ESTIMET: MÉTODO DE ESTIMATIVA DE SÉRIES EXTENSAS E ESPACIALMENTE DETALHADAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Cinthia Maria de Abreu Claudino[1]; Eduardo Gonçalves Patriota [2], Daniel Conceição do Nascimento [3]; José Lindemberg Vidal Barbosa [4]; Cinthya Santos da Silva [5]; Diego Cézar dos Santos Araújo[6] ; Suzana Maria Gico Lima Montenegro [7]; Guillaume Francis Bertrand [8] ;Cristiano das Neves Almeida[9]&Victor Hugo Rabelo Coelho[10].

Palavras-Chave – Evapotranspiração, sensoriamento remoto, segurança hídrica.

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração real (ET) é um dos principais componentes do balanço hídrico, desempenhando papel fundamental nos ciclos da água, energia e carbono (Ahamed *et al*., 2022). Sua quantificação espacial é essencial para modelos hidrológicos, monitoramento ambiental e gestão sustentável dos recursos hídricos com aplicações na previsão de secas, a eficiência da irrigação, a produtividade das plantas e a elucidação dos processos associados às mudanças climáticas (Grosso et al., 2018). Embora existam métodos diretos e indiretos para estimar a ET, como medições de campo e técnicas meteorológicas, essas abordagens são pontuais, demandam elevado custo e tempo, e apresentam limitações para representar a elevada variabilidade espacial da ET em escala regional (Melo et al., 2021).O sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta essencial para a estimativa regional da evapotranspiração, destacando-se o produto MOD16 (Running *et al.*, 2021). Entretanto, limitações relacionadas à parametrização, à resolução espacial e à disponibilidade temporal dos dados restringem sua aplicação em monitoramento quase em tempo real, especialmente em regiões tropicais (Laipelt *et al.*, 2021).

Neste contexto, com o objetivo de superar as limitações do MOD16A2GF para aplicações locais e regionais em regiões tropicais e em tempo quase real, Claudino et al. desenvolveram o modelo ESTIMET (Enhanced and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration). Baseado no algoritmo original do MOD16, o ESTIMET foi concebido para possibilitar o monitoramento da evapotranspiração em escala local e regional, mesmo em áreas tropicais com elevada incidência de nuvens. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar as principais características do modelo ESTIMET, destacando seu potencial na geração de um o conjunto de dados de grande volume da evapotranspiração em escala local e regional.

METODOLOGIA

Estimativa de evapotranspiração diária

O ESTIMET é baseado na equação de Penman-Monteith, utiliza dados de sensoriamento remoto orbital (refletância) e informações auxiliares (e.g., dados de reanálise), de forma semelhante à abordagem usada para gerar o produto MOD16 disponibilizado pela NASA (Mu et al., 2011). O

[1]) Pós-doutoranda, Universidade Federal de Pernambuco, cinthiamariaac@gmail.com.
[2]) Doutorando, Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 99655-3877, edugoncalvespatriota@gmail.
3) Graduando no Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, daniel.conceicao@academico.ufpb.br
[4]) Doutorando, Universidade Federal da Paraíba, jose.lindemberg@academico.ufpb.br
[5]) Professora, Instituto Federal da Paraíba, cinthya.santos@ifpb.edu.br
[6]) Pós-doutorando, Universidade Federal de Pernambuco, diego@agro.eng.br
[7]) Professora, Universidade Federal de Pernambuco, suzanam.ufpe@gmail.com.
[8]) Professor, Université Marie et Louis Pasteur, Montbéliard, guillaume353@gmail.com
[9]) Professor, Universidade Federal da Paraíba, almeida74br@yahoo.com.br
[10]) Professor, Universidade Federal da Paraíba, victor.coelho@academico.ufpb.br.

ESTIMET estima a densidade do fluxo de calor latente (λE; W m-2), permitindo o cálculo da ET diária total (mm) a partir do fator de conversão, correspondente à soma da evaporação da superfície úmida do dossel (λEwet c), da transpiração da vegetação com superfície seca (λEtrans) e da evaporação do solo (λEsoil) (Mu et al., 2011; Running et al., 2021).

Todo o modelo ESTIMET foi desenvolvido a partir do uso do Google Earth Engine (GEE), uma plataforma baseada em nuvem para análise geoespacial em escala planetária usando programação JavaScript (Fig. 1). Para reduzir o impacto da interferência das nuvens nas estimativas diárias da ET pelo ESTIMET, alguns parâmetros biofísicos de entrada (e.g., IAF, EVI2 e albedo da superfície) foram considerados como sendo fixos dentro de cada mês, utilizando os melhores pixels (i.e., livres de nuvens) de oito imagens MODIS de reflectância disponíveis dentro desse mesmo mês. Como modificações realizadas nas estimativas do ESTIMET, foram ainda utilizados mapas regionais de uso e cobertura do solo mais acurados do projeto MapBiomas para obter informações sobre a condutância do dossel e a transpiração das plantas em escala nacional. Além disso, dados meteorológicos de reanálise (e.g., umidade relativa do ar, radiação de onda curta e pressão atmosférica) com uma resolução espacial mais alta (e.g., ERA5, ECMWF Climate Reanalysis e GLDAS, Global Land Data Assimilation System) do que aquela usada para gerar o produto MOD16 (GMAO, Global Modeling and Assimilation Office) foram considerados nessa melhoria. Desse modo o ESTIMET fornece estimativas diárias de evapotranspiração quase em tempo real, com resolução espacial de 250 m e menor impacto da cobertura de nuvens, integrando grandes volumes de dados de sensoriamento remoto e meteorológicos, característicos de abordagens baseadas em big data.

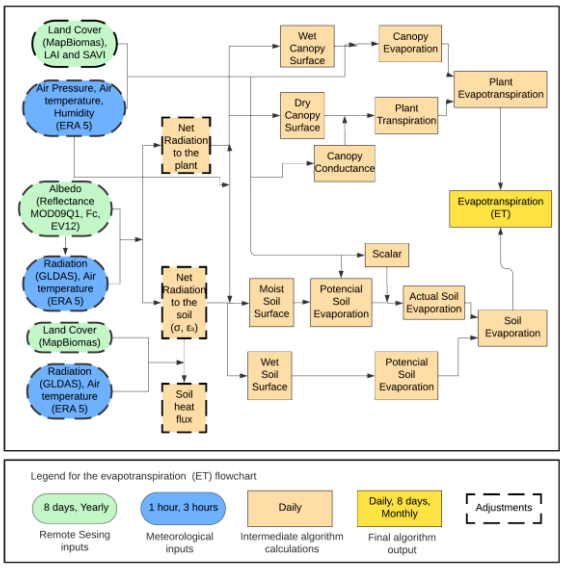


Figura 1. Fluxograma do algoritmo ESTIMET. Fonte: Adaptado de Claudino et al. (2025).

Validação do método

As estimativas acumuladas de ET de 8 dias do ESTIMET foram comparadas com os dados de covariância de turbulência (EC) de torres de fluxo em 14 locais em todo Brasil (Fig 1). Além disso, o ESTIMET foi comparado com três outros produtos ET globais baseados em satélite (MODerate Resolution Spectroradiometer-MOD16A2GF, Penman-Monteith-Leuning Evapotranspiration-PML_V2 e Global Land Evaporation Amsterdam Model-GLEAM 4.1a). Para avaliar o desempenho do algoritmo ESTIMET foi utilizada o coeficiente de correlação de concordância (ρc). O ESTIMET também foi validado a partir do método do balanço hídrico anual em 25 bacias não aninhadas, distribuídas por biomas, com áreas entre 1 e 5 km², baixa presença de reservatórios e predominância de cobertura natural (Claudino et al., 2025).

RESULTADOS

O desempenho do ESTIMET quanto ao aprimoramento das resoluções temporal (diária) e espacial (250 m) é ilustrado na Figura 2. Os recortes espaciais da ET no sítio da EUC, no Cerrado, evidenciam que a resolução espacial de 250 m do ESTIMET representa com maior detalhamento a variabilidade da evapotranspiração, captando diferenças na paisagem que não são identificadas pelos produtos MOD16A2GF e PML, ambos com resolução de 500 m.

No período analisado o ESTIMET apresentou valores diários variando de 1,66 a 3,01 mm/dia, ao passo que o MOD16A2GF mantém um valor constante de 2,86 mm/dia e o PML 1,49 mm/dia, evidenciando que a disponibilidade diária de dados permite ao ESTIMET captar a resposta da evapotranspiração às variações meteorológicas, representando com maior precisão sua dinâmica temporal em escala local em comparação aos produtos MOD16A2GF e PML.

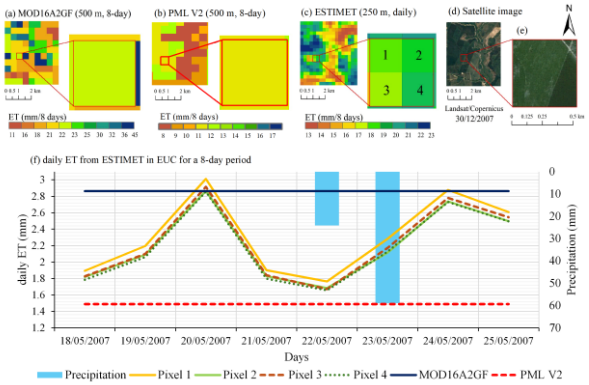


Figura 2 –Variabilidade espacial da ET estimada pelos algoritmos MOD16A2GF, PML e ESTIMET no entorno da torre EUC (Cerrado), entre 18 e 25 de maio de 2007.Fonte: Adaptado Claudino et al. (2025).

A Figura 3 apresenta a distribuição da evapotranspiração média diária anual estimada pelo ESTIMET para o Brasil em 2022, evidenciando diferenças entre os biomas, com maiores valores na Caatinga (2,89 mm/dia) e menores no Pampa 1,65 mm/dia), em concordância com estudos anteriores baseados em outros algoritmos de estimativa de ET (Andrade *et al*., 2024; Bezerra *et al*., 2023).

A resolução espacial de 250 m do ESTIMET permite representar com maior detalhamento a variabilidade da evapotranspiração entre os biomas brasileiros, tornando-o uma ferramenta robusta para o monitoramento contínuo da ET e para aplicações em gestão de recursos hídricos, modelagem hidrológica e planejamento territorial.

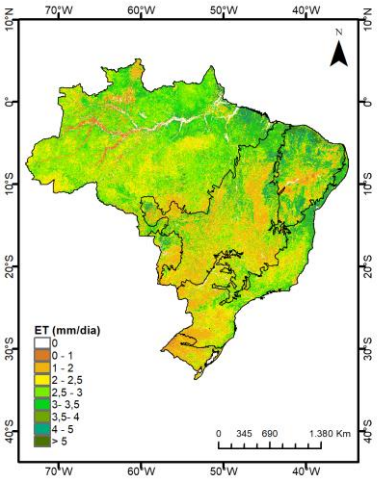


Figura 3 – Variabilidade espacial da ET estimada pelos ESTIMET no ano de 2022 nos diferentes biomas brasileiros.

CONCLUSÕES

Desse modo:

- O ESTIMET fornece estimativas diárias de evapotranspiração quase em tempo real, com resolução espacial de 250 m e menor impacto da cobertura de nuvens;
- O ESTIMET gera um conjunto de dados compatível com abordagens de big data ao produzir estimativas séries extensas e espacialmente detalhadas de evapotranspiração;
- O ESTIMET representa a variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração com maior detalhamento, favorecendo aplicações em escala local e regional;
- O mapeamento de evapotranspiração de alta precisão e baixa latência pode subsidiar a gestão de desastres, especialmente no monitoramento e antecipação de condições associadas a secas, além de apoiar ações de mitigação, planejamento e resposta em eventos hidrológicos extremos;
- Como limitação, o desempenho do ESTIMET ainda depende da qualidade dos dados de entrada e da parametrização do algoritmo.
- Como perspectiva, futuras pesquisas podem incorporar dados de maior resolução espacial e temporal e técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar ainda mais a acurácia das estimativas.

REFERÊNCIAS

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, 807.

ANDRADE, B.C.; LAIPELT, L.; FLEISCHMANN, A.; HUNTINGTON, J.; et al. (2024). "*geeSEBAL-MODIS: Continental-scale evapotranspiration based on the surface energy balance for South America*". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 207, 141–163.

BEZERRA, U.A.; CUNHA, J.; VALENTE, F.; NÓBREGA, R.L.B.; et al. (2023). "*STEEP: A remotely-sensed energy balance model for evapotranspiration estimation in seasonally dry tropical forests*". Agricultural and Forest Meteorology, 333, 109408.

CLAUDINO, C.M. DE A.; BERTRAND, G.F.; ALMEIDA, C. DAS N.; et al. (2025). "*ESTIMET: Enhanced and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration algorithm for all sky conditions in tropical biomes*". Remote Sensing of Environment, 325, 114771, 2025.

GROSSO, C.; MANOLI, G.; MARTELLO, M.; CHEMIN, Y.; et al. (2018). "*Mapping Maize Evapotranspiration at Field Scale Using SEBAL: A Comparison with the FAO Method and Soil-Plant Model Simulations*". Remote Sensing, 10, 1452.

LAIPELT, L.; HENRIQUE BLOWEDOW KAYSER, R.; et al. (2021). "*Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing*". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 178, 81–96.

MELO, D.C.D.; ANACHE, J.A.A.; BORGES, V.P.; MIRALLES, D.G.; MARTENS, B.; FISHER, J.B.; et al. (2021). *"Are remote sensing evapotranspiration models reliable across South American ecoregions?"*. Water Resources Research, 57.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S.W. (2011). *"Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm"*. Remote Sensing of Environment 115, pp. 1781–1800.

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)"*

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa do Programa de Bolsas de Fixação de Pesquisadores.