalidade Shapiro-Wilk (teste W), sendo variáveis independentes aquelas obtidas pelas torres e dependentes os índices espectrais obtidos por sensoriamento remoto. Como o número de amostras para a análise é relativamente pequeno, com

dimensão menor que 30, e, como índices espectrais tendem a não se ajustar à uma distribuição normal, foi realizado uma análise estatística baseada na teoria não-paramétrica, que são estatísticas com técnicas inferenciais que podem ser utilizadas em distribuições de resultados que não obedecem aos parâmetros de uma curva normal (VIVALDI et al., 2013).

Os dados foram validados por meio da análise do coeficiente de correlação de Spearman (ρ) e a eficiência do modelo foi verificada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e pela raiz quadrada do erro médio (RMSE). Para isso, utilizou-se uma rotina de processamento na linguagem de programação R.

Resultados e Discussão

Análise dos fluxos de CO₂ na Caatinga em diferentes períodos

A Figura 2 apresenta as precipitações mensais em ambas as áreas de estudo. É importante ressaltar que no período analisado, ambas as áreas obtiveram precipitações abaixo da média histórica. Em relação ao sítio de caatinga preservada, são esperadas precipitações que, segundo Souza et al. (2017), são na ordem de 510 mm anuais, no entanto, foram registrados em 2013, 2014 e 2015 os totais de 292,7 mm; 325,8 mm e 255,1 mm, respectivamente. Na região onde situa a área de caatinga em sucessão ecológica, são esperados 752 mm anuais (Pires et al. 2017), e os registros de chuva em 2013, 2014 e 2016 foram 506,8 mm; 395,3 mm e 488,6 mm, respectivamente. Com isso, é esperado que a baixa disponibilidade hídrica dos locais nesse período tenha grande influência na dinâmica dos fluxos de carbono na vegetação em ambas as áreas.

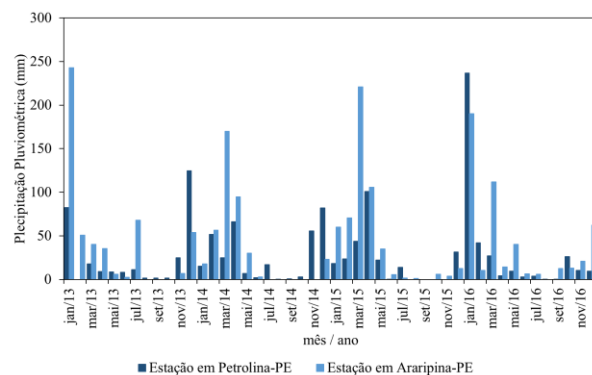


Figura 2. Precipitação pluviométrica nas áreas de caatinga preservada e caatinga em sucessão ecológica nas regiões de Petrolina-PE e Araripina-PE, respectivamente. Fonte: Santos et al. (2023).

A Figura 3 apresenta a variabilidade dos fluxos de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) na Caatinga nos dias avaliados, datas que coincidem com os dias de passagem do satélite Landsat-8 sobre as áreas de estudo.

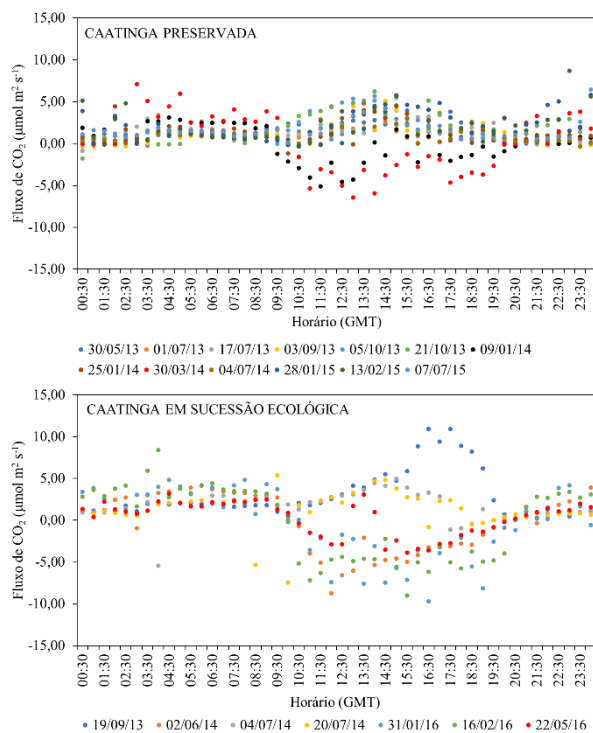


Figura 3. Fluxo de CO_2 diário mensurado nas áreas de Caatinga preservada e na Caatinga em sucessão ecológica. Fonte: Santos et al. (2023).

Os fluxos de CO_2 observados são representados por valores que representam as assimilações de CO_2 pelo processo fotossintético no ecossistema e valores que remetem a transferência de CO_2 para a atmosfera por meio da respiração (Oliveira et al., 2006; Oliveira et al., 2023).

De acordo com os resultados, a dinâmica dos fluxos de CO_2 em ambas as áreas avaliadas mostraram oscilações ao longo do tempo. Essas variações nos dados são esperadas, pois a dinâmica desses gases tem relação com as condições meteorológicas locais, e elas interferem nos processos de trocas entre a vegetação e a atmosfera.

Entre os dias avaliados, os fluxos de CO_2 no sítio de caatinga preservada variou entre $-6,44$ e $8,71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no entanto, foi observado no sítio de caatinga em sucessão ecológica que houve maiores variações, com fluxos variando entre $-9,71$ e $10,92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Esses padrões de fluxos na Caatinga são compreendidos em função da disponibilidade hídrica

e das condições ambientais ao longo do dia, pois em períodos mais chuvosos, normalmente há uma maior assimilação de CO_2 pela vegetação nas primeiras horas do dia (Lima Filho, 2004), no entanto, foi observado que maioria dos dias apresentam mais emissões do que assimilações, o que vem a ser um indicador de baixa atividade fotossintética, e isso concorda com Oliveira et al. (2006), que também encontraram em período mais seco, valores que representam emissões de CO_2 durante o período diurno, e justificaram que a fotossíntese foi minimizada em função do caráter caducifólio da vegetação que pressupõe a queda das folhas das árvores e arbustos, com conseqüente diminuição da atividade metabólica do ecossistema nesse período. Os autores também analisaram a mesma área de caatinga do presente estudo, porém com a torre micrometeorológica localizada em outro local, e observaram fluxos médios de CO_2 em estação seca que chegaram a atingir $-2,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com registros de taxas de até $-5,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante o período diurno, e durante a noite, taxas variando entre $0,2$ e $1,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Portanto, em função das condições ambientais, sobretudo, da disponibilidade hídrica, a caatinga preservada obteve esse comportamento nos fluxos de CO_2 no período diurno que são típicos de regiões semiáridas com predominância de períodos secos na maior parte do ano, momento em que a atividade fotossintética da vegetação é reduzida, o que implica no aumento das emissões de CO_2 para a atmosfera.

Silva et al. (2012) também mensuraram os fluxos de CO_2 em uma área próxima à do presente estudo, em diferentes anos, e observaram que em agosto de 2004 a vegetação ainda assimilava CO_2 e em setembro do mesmo ano, foi um mês praticamente de emissões de CO_2 (ambos os meses considerados como período seco na região), ao contrário das observações realizadas em fevereiro e março de 2005 (meses que se enquadram na fase chuvosa da região), em que havia mais assimilação pela vegetação do que emissão para a atmosfera.

Outro estudo que traz resultados que concordam com o presente estudo é o de Souza et al. (2017) que, analisando a dinâmica do CO_2 na mesma área de estudo na Caatinga, em 2012, que foi um ano extremamente seco, constataram que, no início do ano, a vegetação ainda com pouca disponibilidade hídrica, promoveu uma maior fixação de carbono em relação ao período de senescência, até a perda das folhas, o que veio a reduzir gradativamente, a absorção do CO_2 , fazendo mais emissões para a atmosfera.

As variações dos dados de fluxos também foram observadas em outras regiões no semiárido pernambucano por Oliveira et al. (2023) analisando fluxos de CO₂ também em uma floresta preservada, e a partir das observações, os autores pontuaram que a dinâmica do carbono na Caatinga hora ela atua como fonte e hora como sumidouro de carbono. O estudo de Pires et al. (2017), avaliando os fluxos de CO₂ em caatinga em sucessão ecológica, em 2013, observou fluxos diários que apontavam mais emissões de CO₂ no mês de janeiro, e justificou essa transferência em função da baixa disponibilidade hídrica. Isto foi resultante das poucas chuvas nos meses anteriores, ao contrário disso, nos meses entre fevereiro e maio, do mesmo ano, os fluxos médios de CO₂ na vegetação chegou a -1,43 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, momento em que o ecossistema estava atuando como sumidouro de carbono.

Portanto, os fluxos de CO₂ na Caatinga indicaram que o ecossistema de caatinga preservada estava emitindo mais CO₂ para a atmosfera principalmente no período mais seco, no entanto, os fluxos na área em processo de sucessão ecológica mantiveram maiores variações, tanto ao longo do dia, quanto ao longo do tempo. É importante ressaltar que os baixos índices de precipitação nos anos analisados influenciaram a dinâmica dos fluxos de CO₂, pois o período experimental ocorreu em anos com baixas precipitações, e consequente, déficit hídrico em maior parte do tempo.

Validação dos dados de fluxos de CO₂ na Caatinga utilizando dados do sensor OLI/Landsat-8

Essa fase de validação do modelo para a estimativa dos fluxos de CO₂ ocorreu a partir da associação entre os dados orbitais (OLI/Landsat-8) a partir do índice CO₂flux com os dados mensurados na superfície.

De acordo com o teste de normalidade (teste W), a variável CO₂flux (NDVI * sPRI) com os dados do sensor OLI/Landsat-8, a partir da leitura do pixel da imagem e os dados de fluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para as observações de acordo com os seis grupos de análise, apresentaram *p*-valor de 0,28, 0,01, 0,05, 0,06, 0,07, 0,06 e 0,00, respectivamente. O *p*-valor calculado com 5% de significância mostrou que parte das variáveis não possuíam normalidade nos dados observados, portanto, as análises estatísticas foram utilizadas por meio de teste não paramétrico.

De acordo com o coeficiente de correlação, o comparativo entre as duas variáveis CO₂flux (NDVI * sPRI) na leitura de 1 pixel e os dados de fluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) com observações em meia, uma e duas horas apresentaram valores variando de $\rho = -0,86$ a $\rho = -0,72$ conforme a Figura 4, mostrando alta correlação entre as variáveis. Portanto, pode-se afirmar que existe similaridade estatística entre as variáveis, com alta semelhança entre os dados espectrais das imagens do sensor OLI, e os dados medidos pelo sensor instalado na torre micrometeorológica para as áreas da Caatinga.

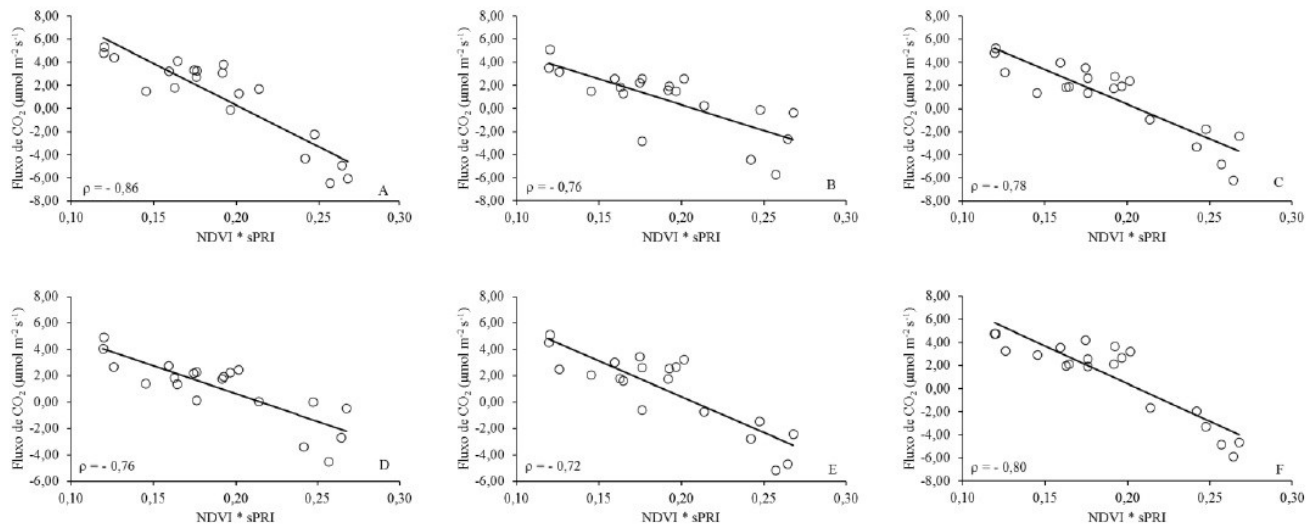


Figura 4. Regressão linear e coeficiente de correlação de Spearman (ρ) para ajuste entre as variáveis fluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e os valores do índice CO₂flux (NDVI * sPRI) em seis escalas temporais. O IV (CO₂flux calculado a partir dos dados OLI/Landsat-8). A. T1 (13h00min); B. T2 (12h30min-13h00min); C. T3 (13h00min-13h30min); D. T4 (12h00min-13h30min); E. T5 (12h30min-14h00min); F. T6 (13h00min-14h30min). Fonte: Santos et al. (2023).

Por meio do coeficiente de determinação (Tabela 1), pode-se afirmar que a melhor equação para quantificar os fluxos de CO₂ apresentou um melhor ajuste com dados de fluxo de CO₂, com observações em 30 minutos ($R^2 = 0,81$), seguindo a observação de 2 horas ($R^2 = 0,80$). Mesmo ambos obtendo correlações muito semelhantes, é recomendado o uso da equação referente ao grupo de análise T1, pois faz uma maior correlação com o dado mais próximo do horário de passagem do satélite sobre a área de estudo.

Tabela 1. Coeficiente de determinação (R^2) e Raiz Quadrada do Erro Médio (RSME) entre as variáveis Fluxo de CO₂ em campo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e os valores de CO₂flux calculado a partir das imagens. Fonte: Santos et al. (2023).

Fluxo de CO ₂	R^2	RSME
T1	0,81	1,61
T2	0,57	1,76
T3	0,79	1,40
T4	0,69	1,28
T5	0,74	1,46
T6	0,80	1,47

* T1 = 13h00min; T2 = 12h30min-13h00min; T3 = 13h00min-13h30min; T4 = 12h00min-13h30min; T5 = 12h30min-14h00min; T6 = 13h00min-14h30min.

Os resultados apresentados na Tabela 1 estão de acordo com obtidos em diferentes ecossistemas. Silva & Baptista (2015a), analisando regiões na Amazônia com dados hiperespectrais do sensor Hyperion, também obtiveram alta regressão ($R^2 = 0,87$), validando esse modelo a partir do índice CO₂flux. No entanto, o ajuste foi mais representativo na observação em duas horas.

Rahman et al. (2001) também compararam o índice CO₂flux com os dados brutos de CO₂ de torres em uma região de floresta boreal do Canadá, obtendo um coeficiente de determinação ($R^2 = 0,82$) que mostrou uma relação significativa também para dados hiperespectrais do sistema sensor AVIRIS.

A Equação 5 apresenta o modelo proposto e recomendado, a partir do ajuste entre os dados de satélite e as mensurações na superfície para a estimativa dos fluxos CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para áreas do bioma Caatinga.

$$\text{CO}_2\text{flux} = -71,87 (\text{NDVI} * \text{sPRI}) + 14,683 \quad \text{Eq.}(5)$$

Os dados de fluxo de CO₂ a partir da equação proposta e recomendada no presente estudo seguem apresentados conforme a Figura 5 na qual, têm-se a região onde está inserida a área de caatinga preservada em uma cena do sensor OLI/Landsat-8 registrada no dia 30 de maio de 2013 (Figura 5B) e outra no dia 03 de setembro de 2013 (Figura 5D), ambas em um ano com baixas precipitações e consequentemente baixa disponibilidade hídrica. Na área preservada, são observadas maiores assimilações de CO₂ na data referente ao período após as chuvas, o que indica que as áreas estavam atuando como um sumidouro de carbono, no entanto, as áreas na cena referente ao período seco mostraram em sua grande maioria emissões de CO₂ para a atmosfera. Em relação à caatinga em sucessão ecológica, o dia 04 de julho de 2014 (Figura 5F) estava em uma fase muito seca, o que contrastou muito com o dia 22 de maio de 2016 (Figura 5H), na qual estava em um período após a ocorrência de precipitações em dias anteriores à aquisição da imagem, o que manteve uma disponibilidade hídrica no solo.

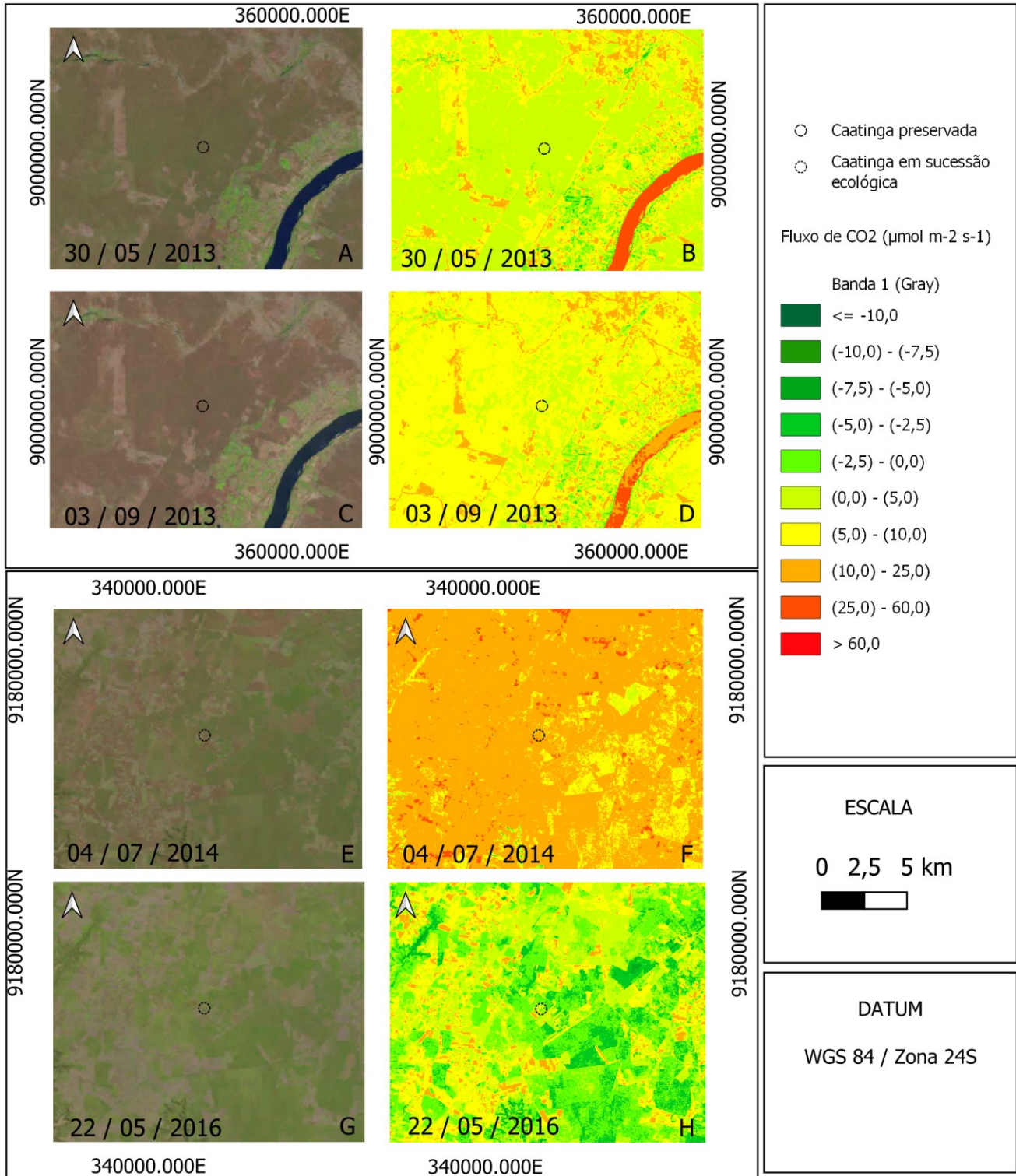


Figura 5. Comparação entre os dados mensurados em campo com o modelo proposto para o fluxo de CO₂ a partir das imagens do Landsat-8, centrada com um ponto nas áreas em que foram mensurados dados em campo. Área de caatinga preservada (A-D) e caatinga em sucessão ecológica (E-H). Fonte: Santos et al. (2023).

A dinâmica do carbono nas áreas apresentadas conforme a Figura 5, mostram de forma evidente grandes variações espaço-temporais na dinâmica dos fluxos de CO₂ em diferentes contextos

de florestas, tanto nos períodos após a ocorrência das chuvas como nos períodos em que a floresta está submetida a estresse hídrico nas fases de maior seca. Esses padrões apresentados pelos dados

principalmente no período seco são esperados para esses contextos de floresta, pois Oliveira et al. (2006) apontam que no fim do período seco, a taxa de liberação de CO₂ torna-se nula em função do fechamento dos estômatos e a perda das folhas como consequência do déficit hídrico.

Ambas as áreas estão sobre épocas em que houve pouca chuva nos 30 dias que antecederam a aquisição das imagens, e isso veio a proporcionar uma assimilação de CO₂ nas áreas com vegetação mais tolerante ao déficit hídrico e nos sistemas agropecuários irrigados da região, principalmente os localizados às margens do Rio São Francisco. Nas demais áreas, por exemplo, agricultura ou pastagem, apresentaram menores assimilações.

Outro fator importante a ser observado é o horário de aquisição da cena do satélite, pois ele passa pela área de estudo por volta das 9h50min (hora local). Tanto para a caatinga preservada, quanto para a caatinga em sucessão ecológica, esse momento é de muita variabilidade na dinâmica fotossintética entre as espécies da caatinga, pois elas têm comportamentos diferentes em resposta as condições ambientais locais. Segundo Mesquita et al. (2018) avaliando espécies da caatinga, o processo de transpiração e condutância estomática das plantas é reduzido nos períodos em que as plantas estavam submetidas a estresse hídrico. Lima Filho (2004) e Lima Filho et al. (2007) observando espécies da caatinga, aponta que a atividade fotossintética tem seu início nas primeiras horas do dia, reduzindo sua atividade por volta das 10h00min às 14h00min (horário local).

De acordo com a análise dos modelos apresentados para o contexto de caatinga, tanto preservada como em estado de sucessão ecológica, pode-se obter uma espacialização do fluxo de CO₂ por meio do índice CO₂flux, sendo que as variáveis analisadas possuem similaridade e são estatisticamente significativas, ou seja, mais de 70% do índice CO₂flux explica o fluxo de CO₂ tanto para meia, como para 1 (um) ou 2 (duas) horas. As variáveis analisadas possuem similaridade e são estatisticamente significativas.

Conclusões

O uso do sensoriamento remoto multiespectral permitiu identificar a dinâmica dos fluxos de CO₂ para áreas de caatinga preservada e em sucessão ecológica, por meio da integração de dados orbitais e dados mensurados em campo, utilizando escalas temporais e espaciais.

As correlações entre os índices de vegetação e a dinâmica dos fluxos de CO₂ determinaram tendências temporais em relação à análise pontual e espacial.

Foi possível determinar modelos de fluxos de CO₂ a partir do Índice de Sequestro Florestal de Carbono (CO₂flux). O ajuste foi eficiente na avaliação dos fluxos de CO₂ e mostrou um grande potencial no uso de imagens multiespectrais para o monitoramento dos fluxos de CO₂, capturando os efeitos das mudanças sazonais da dinâmica dos fluxos de CO₂ na caatinga.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Pós-Graduação ao primeiro autor. À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo financiamento do Projeto “Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d'água e da fenologia em áreas de Caatinga (APQ 0062-1.07/15)”. Ao Laboratório de Agrometeorologia da Embrapa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido), pela infraestrutura para a realização das atividades de campo.

Referências

- Adler-Golden, S.; Berk, A.; Bernstein, L. S.; Richtsmeier, S.; Acharya, P. K.; Matthew, M. W.; Chetwynd, J. H. 1998. FLAASH, a MODTRAN4 atmospheric correction package for hyperspectral data retrievals and simulations. In: Proceedings 7th Ann. JPL Airbone Earth Science Workshop, pp. 9-14.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. D. M.; Sparovek, G. 2013. Meteorologische zeitschrift, 22, 6, 711-728.
- Baldocchi, D. 2019. How Eddy Covariance Flux Measurements Have Contributed to Our Understanding of Global Change Biology. Global change biology, 26, 1, 242-260.
- Baldocchi, D.; Penuelas, J. 2019. The physics and ecology of mining carbon dioxide from the atmosphere by ecosystems. Global change biology, 25, 4, 1191-1197.
- Baptista, G. M. M. 2004. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. Geografia, 29, 2, 189-202.
- Cui, W.; Chui, T. F. M. 2019. Temporal and spatial variations of energy balance closure across

- FLUXNET research sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 12-21.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2023. LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat> . Acesso em: 22 de maio de 2023.
- Falge, E.; Baldocchi, D.; Olson, R.; Anthoni, P.; Aubinet, M., Bernhofer, C.; Burba, G.; Ceulemans, R.; Clement, R.; Dolman, H.; Granier, A.; Gross, P.; Grünwald, T.; Hollinger, D.; Jensen, N. O.; Katul, G.; Keronen, P.; Kowalski, A.; Lai, C.T.; Law, B.E.; Meyers, T.; Moncrieff, J.; Moors, E.; Munger, J.W.; Pilegaard, K.; Rannik, Ü.; Rebmann, C.; Suyker, A.; Tenhunen, J.; Tu, K.; Verma, S.; Vesala, T.; Wilson, K.; Wofsky, S. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and forest meteorology*, 107, 1, 43-69.
- Fleischer, E.; Khashimov, I.; Hözel, N.; Klemm, O. O. 2016. Carbon exchange fluxes over peatlands on Western Siberia; Possible feedback between land-use change and climate change. *Science of the Total Environment*, 545, 424-433.
- Foken, T.; Göckede, M.; Mauder, M.; Mahrt, L.; Amiro, B.; Munger, W. 2004. Post-field data quality control. In: *Handbook of micrometeorology*, Springer, Dordrecht. pp. 181-208.
- Fuentes, D. A.; Gamon, J. A.; Cheng, Y.; Claudio, H. C.; Qiu, H.; Mao, Z.; Sims, D. A.; Rahman, A. F.; Oechel, W.; Luo, H. 2006. Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 103, 3, 312-323.
- Gamon, J. A.; Serrano, L.; Surfus, J.S. 1997. "The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels". *Oecologica*, 112, 4, 492-501.
- Gomes, V. P.; Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B.; Ferreira, P. S.; Paz, Y. M.; Miranda, R. Q. 2016. Sensoriamento remoto hyperspectral aplicado para análise dos indicadores de resiliência e suscetibilidade do bioma caatinga frente às mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 09, 04, 1122-1136.
- Gomes, D. S.; Santos, S. K.; Silva, J. H. C. S.; Santos, T. M.; Silva, E. V.; Barbosa, A. S. 2021. CO₂flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 04, 1898-1908.
- Jardim, A. M. R. F.; Morais, J. E. F.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F. 2022. Understanding interactive processes: a review of CO₂ flux, evapotranspiration, and energy partitioning under stressful conditions in dry forest and agricultural environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 10, 677.
- Lentilucci, E. J.; Adler-Golden, S. 2019. Atmospheric Compensation of Hyperspectral Data: An Overview and Review of In-Scene and Physics-Based Approaches. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7, 2, 31-50.
- Lima, R. P.; Fernandes, M. M.; Fernandes, M. R. M.; Matricardi, E. A. 2015. Aporte e decomposição da serapilheira na Caatinga no sul do Piauí. *Floresta e Ambiente*, 22, 1, 42-49.
- Lima Filho, J. M. P. 2004. Gas exchange of the umbu tree under semi-arid conditions. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 26, 206-208.
- Lima Filho, J. M. P.; Silva, F. F. D.; Lopes, A. P.; Anjos, J. B.; Drumond, M. A. 2007. Comportamento ecofisiológico do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) sob condições semi-áridas. In: *Congresso Internacional de Agroenergia e Biocombustíveis, Energia de Resultados*, Teresina, 1.
- Martins, L. N.; Baptista, G. M. M. 2013. Análise Multitemporal do Sequestro Florestal de Carbono no Projeto de Assentamento Carão, Acre. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6, 6, 1648-1657.
- Menezes, R. S. C.; Sampaio, E. V. S. B.; Giongo, V.; Pérez-Marin, A. M. 2012. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. *Brazilian Journal of Biology*, 72, 3, 643-653.
- Mesquita, A. C.; Dantas, B. F.; Cairo, P. A. R. 2018. Ecophysiology of Caatinga native species under semi-arid conditions. *Bioscience Journal*, 34, (6 Supplement 1), 81-89.
- Morais, Y. C. B.; Araújo, M. S. B.; Moura, M. S. B.; Galvêncio, J. D.; Miranda, R. Q. 2017. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 585-599.
- Moura, M. S. B.; Silva, T. G. F.; Randow, C. R.; Lacerda, F. F.; Souza, L. S. B. Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d'água em superfícies vegetadas. In: Galvêncio,

- J. D. (Org.). Mudanças climáticas e modelos ambientais: caracterização e aplicação. Recife: UFPE, 2011.
- Oliveira, C. L.; Lima, J. R. S.; Souza, R. M. S.; Dantas, A. C.; Souza, E. S.; Ferreira, R. C. 2023. A Caatinga Emite ou Sequestra Carbono? *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16, 02, 791-804.
- Oliveira, M. B. L.; Santos, A. J.; Manzi, A. O.; Alvalá, R. D. S.; Correia, M. D. F.; Moura, M. S. B. 2006. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 3b, 378-386.
- Pires, W. N.; Moura, M. S. B.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F.; Carvalho, H. F. S. 2017. Fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d'água em uma área de caatinga em regeneração. *Agrometeoros*, 25, 1, 143-151.
- Rahman, A. F.; Gamon, J. A.; Fuentes, D. A.; Roberts, D. A.; Prentiss, D. 2001. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. *Journal of Geophysical Research*, 106, D24, 33579-33591.
- Rahman, A. F.; Gamon, J. A.; Fuentes, D. A.; Roberts, D.; Prentiss, D.; Qiu, H. 2000. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. AVIRIS Workshop. Proceedings... JPL/NASA, 8p.
- Reichstein, M.; Falge, E.; Baldocchi, D.; Papale, D.; Aubinet, M.; Berbigier, P.; Bernhofer, C.; Buchmann, N.; Gilmanov, T.; Granier, A.; Grüneald, T.; Havránková, K.; Ilvesniemi, H.; Janous, D.; Knohl, A.; Laurila, T.; Lohila, A.; Loustau, D.; Matteucci, G.; Meyers, T.; Miglietta, F.; Ourcival, J. M.; Pumpanen, J.; Rambal, S.; Rotenberg, E.; Sanz, M.; Tenhunen, J.; Seufert, G.; Vaccari, F.; Vesala, T.; Yakir, D.; Valentini, R. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11, 9, 1424-1439.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. ERTS-1 Symposium. Proceedings... NASA, United States, 3. 309-317.
- Sá, I. I. S.; Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B.; Sá, I. B. 2008. Uso do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN) para caracterização da Cobertura Vegetal da região do Araripe Pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 1, 1, 28-38.
- Silva, J. N. B.; Galvêncio, J. D.; Miranda, R. Q.; Moura, M. S. B. 2021. Modelos da Produtividade Primária Bruta em área de floresta tropical em sazonalmente seca, usando dados reflectância da vegetação de caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 6, 3775-3784.
- Silva, S. C. P.; Baptista, G. M. M. 2015a. Análises Espectrais da Vegetação com dados Hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO₂ em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21, 2, 354-370.
- Silva, S. C. P.; Baptista, G. M. M. 2015b. Modelagens de sequestro de Carbono e dos conteúdos de CO₂ atmosférico com dados Hyperion em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67, 7, 1509-1521.
- Souza, L. S. B.; Moura, M. S. B.; Sedyama, G. C.; Silva, T. G. F. 2015a. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50, 8, 627-636.
- Souza, L. S. B.; Moura, M. S. B.; Sedyama, G. C.; Silva, T. G. F. 2015b. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, 41-55.
- Souza, L. S. B.; Moura, M. S. B.; Sedyama, G. C.; Silva, T. G. F. 2017. Carbon exchange in a caatinga area during an unusually drought year. *Agrometeoros*, 25, 1, 37-45.
- Sun, Z.; Wang, X.; Zhang, X.; Tani, H.; Guo, E.; Yin, S.; Zhang, T. 2019. Evaluating and comparing remote sensing terrestrial GPP models for their response to climate variability and CO₂ trends. *Science of the Total Environment*, 668, 696-713.
- Teobaldo, D.; Baptista, G. M. M. 2016. Quantificação da severidade das queimadas e da perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 1, 250-264.
- USGS. United States Geological Survey. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 22 de maio de 2023.

- Vivaldi, D. D.; Baptista, G. M. M.; Meneses, P. R. 2013. Avaliação dos processamentos de crosstalk e de correção atmosférica em dados ASTER para identificação da relação mineralógica caulinita / (caulinita + gibbsita) em solos no município de São João d'Aliança (GO). *Brazilian Journal of Geology*, 43, 3, 571-582.
- Wang, K.; Jiang, Q. G.; Yu, D. H.; Yang, Q. L.; Wang, L.; Han, T. C.; Xu, X. Y. 2019. Detecting daytime and nighttime land surface temperature anomalies using thermal infrared remote sensing in Dandong geothermal prospect. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80, 196-205.
- Wutzer, T.; Lucas-Moffat, A.; Migliavacca, M.; Knauer, J.; Sickel, K.; Sigut, L.; Menzer, O.; Reichstein, M. 2018. Basic and extensible post-processing of eddy covariance? flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15, 16, 5015-5030.