

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA E DA FOTOSÍNTESE LÍQUIDA DETERMINADOS COM ESPECTRORRADIOMETRIA EM CAMPO E DADOS DE SATÉLITE

Joélia Natália Bezerra da **Silva**¹, Rodrigo de Queiroga **Miranda**², Magna Soelma Beserra de **Moura**³, Josiclêda Domiciano **Galvêncio**⁴

(1 - Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, joelia.silva@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0002-2106-5933>; 2 - Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, rodrigo.qmiranda@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5464-2397>, 3 - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Semiárido/Embrapa Agroindústria Tropical, magna.moura@embrapa.br, <https://orcid.org/0000-0002-2844-1399>; 4 - Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, josicleda.galvencio@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0001-7367-6587>)

Resumo - Estudos do balanço de carbono fornecem informações importantes para entender a dinâmica da atmosfera, os diferentes padrões de resposta da vegetação e os efeitos da degradação/recuperação dos ecossistemas terrestres. O objetivo do estudo foi avaliar a confiabilidade das estimativas da Produção Primária Bruta (PPB) e da Fotossíntese Líquida (PSN_{net}) determinadas por meio de dados hiperespectrais medidos em campo com os produtos MOD17A2 do MODIS para uma área de caatinga. As determinações da reflectância espectral do dossel da caatinga foram realizadas para o período de quatro anos (2014-2017), em intervalos de quinze ou oito dias. Para a área de estudo foram extraídos os dados do produto MOD17A2. Dados de PPB e PSN_{net} obtidos por meio de satélite e dados de espectrorradiômetro em superfície foram avaliados por meio de estatística descritiva, do coeficiente de correlação de Spearman (ρ) e da raiz do erro médio quadrático (REMQ). Os resultados mostraram que os dados do MOD17A2 subestimaram os valores observados de Produtividade Primária Bruta (PPB) determinado com dados do Espectrorradiômetro, mas apresentam valores coerentes no padrão temporal, podendo ser indicado para uso em caso de não existir valores observados. A relação existente entre os valores observados e estimados da PPB foi de $\rho = 0,7$, como nível de significância de 0,01. Para a Fotossíntese Líquida (PSN_{net}), os valores obtidos com o MOD17A2 e Espectrorradiômetro divergiram, uma vez que ainda não existem modelos

calibrados com precisão estimativa da PSN_{net} em vegetação de caatinga. Portanto, recomenda-se o desenvolvimento e a calibração de modelos de determinação da Fotossíntese Líquida para sua estimativa mais precisa em áreas de floresta tropical sazonalmente seca, como a Caatinga.

Palavras-chave: Sequestro de carbono. FieldSpec® 4 Hi-Res. Caatinga. MODIS.

ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF GROSS PRIMARY PRODUCTION AND NET PHOTOSYNTHESIS DETERMINED BY FIELD SPECTRORADIOMETRY AND SATELLITE DATA

Abstract - Carbon balance studies provide important information for understanding atmospheric dynamics, the different response patterns of vegetation, and the effects of terrestrial ecosystem degradation/restoration. The objective of the study was to evaluate the reliability of estimates of Gross Primary Productivity (GPP) and Net Photosynthesis (PSN_{net}) determined through hyperspectral data measured the field, and using MOD17A2 products from MODIS for a caatinga area. The spectral reflectance determinations of the caatinga canopy were conducted over a four-year period (2014-2017), at intervals of fifteen or eight days. For the study area, data from the MOD17A2 product were extracted. GPP and NPP data obtained through satellite and surface spectroradiometer measurements were assessed using descriptive statistics, Spearman's correlation coefficient (ρ), and root mean square error (RMSE). The results showed that the MOD17A2 data underestimated the observed values of Gross Primary Production (GPP) determined with spectroradiometer data but exhibited coherent values in the temporal pattern, making it suitable for use in the absence of observed values. The relationship between observed and estimated GPP values was $\rho = 0.7$, with a significance level of 0.01. For Net Photosynthesis (NPP), the values obtained with MOD17A2 and the spectroradiometer diverged, as there are currently no accurately calibrated models for estimating NPP in caatinga vegetation. Therefore, it is recommended to develop and calibrate models for determining Net Photosynthesis for more accurate estimates in areas of seasonally dry tropical forest, such as the Brazilian Caatinga.

Keywords: Carbon sequestration. FieldSpec® 4 Hi-Res. Caatinga. MODIS.

ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA BRUTA Y LA FOTOSÍNTESIS NETA DETERMINADAS POR ESPECTRORRADIOMETRÍA DE CAMPO Y DATOS DE SATELITE

Resumen - Los estudios del balance de carbono proporcionan información importante para entender la dinámica de la atmósfera, los diferentes patrones de respuesta de la vegetación y los efectos de la degradación/recuperación de los ecosistemas terrestres. El objetivo del estudio fue evaluar la fiabilidad de las estimaciones de la Producción Primaria Bruta (PPB) y de la Fotosíntesis Neta (PSN_{net}) determinadas a través de datos hiperespectrales medidos en campo con los productos MOD17A2 del MODIS para un área de caatinga. Las determinaciones de la reflectancia espectral del dosel de la caatinga se realizaron durante un período de cuatro años (2014-2017), en intervalos de quince u ocho días. Para el área de estudio se extrajeron los datos del producto MOD17A2. Los datos de PPB y PSN_{net} obtenidos mediante satélite y los datos de espectrorradiómetro en superficie fueron evaluados mediante estadística descriptiva, el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) y la raíz del error cuadrático medio (RECM). Los resultados mostraron que los datos del MOD17A2 subestimaron los valores observados de la Producción Primaria Bruta (PPB) determinados con datos del espectrorradiómetro, pero presentaron valores coherentes en el patrón temporal, lo que sugiere que podrían utilizarse en caso de no disponer de valores observados. La relación entre los valores observados y estimados de la PPB fue de $\rho = 0,7$, con un nivel de significancia de 0,01. Para la Fotosíntesis Neta (PSN_{net}), los valores obtenidos con el MOD17A2 y el espectrorradiómetro divergieron, ya que aún no existen modelos calibrados con precisión para la estimación de la PSN_{net} en la vegetación de caatinga. Por lo tanto, se recomienda el desarrollo y la calibración de modelos para determinar la Fotosíntesis Neta, con el fin de obtener estimaciones más precisas en áreas de bosques tropicales estacionalmente secos, como la Caatinga.

Palabras clave: Secuestro de carbono. FieldSpec® 4 Hi-Res. Caatinga. MODIS.

Introdução

O estudo dos fluxos de carbono sobre os ecossistemas tem contribuído para entender os diferentes padrões da vegetação, incluído os efeitos da degradação e da recuperação desses ambientes. A Produção Primária Bruta (PPB) é a quantidade total de dióxido de carbono (CO₂) fixado pelas plantas durante o processo de fotossíntese, representando a totalidade do carbono assimilado antes de qualquer perda respiratória, desempenhando um papel fundamental no ciclo biogeoquímico do carbono (Jia et al., 2020; Silva et al., 2021; Prakash Sarkar et al., 2022; Silva et al., 2024). A fotossíntese líquida (PSN_{net}), por sua vez, representa a diferença entre a PPB e

a respiração do ecossistema, refletindo o carbono que é realmente armazenado e utilizado para crescimento do ecossistema (Poulter et al., 2014; Baldocchi et al., 2001).

Algumas pesquisas indicam que, apesar das condições climáticas adversas, as regiões semiáridas podem absorver quantidades significativas de CO₂, pois em geral as espécies que compõem esses ecossistemas são extremamente adaptadas ao estresse hídrico, e apesar da variabilidade interanual, sua absorção de carbono pode representar até 40% da variabilidade do ciclo global de carbono (Costa et al., 2022; Mendes et al., 2020; Poulter et al., 2014). Portanto, é importante entender o comportamento da variabilidade da absorção de carbono nessas áreas a fim de quantificar e prever os efeitos das alterações climáticas (Tagesson et al., 2017; Zhu et al., 2023; Silva et al., 2024).

A floresta tropical sazonalmente seca do Brasil, a Caatinga, é o quarto maior bioma do Brasil, abrangendo aproximadamente um milhão de quilômetros quadrados (Jesus et al., 2023). Sua vegetação tem a capacidade de se ajustar às adversidades ambientais e a riqueza de espécies endêmicas tem grande potencial de sequestro de carbono e de redução dos impactos no clima (Silva et al., 2017; Tabarelli et al., 2018).

A estimativa do sequestro de carbono por meio das Produtividades Primária Bruta e Líquida ainda é um grande desafio para o sensoriamento remoto em ecossistemas secos devido à regulação climática e a grande variação espacial. O conjunto de dados que tem sido bastante utilizado é o do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que utiliza algoritmos para descrever os processos dos ciclos de água e do carbono em diferentes ecossistemas (Oliveira et al., 2022; Zhang et al., 2023). O produto do MODIS utiliza o conceito de eficiência de uso da luz (LUE) desenvolvido por Monteith (1972) e Monteith (1977), onde PPB é uma função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) pelas plantas e a eficiência de conversão da energia luminosa absorvida (ϵ).

As observações baseadas em dados hiperspectrais têm melhorado a compreensão da fenologia da vegetação, porém é importante que haja representatividade em relação à heterogeneidade espacial. Assim, a associação de dados pontuais utilizados na estimativa de componentes do balanço de carbono com produtos de satélite pode permitir melhorias na representação desses componentes a nível de bioma.

No bioma Caatinga existem poucas análises de precisão de métodos ou produtos de sensoriamento remoto que tornam possível avaliar o sequestro de carbono a partir da utilização de imagens de satélite e dados hiperspectrais da vegetação (Silva et al., 2021). Deste modo,

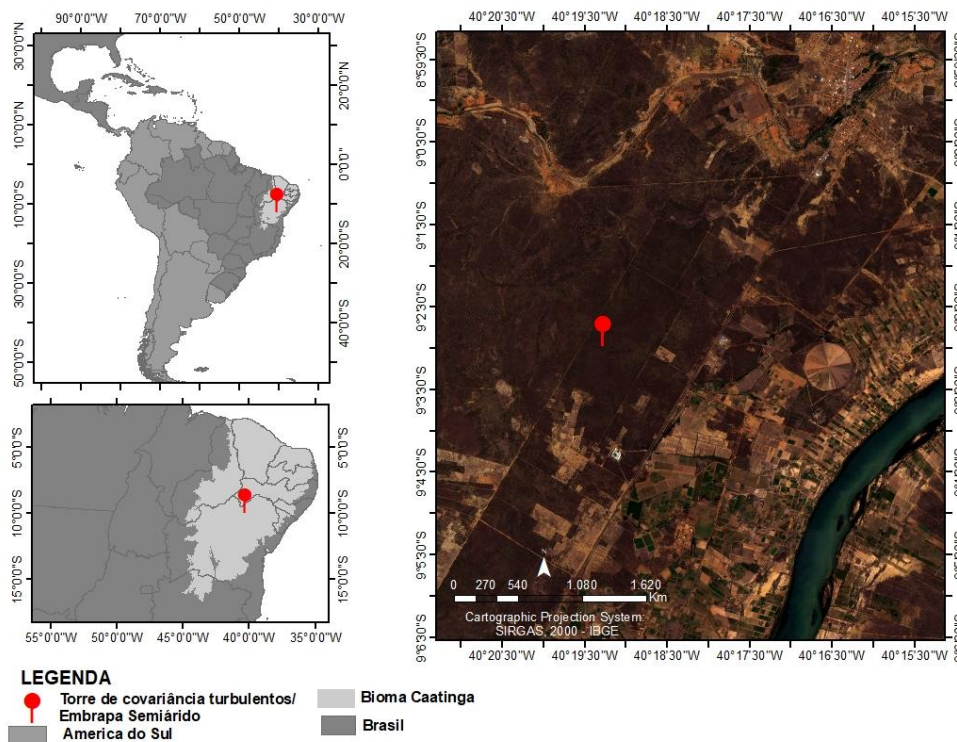
esse estudo teve por objetivo avaliar confiabilidade das estimativas da Produção Primária Bruta (PPB) e da Fotossíntese líquida (PSN_{net}) determinadas por meio de dados hiperespectrais medidos em campo com os produtos MOD17A2 do MODIS para uma área de caatinga.

Material e Métodos

Delimitação e caracterização da área de estudo

A área em estudo fica localizada no município de Petrolina, Pernambuco, Brasil, no extremo oeste do estado, a uma latitude de 09°02'49" Sul e a uma longitude 40°19'16" Oeste, com altitude de 375 m acima do nível médio do mar. O ponto destacado na Figura 1 corresponde a uma área de Reserva Legal da Embrapa Semiárido, onde verifica-se a presença da vegetação de Caatinga preservada há mais de 50 anos. O clima é semiárido, as chuvas são concentradas entre os meses de novembro e abril, com precipitação pluviométrica média anual de 502 mm, temperatura do ar 26,5 °C, evaporação anual de 2600 mm e umidade relativa média anual de 61% (Moura et al., 2007).

Figura 1. Localização da torre de covariância de fluxos turbulentos na Reserva Legal da Embrapa Semiárido, oeste do estado de Pernambuco, Brasil.



Fonte: os autores.

Dados orbitais

Neste estudo foram utilizados dados do sensor MODIS, principal instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua, que é um dos sistemas de observação da Terra da NASA. O MODIS realiza observações de toda a superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias e adquire dados em 36 bandas espectrais que se situam entre 0,4 e 14,4 μm . Para a análise dos dados ao longo período de estudo (2014-2017), foram utilizados os dados do produto MOD17A2 com resolução espacial de 1 km e temporal de 8 dias. Foram utilizadas imagens adquiridas em 71 dias durante o período de estudo.

O produto MOD17A2 possui três camadas: PPB (Produção Primária Bruta); PPL (Produção Primária Líquida) e PSN_{net} (Fotossíntese Líquida), além da camada de qualidade do pixel em $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Nesse produto, a PPB foi obtida por meio da equação (1):

$$PPB_{MODIS} = \varepsilon \times APAR = \varepsilon \times fAPAR \times APAR \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: ε é a eficiência da conversão da luz absorvida em biomassa, ou eficiência de uso da luz. APAR é a estimativa da radiação solar absorvida pelas plantas, que é utilizada para a fotossíntese em $\text{C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, e o fAPAR é derivado de resoluções espectrais.

A fotossíntese líquida é computada pela equação 2:

$$\text{PSN}_{\text{net}}_{MODIS} = PPB - R_n \quad (\text{Eq. 2})$$

onde: R_n é a respiração de manutenção da massa foliar. As estimativas são calculadas diariamente, e combinadas para elaboração de um produto semanal (8 dias).

No presente estudo, os dados de PPB e PSN_{net} oriundos do produto MOD17A2 são referenciados no texto, tabelas ou figuras como PPB MOD17A2 ou PPB MODIS e PSN_{net} MOD17A2 ou PSN_{net} MODIS.

Dados hiperespectrais obtidos em superfície no dossel da Caatinga

Na área de estudo foi mensurada a energia radiante da vegetação na região da torre micrometeorológica utilizando um espectrorradiômetro FieldSpec® 4 Hi-Res. As medidas radiométricas do dossel foram coletadas entre os anos de 2014 e 2017, a cada 15 dias nos dois primeiros anos e a cada 8 dias nos dois últimos anos. As medições da vegetação ocorreram acima do dossel em quatro direções (Norte, Sul, Leste e Oeste). Foram um total de 71 dias de medições ao longo do período de estudo. Foram realizadas medidas de refletância, radiância e irradiância.

Para a estimativa da Produtividade Primária Bruta foi adotada a metodologia de Moura et al. (2012), na qual o Índice de Vegetação de Diferença da Água (WDVI) foi utilizado como melhor ajuste para a equação de estimativa do PPB, e aplicado no presente estudo:

$$WDVI = \rho_{830} - 1,06 \times \rho_{660} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: ρ_{IV} é a refletância da banda do infravermelho próximo, ρ_V é refletância da banda vermelho. Assim, o cálculo da PPB realizado utilizando os dados hiperespectrais foi realizado conforme equação 4 (Moura et al., 2012), e neste estudo está sendo referenciada como PPB Espectrorradiômetro:

$$PPB \text{ Espectrorradiômetro} = \frac{WDVI + 0,2782}{0,2137} \quad (\text{Eq. 4})$$

Os índices NDVI e sPRI foram utilizados de acordo com a metodologia de Rahman et al. (2000) para estimar a Fotossíntese Líquida (PSN_{net}) com dados do espectrorradiômetro. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um índice muito utilizado nos estudos da vegetação, e pode ser obtido por meio da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V) (Equação 5):

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (\text{Eq. 5})$$

O Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) (Equação 6) é um índice de vegetação sensível às alterações nos pigmentos de carotenoides (principalmente a xantofila) na folhagem.

$$PRI = \frac{\rho_{IV} + \rho_V}{\rho_{IV} - \rho_V} \quad (\text{Eq. 6})$$

Segundo a metodologia de Rahman et al. (2000), os dados de PRI devem ser reescalados para valores positivos, gerando um novo índice, o sPRI (Equação 7):

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Neste estudo, a estimativa da PSN_{net} realizada com dados de hiperespectrais obtidos à superfície foi chamada de PSN_{net} Espectrorradiômetro, utilizando a equação proposta por Rahman et al. (2000) (Equação 8).

$$PSN_{net} \text{ Espectrorradiômetro} = -5,6(NDVI \times sPRI) - 0,69 \quad (\text{Eq. 8})$$

Procedimento estatístico

As performances do modelo foram avaliadas usando dois índices estatísticos: um para tendência (coeficiente de Spearman – ρ , Eq. 9) e outro para desvio (Erro Médio Quadrático – RMSE, Eq.10). As estatísticas foram realizadas usando a linguagem de programação no R.

$$\rho = \frac{(x, y)}{(x)(y)} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Resultados e Discussão

As estatísticas descritivas da Produção Primária Bruta (PPB) obtida com dados do MODIS (PPB MOD17A2) em escala de oito dias e da PPB determinada com dados de campo (PPB Espectrorradiômetro) são apresentadas na Tabela 1. Nota-se que há semelhança nas médias, desvio padrão, valores mínimos e máximos nas estimativas da PPB. Foi observado na estatística descritiva do PPB que os valores médios foram iguais ($17,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), tanto para o PPB MOD17A2, quanto para o PPB Espectrorradiômetro. Os valores máximos encontrados foram de $30,6 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para os dados de satélite (PPB MOD17A2) e de $33,9 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para os dados de PPB Espectrorradiômetro. Os valores mínimos foram muito similares, sendo $12,8 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para o PPB MOD17A2 e $12,7 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para PPB espectrorradiômetro. Essa similaridade entre os resultados é devido à equação de PPB aplicada nos dados hiperespectrais estar calibrada para a área de vegetação de Caatinga.

No caso da Fotossíntese Líquida (PSN_{net}), a estatística descritiva apresentada na Tabela 1 mostra diferença em torno de 74% na média dos valores de PSN_{net} MOD17A2 em relação ao PSN_{net} Espectrorradiômetro. De forma similar, os dados máximos, mínimos e o desvio padrão também foram bem diferentes ao se observar os resultados obtidos com o MODIS e com o Espectrorradiômetro, visto que a equação de Rahman et al., (2000) utilizada para estimativa da PSN_{net} não está calibrada para a vegetação da caatinga.

Tabela 1. Estatísticas descritivas da Produtividade Primária Bruta (PPB) e Fotossíntese Líquida (PSN_{net}), em $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$, para o dossel de uma área de Caatinga, em Petrolina, PE.

Estatísticas descritivas	PPB	PPB	PSN_{net}	PSN_{net}
	MOD17A2	Espectrorradiômetro	MOD17A2	Espectrorradiômetro
Média	17,5	17,5	4,11	15,4
Máxima	30,6	33,9	5,09	25,4
Mínima	12,8	12,7	1,90	9,92
Desvio Padrão	2,21	4,90	2,22	14,0

Fonte: os autores.

Neste estudo foi considerado que os dados de PPB obtidos com espectrorradiômetro em campo, e computados conforme a equação desenvolvida por Moura et al. (2012) seria a referência para comparação (verdade terrestre) com os dados do MODIS, uma vez que essa equação foi desenvolvida e calibrada utilizando dados de campo da área em estudo.

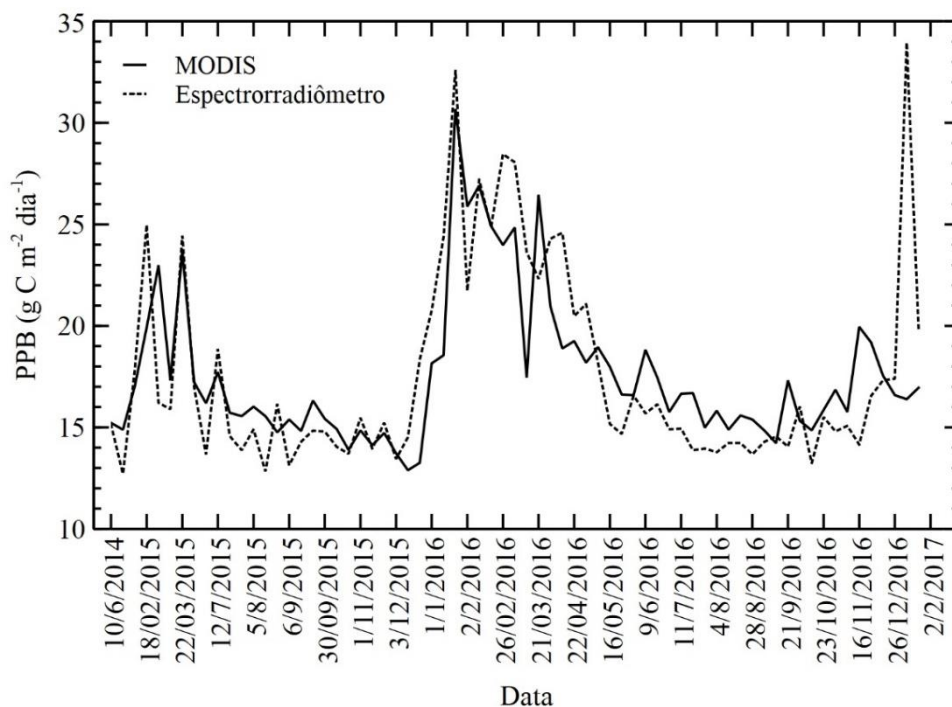
Na Figura 2 se observa que o MOD17A2 subestima a PPB em dias com elevados valores determinados com os dados de campo (PPB Espectrorradiômetro), e subestima para os dias com menores valores. Ainda é possível notar que a PPB determinada com dados de campo variou entre 15 e 35 $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$.

Foi avaliada a precisão dos dados de PPB estimado com o MOD17A2 em comparação com os dados de PPB oriundos do espectrorradiômetro. Obteve-se um coeficiente de correlação $\rho = 0,7$ (Figura 3), com nível de significância de 0,05 e o REMQ = 7,69 (Figura 3). Nota-se também que o MOD17A2, mesmo com valores coerentes, subestima os dados obtidos com as observações em campo. Jiang et al. (2013) realizaram comparações entre o PPB *Eddy covariance flux tower* com o PPB do produto MOD17A2 e obtiveram uma correlação linear simples com $r = 0,83$, que subestimou os valores medidos na Torre. Este resultado é semelhante ao obtido neste estudo para o ecossistema Caatinga, pois o PPB do MODIS subestimou os valores obtidos em campo com espectrorradiometria. No estudo de Álvarez-Taboada et al., (2015) realizado em um ambiente de clima seco, avaliou-se os dados de PPB do MODIS (PPB MODIS) e de PPB da torre de fluxos obtidos pelo método das correlações turbulentas (PPB EC), para seis diferentes com regiões de clima temperado e seco (três pastagens, dois matagais e uma floresta sempre verde). Os resultados deste estudo mostram que, para os locais não-florestais em áreas restrição hídrica, o PPB MODIS está bem correlacionado com PPB EC em escalas anuais ($R^2 = 0,77$, $n = 12$; $SEE = 149,26\ gC\ m^{-2}\ ano^{-1}$). No estudo de Costa et al. (2022), o PPB MODIS representou satisfatoriamente o PPB EC (medido pela torre de fluxos

turbulentos), tanto na estação seca, quanto na estação chuvosa, apresentando $R^2 = 0,76$ e $R^2 = 0,62$, respectivamente.

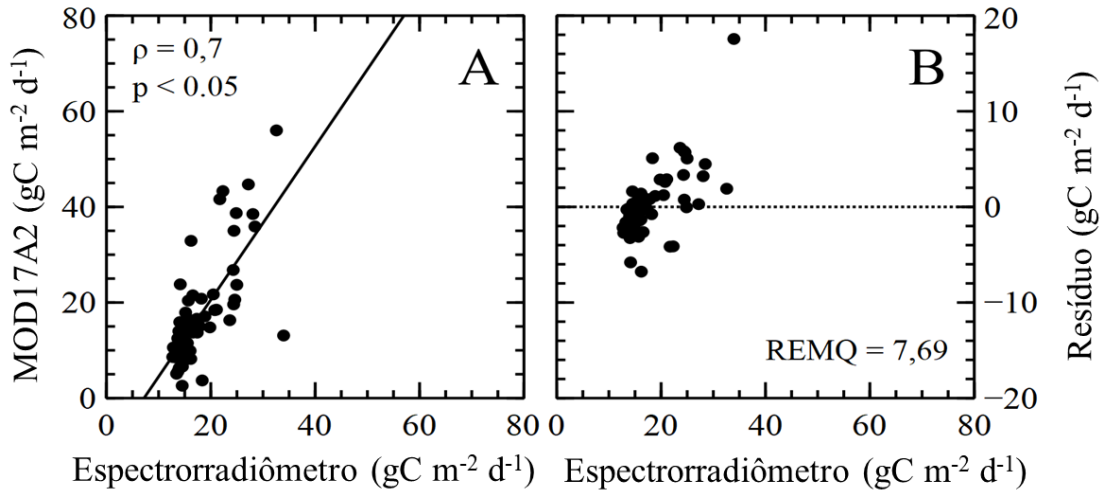
A primeira interação entre os resíduos e a densidade do PPB apontam que os resíduos se distribuem aleatoriamente em torno da linha de tendência, de modo que o modelo apresentou $REMQ = 7,69 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, considerando-se o erro médio no modelo de regressão linear (Figura 3B). Gelybó et al. (2013) obtiveram estimativas da PPB utilizando dados da torre de *Eddy covariance* e dados do produto MOD17A2 em uma área agrícola e em manchas florestais na Hungria Ocidental, e o erro quadrático médio em suas análises diminuiu de $1,095 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para $0,815 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, embora a PPB MOD17A2 permaneceu subestimada em comparação aos dados obtidos pelo método das correlações turbulentas.

Figura 2. Variação temporal da Produção Primária Bruta (PPB) obtida pelo produto de satélite do MODIS (MOD17A2) e estimado com dados hiperespectrais obtidos do dossel da caatinga, na Área de Reserva Legal da Embrapa Semiárido, em Petrolina, PE.



Fonte: os autores.

Figura 3. Correlação e Resíduo da Produtividade Primária Bruta (PPB) obtida pelo MODIS (MOD17A2) e com dados do Espectrorradiômetro medido no dossel da Caatinga preservada, na Embrapa Semiárido, em Petrolina – PE.

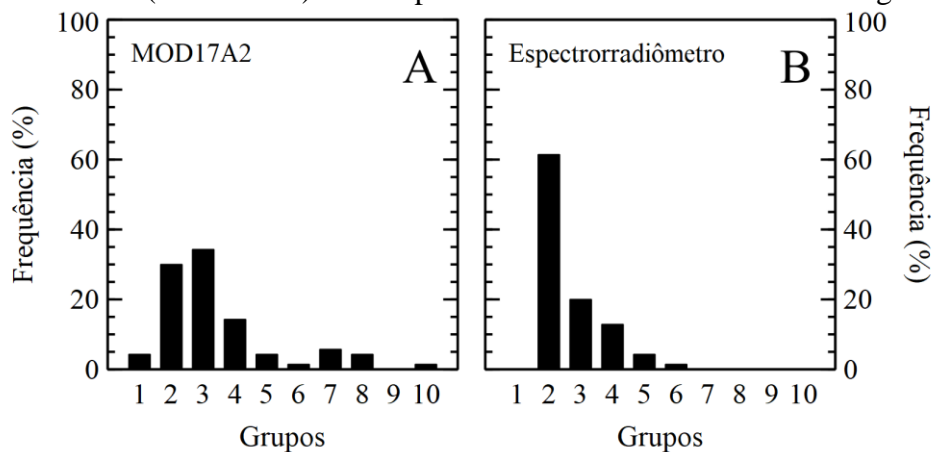


Fonte: os autores.

Para avaliar a distribuição dos intervalos de classe dos dados de PPB MODIS e PPB Espectrorradiômetro foi obtido o histograma de frequência (Figura 4A e B). De acordo com os histogramas, o grupo 2 tem a maior frequência, mas a PPB Espectrorradiômetro apresenta uma concentração significativamente maior nesse grupo (aproximadamente 60%) em comparação com a PPB MOD17A2 (cerca de 30%). Nos dados do MOD17A2, em torno de 60% de frequência se dá em três classes: 2, 3 e 4. A PPB MOD17A2 apresenta alta frequência de dados no grupo 3. Isso evidencia que há diferenças marcantes na forma como cada método distribui os dados entre os grupos avaliados. A distribuição dos dados do MODIS se dá em praticamente todas as classes (nove), enquanto a do espectrorradiômetro ocorre em apenas seis classes dentre as dez.

Em geral, o MOD17A2 segue o padrão dos intervalos de classe dos dados do espectrorradiômetro para a PPB. Souza (2014) usou o MOD17A2 e o Modelo de Fotossíntese da Vegetação (VPM, em inglês) para avaliar a PPB do Cerrado, quando comparado os valores do melhor desempenho, o produto do MOD17A2 não apresentou melhor resultados, por utilizar dados climáticos não calibrados para a vegetação global, enquanto o índice VPM utilizou dados medidos para estimar o sequestro de carbono.

Figura 4. Histograma dos grupos da Produtividades Primária Bruta obtida com dados do MODIS (MOD17A2) e do Espectrorradiômetro em área de caatinga.

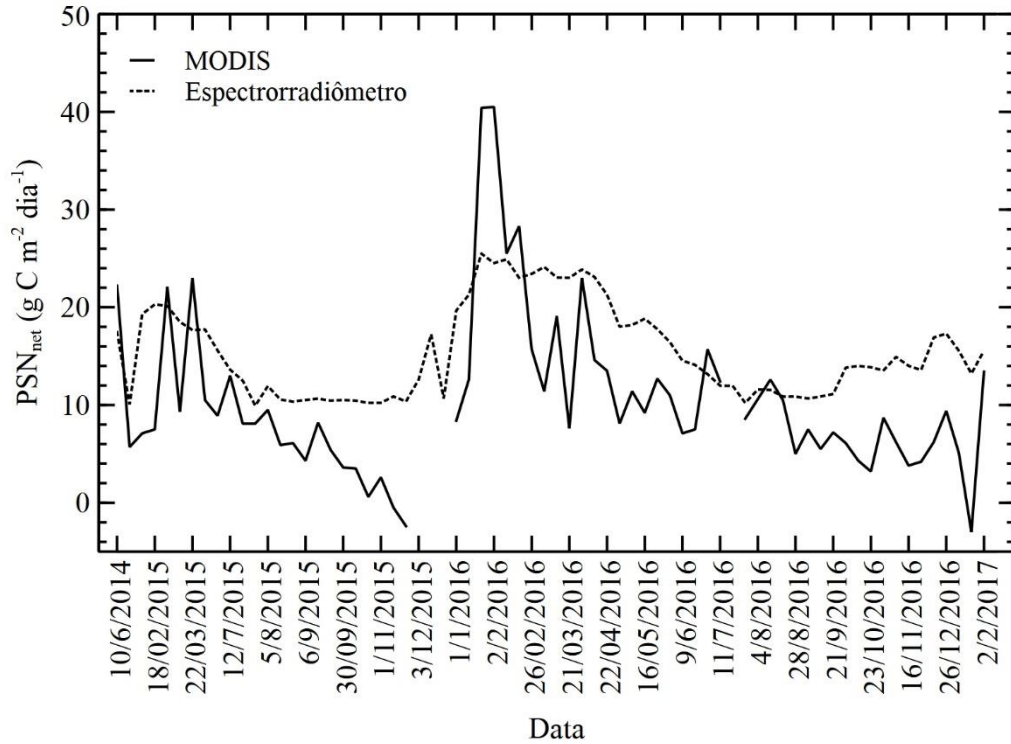


Fonte: os autores.

A Figura 5 apresenta a variação temporal da fotossíntese Líquida (PSN_{net}) do MOD17A2 (MODIS) e do Espectrorradiômetro. Nota-se que a PSN_{net} do MODIS subestima as estimativas da PSN_{net} do Espectrorradiômetro, porém, não é possível avaliar a precisão dos dados do produto MODIS, pois a equação utilizada para estimativa da PSN_{net} do Espectrorradiômetro não foi calibrada para a vegetação de caatinga. Neste caso, esta análise serviu para mostrar a importância do desenvolvimento de uma equação de PSN_{net} calibrada para a vegetação de Caatinga com dados hiperespectrais. Diante deste resultado, a PSN_{net} MODIS representou muito bem o padrão da variação temporal da fotossíntese líquida, como observado na Figura 5. Neste caso específico, preferiu-se então adotar as estimativas da PSN_{net} MODIS para avaliar a variação temporal da PSN_{net} na caatinga, já que os dados estimados com a equação de Rahman et al. (2000) foram calibrados para florestas boreais.

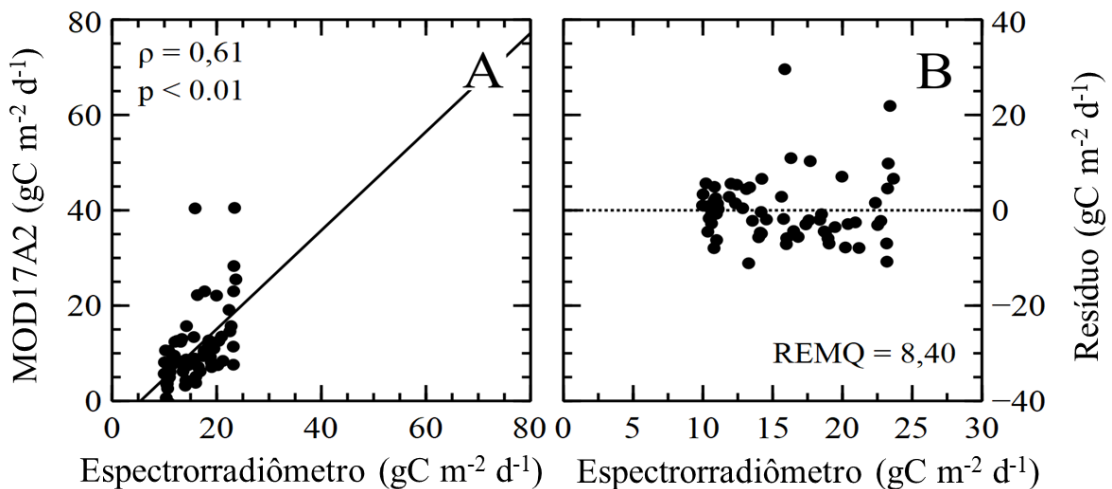
A distribuição das médias diárias de PSN_{net} seguiu a mesma tendência da correlação da Produção Primária Bruta (PPB). Os dados de PSN_{net} para o período de 2014 à 2017 também apresentaram percentual de correlação satisfatória, sendo que a PSN_{net} Espectrorradiômetro e a PSN_{net} MODIS apresentaram variância com $\rho = 0,61$, indicando 60% de confiança, e forte relação entre as variáveis, sendo a relação positiva, forte e crescente (Figura 6A).

Figura 5. Variação temporal da Fotossíntese Líquida (PSN_{net}) obtida com o produto MOD17A2 (MODIS) e estimada com dados do Espectrorradiômetro sobre o dossel da caatinga preservada na Embrapa Semiárido, em Petrolina, PE.



Fonte: os autores.

Figura 6. Correlação e Resíduo da Fotossíntese Líquida (PSN_{net}) obtida pelo produto do MODIS (MOD17A2) e determinada com dados do Espectrorradiômetro para o dossel da caatinga preservada, na Embrapa Semiárido, em Petrolina, PE.

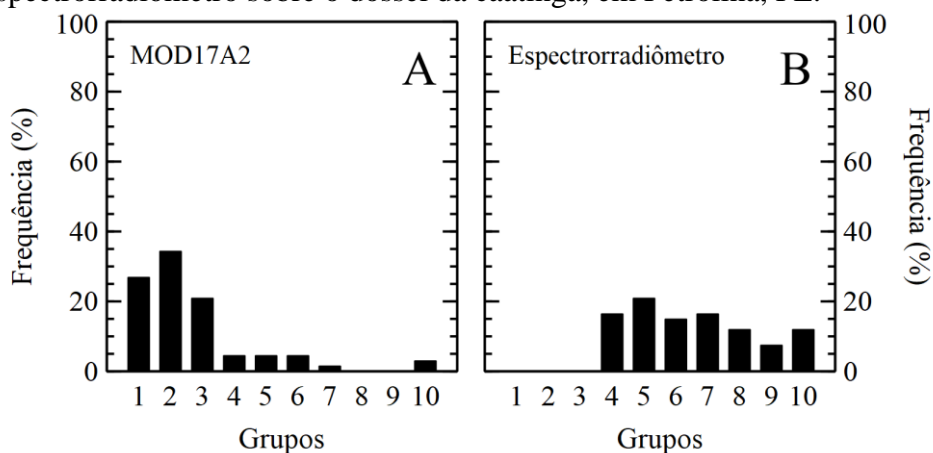


Fonte: os autores.

Embora a equação de Rahman (2000) não tenha sido calibrada especificamente para a caatinga, é possível afirmar que PSN_{net} MODIS representa adequadamente o padrão temporal da fotossíntese líquida nesse ambiente. Observou-se uma tendência significativa para a inclinação da linha de regressão ser igual a zero. Também foram identificadas tendências com declives significativos ($p < 0,01$), e as tendências significativamente positivas estão uniformemente distribuídas (Figura 6A). Resultados semelhantes foram encontrados por Colombo et al. (2009), que observaram uma variabilidade estatisticamente significativa entre os dados de campo e os modelados da produção primária líquida interanual ($p < 0,01$). Observa-se que a tendência de agrupamento é verificada entre os valores da nuvem de pontos dos sensores, indicando uma variância constante da estimativa. Os resíduos permitiram avaliar os tipos de erros associados com estimativas dos sensores (Figura 6B). A primeira interação entre os resíduos e a densidade da PSN_{net} apontam que os resíduos se distribuem aleatoriamente em torno da linha de tendência, de modo que o modelo apresentou $REMQ = 8,40 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, considerando-se erro médio no modelo de regressão linear (Figura 6B). O erro foi bem distribuído, os resíduos foram negativos para a PSN_{net} com densidade de $-8,4$ e positivo com valores de $8,4$. No estudo de Moura et al. (2017) o erro quadrático RMSE apresentou valores variando de $0,355 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a $0,470 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

O histograma de frequência, que compara os valores estimados com os valores medidos em campo, não exibiu uma distribuição normal, apresentando valores assimétricos. Observou-se que a frequência dos valores de PSN_{net} MOD17A2 foi maior nas classes de 1 a 3, enquanto a distribuição dos valores foi menor dentro dos grupos fora dessas classes, indicando uma concentração maior de valores nas classes de 1 a 3 (Figura 7A). Os valores da PSN_{net} Espectrorradiômetro foram maiores nas classes de 4 a 10, apresentando conseqüentemente valores mais altos do que a PSN_{net} MOD17A2. Pela distribuição das frequências (Figura 7B), verifica-se que as variações da fotossíntese líquida seguem uma distribuição próxima ao exponencial, com valores de maior frequência observados na PSN_{net} Espectrorradiômetro. Nota-se também que não há semelhança na forma de distribuição dos valores de fotossíntese líquida do produto do MODIS (MOD17A2) com as da determinada pelo Espectrorradiômetro (Figura 7B).

Figura 7. Histograma da Fotossíntese Líquida obtida com o produto do MODIS (MOD17A2) e com o Espectrorradiômetro sobre o dossel da caatinga, em Petrolina, PE.



Fonte: os autores.

Considerações finais

- A variação temporal da Produção Primária Bruta (PPB) permitiu verificar que os dados obtidos do produto de satélite MODIS/MOD17A2 e em nível de dossel, com o Espectrorradiômetro apresentaram similaridade nos valores estimados. Diferentemente, a Fotossíntese Líquida (PSN_{net}) derivada do MODIS/MOD17A2 divergiu das estimativas de PSN_{net} resultantes dos dados do Espectrorradiômetro, coletados em nível de dossel da caatinga. Foi compreendido que o método utilizado na determinação da Fotossíntese Líquida com dados do Espectrorradiômetro, por ter sido calibrado para floresta boreal, não estimou tão bem a PSN_{net} para a caatinga, pois existem diferenças estruturais e fisiológicas marcantes entre as espécies da área de desenvolvimento do modelo com a área de realização deste estudo.
- As estatísticas descritivas mostraram semelhanças entre os valores médios das estimativas dos modelos. As correlações entre os modelos determinaram a relação que existe entre a tendência temporal, e a raiz do erro médio quadrático permitiu verificar que a Fotossíntese Líquida determinada com dados do Espectrorradiômetro apresentou maiores erros em relação a Produção Primária Bruta (PPB) avaliada com o Espectrorradiômetro e com o produto do MODIS/MOD17A2.
- A aplicabilidade da Produção Primária Bruta (PPB) do produto MOD17A2; da PPB Espectrorradiômetro e da Fotossíntese Líquida (PSN_{net}) determinada com o

Espectrorradiômetro permitiu verificar a importância da criação de modelos de estimativa da fotossíntese líquida calibrados para a o ecossistema da caatinga.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelos auxílios financeiros vinculados aos processos IBPG-0072-25/16, APQ-0392-3.07/22 e APQ-0044-3.07/24. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo apoio financeiro junto ao Processo 405853/2022-0. À Embrapa Semiárido pela disponibilização da infraestrutura e coleta dos dados de campo. Ao laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento - SERGEO, e a Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

Referências

Álvarez-Taboada, F., Tammadge, D., Schlerf, M., & Skidmore, A. (2015). Assessing MODIS GPP in Non-Forested Biomes in Water Limited Areas Using EC Tower Data. *Remote Sensing*, 7(3), 3274–3292. <https://doi.org/10.3390/rs70303274>

Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U, KT, Pilegaard, K., Schmid, HP, Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., & Wofsy, S. (2001). FLUXNET: Uma nova ferramenta para estudar a variabilidade temporal e espacial das densidades de dióxido de carbono, vapor de água e fluxo de energia em escala de ecossistema. *Boletim da Sociedade Meteorológica Americana*, 82 (11), 2415-2434. [https://doi.org/10.1175/1520-77\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-77(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2)

Costa, G. B., Mendes, K. R., Viana, L. B., Almeida, G. V., Mutti, P. R., e Silva, C. M. S., Bezerra, B. G., Marques, T. V., Ferreira, R. R., Oliveira, C. P., Gonçalves, W. A., Oliveira, P. E., Campos, S., Andrade, M. U. G., Antonino, A. C. D., & Menezes, R. S. C. (2022). Seasonal Ecosystem Productivity in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) Using Flux Tower Measurements and Remote Sensing Data. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 3955, 14(16)*, 3955. <https://doi.org/10.3390/RS14163955>

de Oliveira, M. L., dos Santos, C. A. C., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, B. B., Cunha,

- J. E. d. B. L., Ruhoff, A., & Santos, C. A. G. (2022). Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. *Science of The Total Environment*, 835, 155490. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155490>
- Gelybó, G., Barcza, Z., Kern, A., & Kljun, N. (2013). Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 174–175, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.02.003>
- Jiang, Y., Zhang, J., Xu, X., & Dong, Z. (2013). A GPP assimilation model for the southeastern Tibetan Plateau based on CO₂ eddy covariance flux tower and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 213–225. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2012.08.015>
- Mendes, K. R., Campos, S., da Silva, L. L., Mutti, P. R., Ferreira, R. R., Medeiros, S. S., Perez-Marin, A. M., Marques, T. V., Ramos, T. M., de Lima Vieira, M. M., Oliveira, C. P., Gonçalves, W. A., Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Bezerra, B. G., & Santos e Silva, C. M. (2020). Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Scientific Reports 2020 10:1*, 10(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>
- Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Moura, M. S. B.; Galvêncio, J. D.; Silva, B. B. da; Machado, C. C. C.; Silva, H. A. da; Oliveira, T. H. de. (2012). Gross primary production using related vegetation indices. *An ASABE Meeting Presentation*, 7004(11), 1–11. Acesso em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/73517/1/Artigo-Magna.pdf>
- Moura, Y. M., Galvão, L. S., Hilker, T., Wu, J., Saleska, S., do Amaral, C. H., Nelson, B. W., Lopes, A. P., Wiedeman, K. K., Prohaska, N., de Oliveira, R. C., Machado, C. B., & Aragão, L. E. O. C. (2017). Spectral analysis of amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and modis observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 52–64. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2017.07.006>
- Poulter, B., Frank, D., Ciais, P., Myneni, R. B., Andela, N., Bi, J., Broquet, G., Canadell, J. G., Chevallier, F., Liu, Y. Y., Running, S. W., Sitch, S., & Van Der Werf, G. R. (2014).

Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature* 2014 509:7502, 509(7502), 600–603. <https://doi.org/10.1038/nature13376>

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.

Silva, J. N. B. da, Galvíncio, J. D., Miranda, R. de Q., & Moura, M. S. B. de. (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. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3775-3784>

Silva, P. F. da, Lima, J. R. de S., Antonino, A. C. D., Souza, R., de Souza, E. S., Silva, J. R. I., & Alves, E. M. (2017). 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*, 147, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>

Souza, L. S. B. (2014). *Análise sazonal dos fluxos de CO₂, energia e vapor d'água sobre um ecossistema de caatinga preservada em um ano seco em Petrolina-PE*. <https://locus.ufv.br//handle/123456789/7313>

Tabarelli, M., Leal, I. R., Scarano, F. R., & Silva, J. M. C. da. (2018). Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. *Ciência e Cultura*, 70(4), 25–29. <https://doi.org/10.21800/2317-66602018000400009>

Tagesson, T., Ardö, J., Cappelaere, B., Kergoat, L., Abdi, A., Horion, S., & Fensholt, R. (2017). Modelling spatial and temporal dynamics of gross primary production in the Sahel from earth-observation-based photosynthetic capacity and quantum efficiency. *Biogeosciences*, 14(5), 1333–1348. <https://doi.org/10.5194/bg-14-1333-2017>

Zhang, Y., Hu, Z., Wang, J., Gao, X., Yang, C., Yang, F., & Wu, G. (2023). Temporal upscaling of MODIS instantaneous FAPAR improves forest gross primary productivity (GPP) simulation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 121(May), 103360. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103360>

Zhu, W., Zhao, C., & Xie, Z. (2023). An end-to-end satellite-based GPP estimation model devoid of meteorological and land cover data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 331(19),

109337. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109337>

Publicação: Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Geografia. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio ambiente. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Joélia Natália Bezerra da Silva: Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Escrita, Rascunho original. Rodrigo de Queiroga Miranda: Análise de dados, Curadoria de dados. Magna Soelma Beserra de Moura: Coordenadora do site Caatinga-FLUX, Coleta de dados em campo, Disponibilização de ferramentas, Conceituação. Josiclêda Domiciano Galvêncio: Supervisão, Coordenação de Projeto de Pesquisa, Conceituação, Validação de dados e Experimentos.

Financiamento: Bolsa de pós-graduação nível Mestrado da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (Facepe).

Conflito de interesse: Os autores não têm interesses financeiros ou não financeiros relevantes a divulgar.