AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE UM EVENTO DE INCÊNDIO NA DINÂMICA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR MEIO DO MODELO ESTIMET

Walleska Maria de Melo Silva [1] ; Bianca Marques Barreiro [2]; Cinthia Maria de Abreu Claudino [3]; Eduardo Gonçalves Patriota [4] ; José Lindemberg Vidal Barbosa [5] ; Suzana Maria Gico Lima Montenegro [6]; Guillaume Francis Bertrand [7]; Cristiano das Neves Almeida [8] ; Cynthia Santos da Silva [9] & Victor Hugo Rabelo Coelho

RESUMO – A evapotranspiração (ET) é o principal mecanismo de transferência de água da superfície para a atmosfera e, por sua elevada sensibilidade às alterações na cobertura vegetal, constitui uma variável fundamental para a compreensão da dinâmica eco-hidrológica. Este estudo avalia os impactos de um evento de incêndio na dinâmica temporal da ET utilizando estimativas do modelo ESTIMET (*Evaluation and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration*). O ESTIMET fornece dados diários de ET real com resolução espacial de 250 m e latência mensal. Para atingir os objetivos, foi analisado o evento de incêndio ocorrido entre 11 e 14 de outubro de 2020 no Parque Estadual Mata da Pimenteira (PE), avaliando-se as estimativas diárias de ET no mês que antecedeu o evento, no mês do evento e no mês subsequente. Verificou-se uma ET média de 0,54 mm/dia no mês anterior ao evento, uma diminuição significativa (-74,48%) no mês do evento e um aumento considerável (+88,56%) após o evento. Além disso, observou-se que o tempo de recuperação da ET após esse evento de incêndio foi de 21 dias (01/11/2020). Os resultados reforçam o potencial da ET como indicador da resposta ambiental a eventos de incêndio e demonstram a aplicabilidade do modelo ESTIMET no monitoramento diário da ET.

ABSTRACT– Evapotranspiration (ET) is the primary mechanism of water transfer from the land surface to the atmosphere and, due to its high sensitivity to changes in vegetation cover, it is a key variable for understanding ecohydrological dynamics. This study evaluates the impacts of a wildfire event on the temporal dynamics of evapotranspiration using estimates from the ESTIMET (Evaluation and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration) model, which provides daily data at a 250 m spatial resolution with low latency. The wildfire event analyzed occurred between October 11 and 14, 2020, in the Mata da Pimenteira State Park, Pernambuco, Brazil. ET estimates were evaluated for the pre-fire, fire, and post-fire periods.The results showed a mean ET of 0.54 mm day^{-1} during the pre-fire period, followed by a significant reduction during the fire event (-74.48%) and an increase in the post-fire period (+88.56%). In addition, the ET recovery time was estimated at 21 days, with recovery occurring on November 1, 2020. These findings highlight the potential of ET as an indicator of environmental responses to wildfire events and demonstrate the applicability of the ESTIMET model for evapotranspiration monitoring.

[1]) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 99117-8569, walleska.maria@academico.ufpb.br
[2]) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 98210-7134 bmb@academico.ufpb.br
[3]) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, (83) 999618-9626, cinthiamariaac@gmail.com.
[4]) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (85) 99972-9552, edugoncalvespatriota@gmail.
[5]) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 99655-3877, jose.lindemberg@academico.ufpb.br
[6]) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, suzana.ufpe@gmail.com
[7]) Université Marie & Louis Pasteur, Montéliard, França, guillaume.bertrand2@univ-fcomte.fr
[8]) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 99349-0880, almeida74br@yahoo.com.br
[9]) Instituto Federal da Paraíba – campus Cajazeiras, R. José Antônio da Silva, 300, bairro Jardim Oásis, Cajazeiras/PB, fone: 83 35324100, e-mail: cinthya.santos@ifpb.edu.br
[10]) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 98886-1663, victor.coelho@academico.ufpb.br

Palavras-Chave – Evapotranspiração; Incêndio; Caatinga.

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração real (ET) é o fenômeno em que a água retorna à atmosfera, sob a forma de vapor, seja pela evaporação das superfícies líquidas, pela umidade do solo ou por meio da transpiração da vegetação (Liu *et al*., 2020; Melo *et a*l., 2021). No método do balanço hídrico, a ET é um dos principais componentes de saída, sendo fundamental sua quantificação para a modelagem hidrológica, a gestão sustentável dos recursos hídricos e o monitoramento ambiental (Grosso *et al*., 2018; Luo *et al*., 2015).

A ET pode ser estimada a partir de métodos diretos e indiretos, incluindo os lisímetros, o monitoramento da água no solo e as técnicas micrometeorológicas baseadas em variáveis como velocidade do vento, temperatura e umidade do ar (Liu *et al*., 2009; Melo *et al*., 2021; Silva *et al*., 2015). Apesar de fornecerem estimativas confiáveis, esses métodos demandam elevado investimento de tempo e recursos, além de apresentarem limitações para aplicações em larga escala. Ademais, a elevada variabilidade espacial da ET em condições naturais dificulta a extrapolação dessas observações para níveis regionais, tornando necessária a utilização de abordagens capazes de fornecer estimativas espacialmente distribuídas (Andrade *et al*. 2021; Grosso *et al*. 2018; Khan *et al*. 2021). Nesse contexto, o sensoriamento remoto destaca-se como uma alternativa eficiente para a estimativa da evapotranspiração, fornecendo ampla cobertura espacial e temporal, menor custo operacional e a possibilidade de monitoramento em áreas onde medições de campo são limitadas ou inexistentes (Ahamad *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2009).

Existem diversos métodos que utilizam dados obtidos por sensoriamento remoto para a estimativa de ET, destacando-se os modelos empíricos, os métodos baseados no balanço de energia e os métodos fundamentados em equações tradicionais, como Penman-Monteith e Priestley-Taylor (Chen e Liu, 2020; Filgueiras *et al*., 2020; Tang *et al*., 2013; Khan *et al*., 2021). Entre os produtos globais de evapotranspiração, destaca-se o MOD16, baseado na abordagem de Penman-Monteith e utilizando dados dos sensores orbitais MODIS. Na versão mais recente do MOD16 (i.e., MOD16A2GF), foi incorporado o preenchimento de lacunas (*Gap-Filled*) para aumentar a disponibilidade e a continuidade temporal das estimativas de ET, principalmente por conta da influência das nuvens (Running *et al*. 2021). Entretanto, limitações relacionadas à parametrização, à resolução espacial e temporal e à elevada latência restringem sua aplicação em análises locais e no monitoramento quase em tempo real, especialmente em regiões tropicais (Biggs *et al*., 2016; Laipelt *et al*., 2021; Luo *et al*., 2015; Running *et al*., 2021; Zhang *et al*., 2016).

O modelo ESTIMET (*Evaluation and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration*) foi desenvolvido como uma versão aprimorada do MOD16 para estimar a ET no Brasil. Entre seus principais avanços, destacam-se o refinamento da resolução espacial de 500 m para 250 m e da resolução temporal (composições de 8 dias) para estimativas diárias. Além disso, enquanto o MOD16A2GF é disponibilizado com latência anual, o ESTIMET oferece um produto de reduzida latência (aproximadamente um mês), também sem interferência de nuvens, possibilitando o monitoramento mais detalhado da dinâmica espaço-temporal e das tendências da ET. Essas melhorias ampliam significativamente o potencial de aplicação do produto em estudos hidrológicos, meteorológicos, climáticos e ambientais que demandam informações mais frequentes e com maior detalhamento espacial (Claudino *et al*., 2025).

Devido ao refinamento de suas resoluções espacial e temporal, o ESTIMET torna-se uma ferramenta importante para analisar a dinâmica da ET em cenários de eventos extremos e de mudanças no uso e na cobertura da terra. Assim, este estudo busca avaliar os impactos de um incêndio, ocorrido no Parque Estadual Mata da Pimenteira (PEMP), na dinâmica temporal da ET, com base nas ET por meio das estimativas fornecidas pelo modelo ESTIMET.

METODOLOGIA

Área de estudo

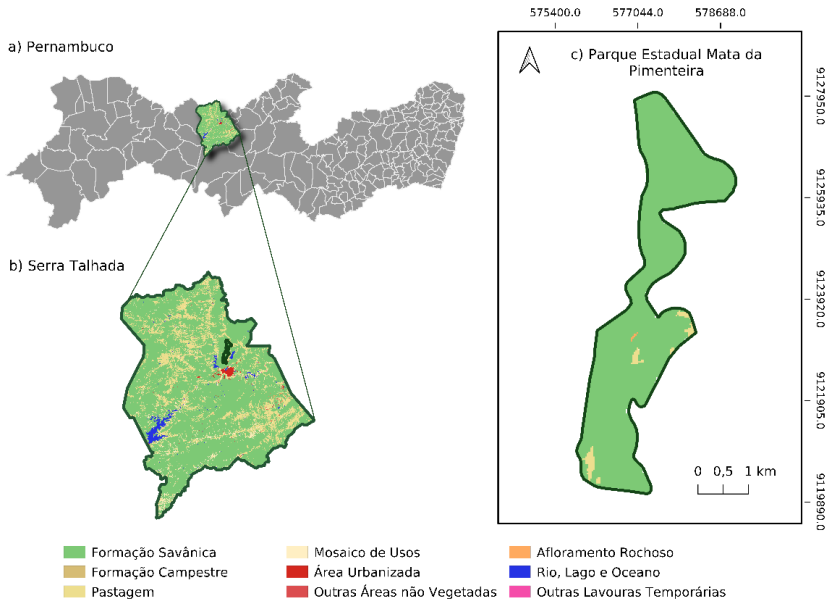
O PEMP está localizado em Serra Talhada, município do estado de Pernambuco, na microrregião do Vale do Pajeú, no semiárido brasileiro (Figura 1). Trata-se de uma Unidade de Conservação da Natureza, inserida no Grupo de Proteção Integral. O Parque possui uma área total de 887,24 ha (CPRH, 2021). Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a área apresenta clima BSh (semiárido quente com inverno seco), com precipitação média anual de 657 mm e temperatura média anual de 25,8 °C, caracterizada por elevadas temperaturas, longos períodos de estiagem e baixa disponibilidade hídrica, condições típicas do bioma Caatinga (Brito *et al*., 2022; Cruz *et al*., 2024).

Além disso, eventos de seca e ondas de calor contribuem para a redução da umidade da vegetação, ou seja, tornam o ambiente mais suscetível à ocorrência e à propagação de incêndios florestais (Bezerra *et al*., 2025). Nesse contexto, o PEMP foi atingido por um incêndio entre os dias 11 e 14 de outubro de 2020 (FOLHA DE PERNAMBUCO, 2020).

Assim, por sua relevância ecológica como Unidade de Conservação representativa do bioma Caatinga, por estar inserido em uma região semiárida com elevada suscetibilidade a incêndios florestais e pela ocorrência de um evento de incêndio com delimitação temporal bem definida, o PEMP constitui uma área representativa para investigar os impactos do fogo sobre a dinâmica da ET,

contribuindo para a compreensão dos efeitos da degradação ambiental sobre os processos eco-hidrológicos em ecossistemas de Caatinga.

Figura 1 – Mapa de localização que mostra o uso e ocupação do município de Serra Talhada e do Parque Estadual Mata Pimenteira, com base em dados do MapBiomas (2025).



Processamento dos dados

Os dados de ET diária foram obtidos por meio do modelo ESTIMET a partir dos componentes de evaporação do dossel, transpiração da vegetação e evaporação do solo, incorporando aprimoramentos em relação ao produto MOD16, como mudanças nos esquemas de parametrização da condutância estomática e da radiação líquida, o uso de parâmetros biofísicos mensais livres de nuvens, dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas e informações meteorológicas de reanálise de maior resolução espacial (ERA5 e GLDAS) (Claudino *et al*. 2025).

A plataforma Google Earth Engine (GEE) foi utilizada para extrair os valores em três períodos distintos: o mês anterior à ocorrência do incêndio (set/2020), o mês de ocorrência do evento (out/2020) e o mês subsequente ao incêndio (nov/2020), totalizando 91 imagens diárias de ET. As imagens baixadas foram posteriormente processadas em ambiente SIG para a extração e análise dos valores de pixels correspondentes aos focos de incêndio.

A delimitação dos focos de incêndio foi realizada consultando a coleção MapBiomas Fogo, no Produto Cicatrizes de Área Queimada 1 km (AQ1Km) e na Plataforma BDQueimadas. Contudo, o evento no período e na região só foi identificado na plataforma BDQueimadas, desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Essa plataforma disponibiliza registros georreferenciados de focos de calor detectados por diferentes satélites desde 1995, permitindo o

monitoramento contínuo da ocorrência de queimadas e incêndios em todo o território brasileiro. Os focos de incêndio identificados no Parque Estadual Mata da Pimenteira durante o período analisado são apresentados na Tabela 1 e sua distribuição espacial é ilustrada na Figura 2.

Data	Satélite	Município	Bioma	Latitude (°)	Longitude (°)
2020-10-12	NPP-375D	Serra Talhada	Caatinga	-7.92236	-38.30008
2020-10-12	NPP-375	Serra Talhada	Caatinga	-7.92328	-38.30255
2020-10-13	NOAA-20	Serra Talhada	Caatinga	-7.92164	-38.30156
2020-10-13	NOAA-20	Serra Talhada	Caatinga	-7.92698	-38.30299

Tabela 1 – Focos de incêndio identificados na área de estudo a partir dos registros da plataforma BDQueimadas/INPE.

Figura 2 – Distribuição espacial dos focos de incêndio por satélite na área de estudo a partir dos registros da plataforma BDQueimadas/INPE.



Devido à proximidade espacial entre os focos de incêndio, cada um foi associado a três pixels das imagens de ET obtidas pelo modelo ESTIMET. Como os valores de ET estimados para esses pixels apresentaram comportamento semelhante, utilizou-se a média dos valores para representar sua dinâmica. Assim, a variação da ET foi analisada graficamente com variação percentual, quantificando a magnitude das alterações em relação às condições observadas no período anterior ao incêndio, conforme a Equação 1.

$$\Delta\% = \frac{ET_{depois} - ET_{antes}}{ET_{antes}} \times 100 \qquad (1)$$

Além disso, o mesmo parâmetro auxiliou na quantificação do período de recuperação da ET, definido com base no retorno da ET diária às condições pré-incêndio, seguindo a abordagem utilizada em estudos de recuperação hidrológica pós-fogo (Collar *et al*. 2021; Ebel *et al*. 2022; Hampton e Basu, 2022). Para isso, adotou-se como limiar de recuperação o valor correspondente a 90% (Hampton e Basu, 2022) da ET média diária observada no mês anterior ao incêndio. Assim, o tempo de recuperação foi definido como o número de dias entre o início do incêndio e o primeiro dia em que a ET diária atingiu ou excedeu o limiar estabelecido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estimados de ET diária (Figura 3) para os focos de incêndio indicaram que, no período pré-incêndio (set/2020) a média foi de 0,54 mm/dia, com um declínio gradual dos valores ao longo do mês. No mês do evento (out/2020), observou-se uma diminuição significativa dos valores de ET, variando entre 0,00 e 0,34 mm/dia, com uma média de 0,09 mm/dia durante o evento (11 a 14 de outubro). No mês pós-evento (nov/2020) houve um aumento dos valores de ET, com o máximo de 2,59 mm/dia no dia 03/11. Esse aumento no período pós-evento está associado à maior disponibilidade hídrica decorrente do aumento da precipitação, que favoreceu a retomada dos processos de evapotranspiração na área, conforme Figura 4.

Figura 3 – Série temporal da ET diária dos focos de incêndio.

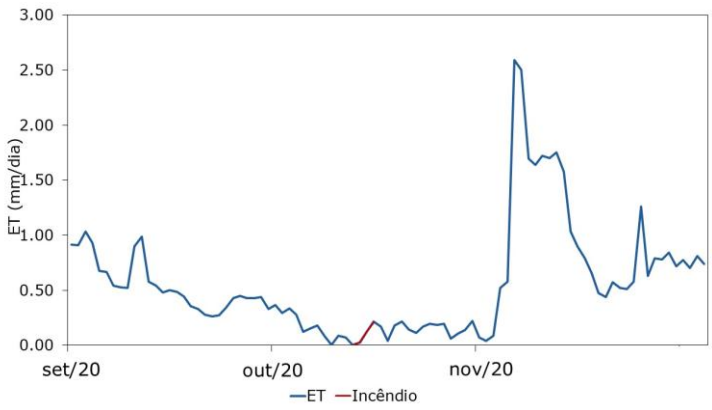
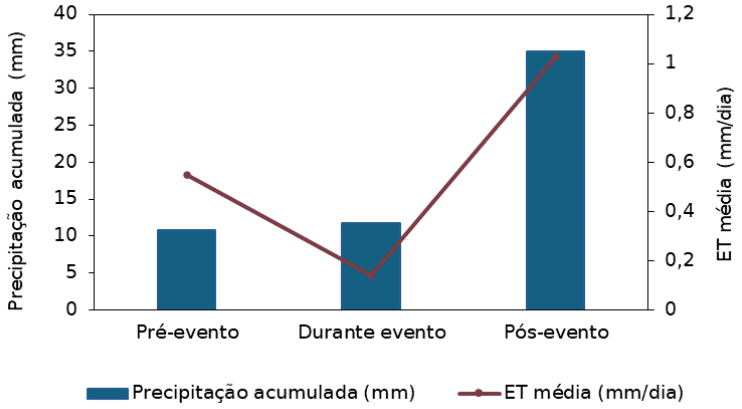
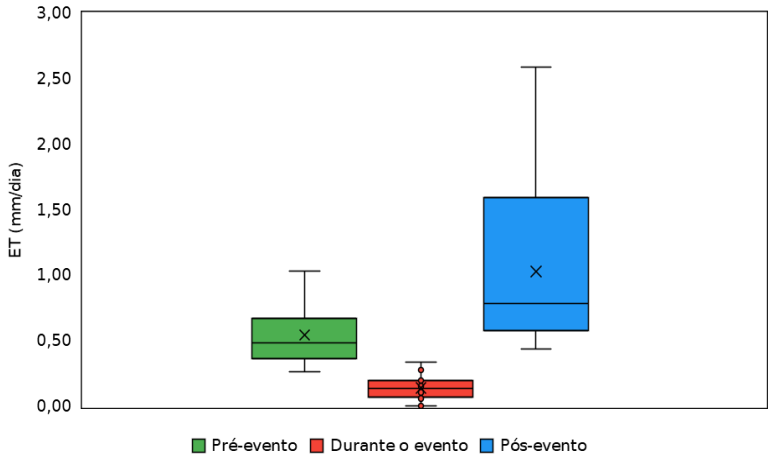


Figura 4 – Séries combinadas de precipitação acumulada (mm) e evapotranspiração média (mm/dia) em fases pré, durante e pós-evento



A Figura 4 evidencia as diferenças na distribuição da ET entre os três períodos. Durante o mês de ocorrência do evento, observou-se uma redução dos valores de ET, refletida pela menor mediana e pela concentração dos dados de ET próximos de zero, corroborando o padrão de queda identificado na Figura 3. No entanto, no período pós-incêndio observou-se maior dispersão dos dados, evidenciada pela maior amplitude interquartil e pelos valores máximos registrados. Os resultados obtidos reforçam a elevada sensibilidade da ET às alterações provocadas pelo fogo, corroborando o que afirma Ebel (2022) ao destacar a ET como um dos componentes do balanço hídrico mais suscetíveis aos impactos de incêndios.

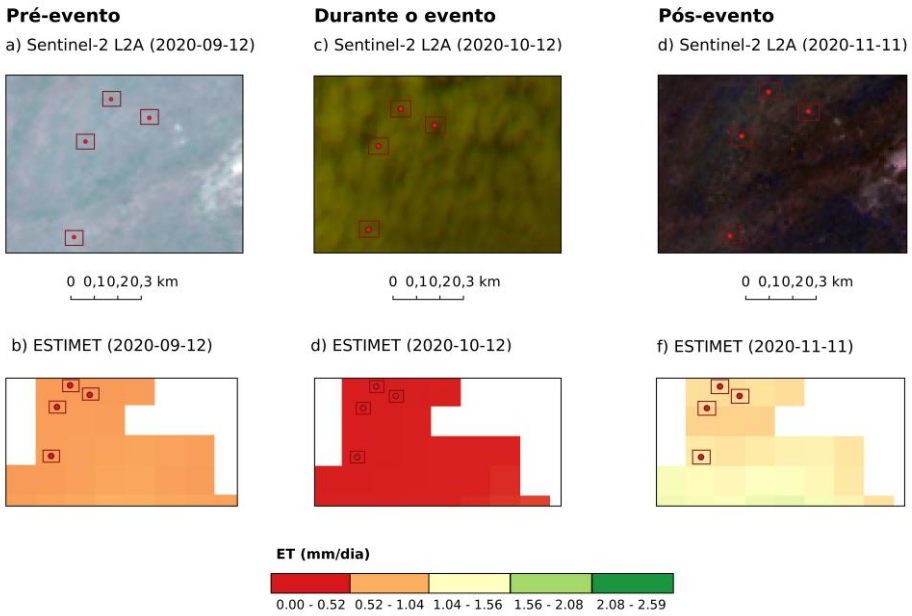
Figura 5 – Distribuição da evapotranspiração diária (ET)



Na análise espacial da ET no período pré-evento (12/09/2020), os pixels associados aos focos de calor apresentaram valores entre 0,48 e 0,84 mm/dia. Já na ocorrência do evento (12/10/2020), houve uma redução generalizada da ET, com valores de ET variando entre 0,02 e 0,23 mm/dia, corroborando a tendência observada na série temporal durante o período do incêndio. No período pós-

incêndio, houve um aumento nos valores de ET, variando de 0,94 a 3,85 mm/dia, com valores superiores aos períodos anteriores, de acordo com o analisado na série temporal (Figura 3) e no boxplot (Figura 5).

Figura 6 – Distribuição espacial da ET média diária nos focos de incêndio pré-evento (a-b), durante o evento (c-d) e pós-evento (e-f).



Essa diferença fica ainda mais evidenciada na análise da variação percentual em relação ao período pré-incêndio (Tabela 2). No mês do evento, houve uma queda drástica de 74% da ET média diária, passando de 0,54 mm/dia no período pré-incêndio para 0,13 mm/dia. No período pós-incêndio, a ET média diária teve um aumento para 88% acima do nível pré-fogo.

Tabela 2 – Variação percentual em relação ao período pré-incêndio

Período	**ET média diária (mm/dia)**	**Variação em relação ao pré-incêndio (%)**
Pré-incêndio (set/2020)	0,54	-
Incêndio (out/2020)	0,13	-74,48
Pós-incêndio (nov/2020)	1,02	+88,56

Além disso, foi analisado o limiar de recuperação da ET diária, definido como 90% da média observada no período pré-incêndio. Considerando uma ET média pré-incêndio de 0,54 mm/dia, o limiar de recuperação foi estabelecido em 0,49 mm/dia. Com base nesse critério, verificou-se que a ET atingiu seu nível de recuperação em 1º de novembro de 2020, aproximadamente 21 dias após o

início do incêndio. Essa resposta sugere que a recuperação da ET é influenciada não apenas pela regeneração da cobertura vegetal, mas também por fatores ambientais e meteorológicos que atuam sobre os processos de troca de água entre a superfície e a atmosfera, conforme discutido por Collar et al. (2021).

CONCLUSÃO

As análises espaciais e temporais evidenciaram uma redução significativa da ET durante o incêndio, em relação ao período pré-evento, o que destaca a sensibilidade dessa variável aos impactos do fogo. Após o evento, observou-se a recuperação da ET, com valores médios superiores aos observados antes do incêndio. O tempo de recuperação da ET foi de 21 dias, evidenciando a rápida resposta da dinâmica evapotranspirativa da área após o distúrbio causado pelo fogo.

Os resultados obtidos reforçam o potencial da ET como indicador da resposta ambiental a eventos de incêndio e demonstram a aplicabilidade do modelo ESTIMET para o monitoramento da ET em áreas afetadas por incêndios. A resolução temporal diária e a resolução espacial de 250 m permitiram a identificação de alterações na ET em curto prazo e com o bom detalhamento espacial, favorecendo a detecção de impactos localizados e contribuindo para gestão sustentável e adaptativa.

Adicionalmente, estudos futuros podem ampliar a análise para um maior número de focos de incêndio e períodos de monitoramento mais extensos, permitindo uma avaliação mais abrangente dos impactos do fogo sobre a dinâmica da ET.

AGRADECIMENTOS - Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) concedida à primeira autora por meio da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco pela Bolsa de Fixação de Pesquisador concedida à terceira autora.

REFERÊNCIAS

Andrade, B.C.C., De Andrade Pinto, E.J., Ruhoff, A., Senay, G.B., 2021. "*Remote sensing-based actual evapotranspiration assessment in a data-scarce area of Brazil: A case study of the Urucuia Aquifer System".* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 98, 102298.

AHAMED, A.; KNIGHT, R.; ALAM, S.; PAULOO, R.; MELTON, F. (2022). *"Assessing the utility of remote sensing data to accurately estimate changes in groundwater storage"*. Science of The Total Environment, v. 807, 150635.

BEZERRA, K.F.S. *et al*. (2025). *"Fire and the Vulnerability of the Caatinga Biome to Droughts and Heatwaves"*. Atmosphere, v. 17, n. 1, p. 46.

BRITO, N.D.S. *et al*. (2022). *"Drought response strategies for deciduous species in the semiarid Caatinga derived from the interdependence of anatomical, phenological and bio-hydraulic attributes"*. Flora, v. 288, p. 152009.
CLAUDINO, C.M.A. *et al*. (2025). *"ESTIMET: Enhanced and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration algorithm for all sky conditions in tropical biomes"*. Remote Sensing of Environment, v. 325, 114771.
COLLAR, N.M.; SAXE, S.; RUST, A.J.; HOGUE, T.S. (2021). *"A CONUS-scale study of wildfire and evapotranspiration: Spatial and temporal response and controlling factors"*. Journal of Hydrology, v. 603, 127162.
CRUZ, J.C.G. *et al*. (2024). *"Spatial–Temporal Dynamics of Land Use and Cover in Mata da Pimenteira State Park Based on MapBiomas Brasil Data: Perspectives and Social Impacts"*. AgriEngineering, v. 6, n. 3, pp. 3327–3344.
EBEL, B.A.; WAGENBRENNER, J.W.; KINOSHITA, A.M.; BLADON, K.D. (2022). *"Hydrologic recovery after wildfire: A framework of approaches, metrics, criteria, trajectories, and timescales"*. Journal of Hydrology and Hydromechanics, v. 70, n. 4, pp. 388–400.
FOLHA DE PERNAMBUCO. (2020). "*Incêndio de grandes proporções atinge parque em área de caatinga no Sertão. Recife, 12 out. 2020".* Disponível em: https://www.folhape.com.br/noticias/incendio-de-grandes-proporcoes-atinge-parque-em-area-de-caatinga-no/158175/. Acesso em: 1 maio 2026.
GROSSO, C.; MANOLI, G.; MARTELLO, M.; CHEMIN, Y.; PONS, D.; TEATINI, P.; PICCOLI, I.; MORARI, F. (2018). "*Mapping Maize Evapotranspiration at Field Scale Using SEBAL: A Comparison with the FAO Method and Soil-Plant Model Simulations"*. Remote Sensing, v. 10, 1452.
HAMPTON, T.B.; BASU, N.B. (2022). *"A novel Budyko-based approach to quantify post-forest-fire streamflow response and recovery timescales"*. Journal of Hydrology, v. 608, 127685.
LIU, Z.-L.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G.; ZHANG, X. (2009). *"A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data"*. Sensors, v. 9, pp. 3801–3853.
LUO, T.; JUTLA, A.; ISLAM, S. (2015). *"Evapotranspiration estimation over agricultural plains using MODIS data for all sky conditions"*. International Journal of Remote Sensing, v. 36, pp. 1235–1252.
MELO, D.C.D. *et al*. (2021). *"Are Remote Sensing Evapotranspiration Models Reliable Across South American Ecoregions?"*. Water Resources Research, v. 57.
MONTEITH, J.L. (1965). *"Evaporation and environment"*. The state and movement of water in living organisms. Symposium of the Society of Experimental Biology, v. 19, pp. 205–234. Cambridge: Cambridge University Press.
PARQUE ESTADUAL MATA DA PIMENTEIRA. "*Parque Estadual Mata da Pimenteira".* Disponível em: https://www2.cprh.pe.gov.br/uc/parque-estadual-mata-da-pimenteira/. Acesso em: 3 jun. 2026.
RUNNING, S.W.; MU, Q.; ZHAO, M.; MORENO, A. (2017). "*NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm User's Guide: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3).*
RUNNING, S.W.; MU, Q.; ZHAO, M.; MORENO, A. (2021). *NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1) User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF).*