



ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO ASEBAL PARA DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DA PARAÍBA

Arthur Henrique Alves Soares
Universidade Federal da Paraíba

Alexandro Medeiros Silva
Universidade Federal da Paraíba

Julia Menezes dos Santos
Universidade Federal da Paraíba

Nataniel Matheus Paulino Fernandes
Universidade Federal da Paraíba

Tuany Kerolayne de Oliveira Ferreira
Universidade Federal da Paraíba

RESUMO

A evapotranspiração (ET) desempenha um papel crucial no ciclo hidrológico ao transferir água do solo e vegetação para a atmosfera como vapor, sendo fatores como radiação solar, temperatura, umidade do ar e características vegetativas influenciam esse processo complexo. Sua influência impacta o ciclo da água e o clima regional, sendo vital para a gestão hídrica, previsões e planejamento agrícola. Durante as últimas três décadas, modelos matemáticos são desenvolvidos e utilizados na estimativa de diversos índices com contribuições do sensoriamento remoto que, usando dados de satélites, desempenha um papel fundamental no estudo de variações climáticas, proporcionando informações espaciais contínuas em diversas escalas. Diversos sensores e algoritmos são usados para estimar a evapotranspiração (ET) em diferentes escalas territoriais, a exemplo do sensor MODIS, presente nos satélites Aqua e Terra, coleta dados como temperatura da superfície do mar, temperatura do ar e características vegetais. Este estudo visa estimar a evapotranspiração para todo o estado da Paraíba (PB – Brasil) [estado da Paraíba, localizado no nordeste do Brasil] utilizando o algoritmo ASEBAL e apresentar, de forma visual, os principais pontos de perda crítica de água e sua dinâmica ao longo do ano de 2020. Para realizar essa estimativa foram utilizados os produtos do sensor MODIS, MOD09A1, MYD09A1, MOD11A2 e MYD11A2. Desta forma, pôde-se apontar regiões com maior e menor índices de ET durante esse período no estado.

Palavras-chave: Evapotranspiração, ASEBAL, Paraíba, MODIS.

EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION ACROSS DIFFERENT CLIMATE ZONES OF PARAÍBA STATE USING THE ASEBAL ALGORITHM

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) plays a crucial role in the hydrological cycle by transferring water from the soil and vegetation to the atmosphere as vapor. Factors such as solar radiation, temperature, air humidity, and vegetative characteristics influence this complex process. Its influence impacts the water cycle and regional climate, making it vital for water management, forecasting, and agricultural planning. Over the past three decades, mathematical models have been developed and used to estimate various indices, with contributions from remote sensing. Utilizing satellite data, remote sensing plays a fundamental role in studying climate variations, providing continuous spatial information at various scales. Various sensors and algorithms are employed to estimate evapotranspiration (ET) on different territorial scales, such as the MODIS sensor found on the Aqua and Terra satellites. This sensor collects data such as sea surface temperature, air temperature, and vegetative characteristics. This study aims to estimate evapotranspiration for the entire state of Paraíba (PB – Brazil) [located in northeastern Brazil] using the ASEBAL algorithm. It visually presents the main points of critical water loss and its dynamics throughout the year 2020. To achieve this estimate, MODIS sensor products, including MOD09A1, MYD09A1, MOD11A2, and MYD11A2, were used. In this way, regions with higher and lower ET indices during this period in the state could be identified.

Keywords: *Evapotranspiration, ASEBAL, Paraíba State, MODIS.*

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água está se tornando cada vez mais crítica em áreas semiáridas e a evapotranspiração (ET) é essencial para entender os processos hidrológicos e para o manejo dos recursos hídricos nessas regiões (De Lima et al., 2021). No semiárido paraibano, os problemas provocados pelas secas recorrentes são intensificados por uma gestão dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas muitas vezes insuficientes, com histórico de uso intenso do solo, ausência de fiscalização, e falta de controle dos corpos hídricos presentes nas bacias (Silva, 2019).

Além disso, a carência de longas séries históricas de dados hidro-climatológicos observados no semiárido da Paraíba são uma dificuldade enfrentada para realização de estudos e de uma análise da dinâmica hidrológica. Existem poucas estações que disponibilizam longas séries de dados sem falha, como a radiação

solar, pressão atmosférica, velocidade do vento e outras variáveis empregadas no cálculo dos componentes do balanço hídrico e de energia nas bacias hidrográficas do Estado da Paraíba, o que dificulta a utilização desses dados para pesquisas sobre o monitoramento hídrico e climatológico.

Nesse cenário, a utilização da estimativa das variáveis do ciclo hidrológico utilizando geotecnologias e sensoriamento remoto, torna-se a principal fonte desse tipo de informação para regiões com monitoramento insuficiente. Dentro dessas variáveis do ciclo hidrológico, é a evapotranspiração que assume um papel central no ciclo hidrológico, sendo a maior influência na transferência de água da superfície para a atmosfera, sendo responsável por consumir cerca de 60% da precipitação anual de uma região, tornando-se uma variável fundamental para todo e qualquer estudo hidrológico (Jiao et al., 2024).

De acordo com esses pressupostos, fica evidente a importância do monitoramento dessas variáveis para realizar uma gestão eficiente dos recursos hídricos em áreas impactadas pela seca, como é o caso da região semiárida da Paraíba. Com isso, diversos estudos em várias partes do mundo vêm utilizando produtos de sensoriamento remoto para a estimativa dessas variáveis, com destaque para a evapotranspiração (dos Santos et al., 2024; Abid et al., 2024; Cao et al., 2023 e Xiang et al., 2020). No entanto, ainda são escassos os estudos que buscam integrar informações sobre os componentes do balanço hídrico e especificamente da evapotranspiração em grandes bacias hidrográficas, sobretudo aquelas localizadas no bioma Caatinga da Paraíba.

Entre as principais metodologias para a estimativa da ET utilizando dados de sensoriamento remoto, o *Surface Energy Balance Algorithm For Land* (SEBAL) desenvolvido por Bastiaanssen et al., (1998) foi amplamente utilizado em diversas partes do mundo, pois é ideal para a estimativa da ET em grandes (Bastiaanssen et al., 2000). Apesar do modelo já possuir mais de 25 anos desde a sua publicação, algumas alterações foram sendo desenvolvidas nos últimos anos, como o *Automated Surface Energy Balance Algorithm for Land* (ASEBAL), que conta com uma automatização do processo de calibração interna (Silva et al., 2019) e mais recentemente o algoritmo capaz de estimar ET usando o Sistema de Apoio à Análise de Recursos Geográficos (GRASS) e linguagem *Python*, chamado GP-SEBAL desenvolvido por De Lima et al. (2021).

Face ao exposto, o presente estudo tem por objetivo analisar a variabilidade espaço temporal das estimativas da evapotranspiração real para o estado da Paraíba a partir dos produtos de sensoriamento remoto e dados observados utilizando o ASEBAL.

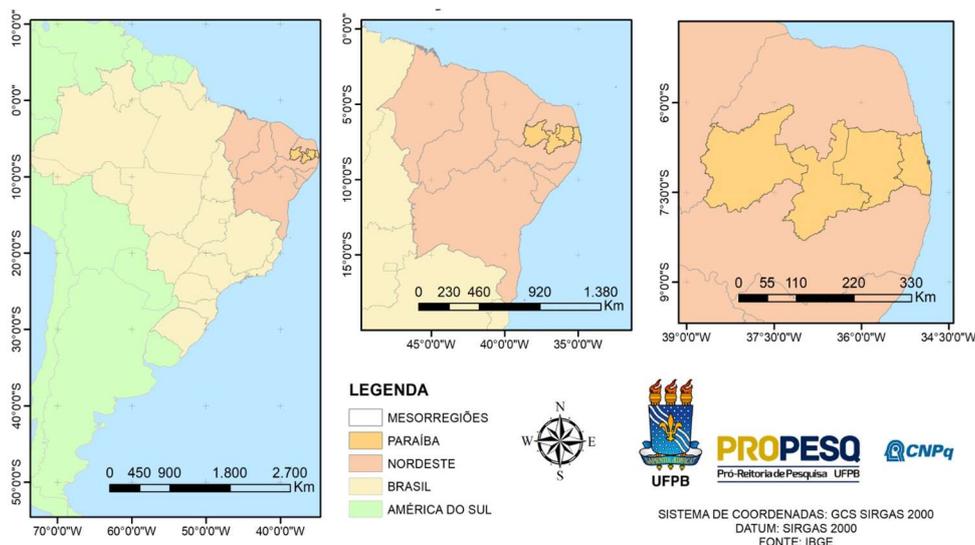
MATERIAIS E MÉTODOS

A Área de Estudo

A área de estudo dessa pesquisa foi o do estado da Paraíba, localizado na região nordeste do Brasil, seccionado em suas quatro mesorregiões: Zona da mata,

Agreste, Borborema e Sertão, localizado na região Nordeste do Brasil, mais precisamente entre as coordenadas 6°02'12" S e 8°19'18" S de latitude e 34°45'54" O e 38°45'45" O de longitude, com uma área territorial de 56.467.242km². A Paraíba limita-se ao norte com o estado do Rio Grande do Norte, ao sul com Pernambuco (ao sul), a oeste com o estado do Ceará, e a leste com o Oceano Atlântico (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização do estado da Paraíba



Base de dados

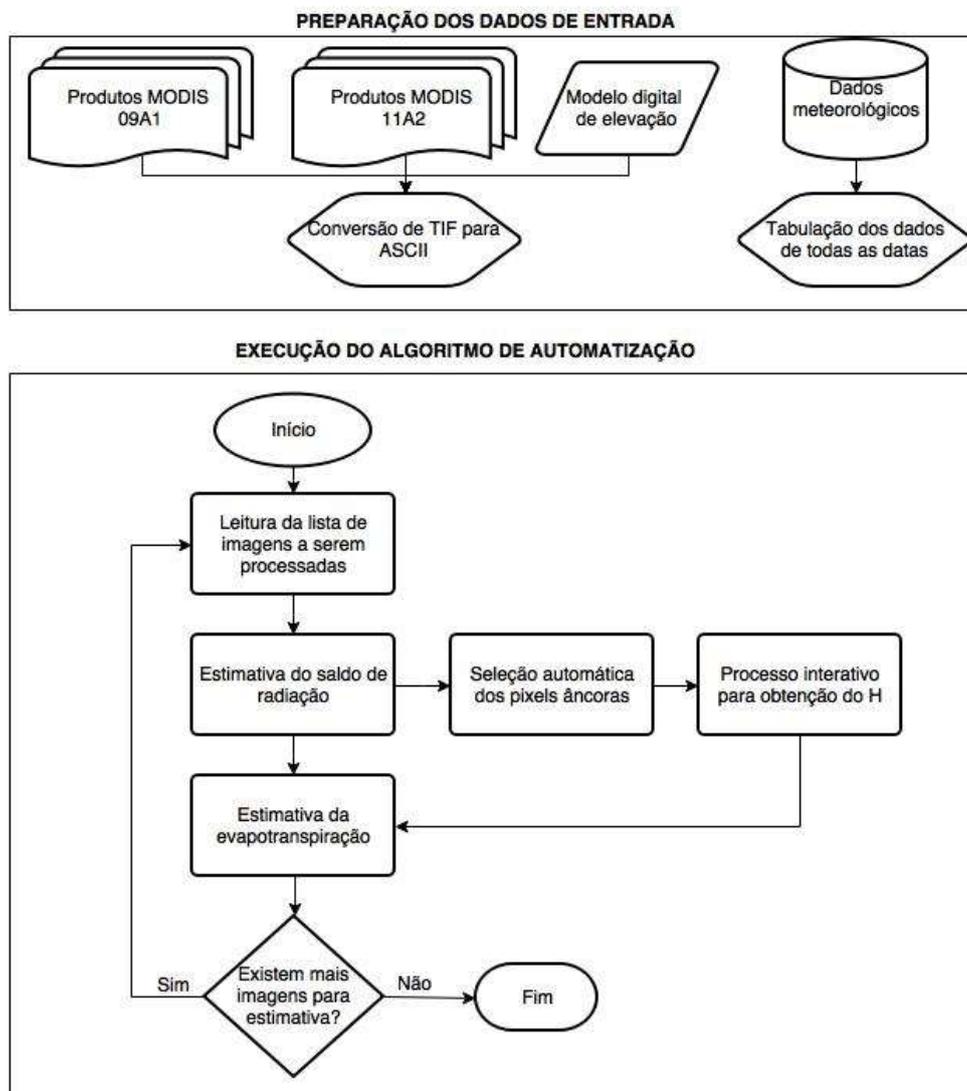
O conjunto de imagens de satélite utilizadas foram obtidas pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que está a bordo de dois satélites: Terra (produtos MOD) e Aqua (produtos MYD), foram realizados os *downloads* dos produtos de reflectância da superfície (MOD09A1 e MYD09A1) e os produtos de temperatura e emissividade da superfície (MOD11A2 e MYD11A2) que são uma composição pixel a pixel da melhor observação em um período de oito dias e estão disponíveis na plataforma *Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center* (LAADS DAAC), responsável por processar, arquivar e distribuir produtos de dados de imagens interceptadas por sensores em satélites ao redor do globo.

Além das imagens MODIS faz-se necessária a utilização do Modelo digital de elevação (MDE) do estado, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pelo projeto Topodata. Por fim, foram adquiridos dados meteorológicos de uma estação localizada no município de Monteiro - PB, a escolha dessa estação for baseada em sua posição geográfica (próxima a região central do estado) e principalmente pela qualidade de dados (menor nível de falhas) disponíveis no Banco de dados meteorológicos (BDMET) do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Estimativa da ET usando o algoritmo ASEBAL

O ambiente de execução do ASEBAL é um *script* MATLAB®. Esse *script* permite a estimativa da evapotranspiração para n datas em sequência, sem a interferência do usuário durante a sua execução. Para isso, cabe ao usuário organizar todos os dados de entrada conforme especificado pelo ASEBAL, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma da rotina computacional para a aplicação do ASEBAL.



Após a aquisição dos dados utilizados, foram realizadas o recorte da área de estudo, uma seleção das imagens que possuíam até 3% de cobertura de nuvens, resultando

na utilização de apenas com 23 imagens para o ano de 2020. Após essa etapa, foram realizados os ajustes cartográficos para garantir a sobreposição exata dos pixels das imagens. Por fim, a última etapa de preparação das imagens MODIS é conversão do formato original TIF para ASCII, o que garante uma execução mais rápida do algoritmo.

Além disso, vale destacar que os dados meteorológicos adquiridos devem ser relacionados as datas das imagens, para uma correta aplicação do modelo. Contudo, as imagens MODIS utilizadas são composições de 8 dias, dessa forma, fez-se necessária a identificação do dia predominando de cada imagem, ou seja, qual a data em que a maioria dos pixels das imagens foram adquiridos. Com isso é possível relacionar essas imagens aos dados meteorológicos respectivos.

Além da organização dos dados, pode-se observar na figura anterior, que a execução do ASEBAL pode ser dividida em duas partes: (a) o cômputo do saldo de radiação e (b) a determinação da evapotranspiração (ET). O ASEBAL é baseado no princípio comumente utilizado de que a ET pode ser estimado a partir do termo residual do balanço de energia superficial (Bhattarai et al., 2017). Para isso, faz-se necessário a determinação do saldo de radiação na superfície (R_n), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e a fração evaporativa (FE), conforme as equações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Equações para a estimativa da evapotranspiração

Equação	Referência
$G = \left[\frac{T_{sup,c}}{a_{sup}} (0,0038a_{sup} + 0,0074a_{sup}^2) (1 - 0,98NDVI^4) \right] R_n$	Bastiaanssen (2000)
$H = \frac{\rho_a c_p (a + bT_s)}{r_{ah}}$	Bastiaanssen et al. (1998)
$LE = R_n - G - H$	Bastiaanssen et al. (1998)
$FE_i = \frac{LE}{R_n - G}$	Bastiaanssen et al. (1998)
$ET_{24h} = 0,035FE_i R_{n24h}$	Coelho (2016)

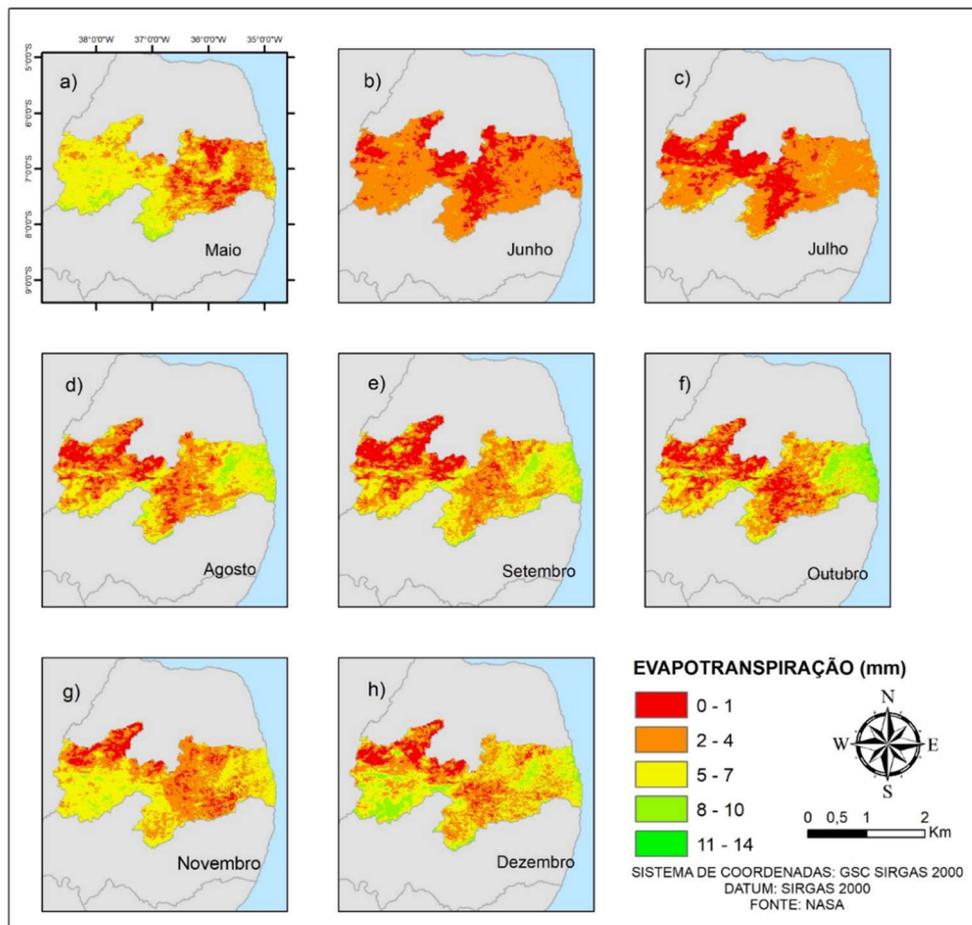
Para a utilização das imagens MODIS, realizou-se uma filtragem para selecionar aquelas com baixa cobertura de nuvens, estabelecendo um limite máximo de 3% de nuvens para garantir uma interferência mínima no resultado. Além disso, foi necessário abordar a diferença na resolução radiométrica entre as imagens MOD (16 bits) e as imagens MYD (8 bits). Para corrigir essa disparidade, efetuou-se a

reamostragem das imagens MYD para que apresentassem a mesma resolução em seus pixels.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a execução do ASEBAL, foram calculadas a evapotranspiração real diária de 23 imagens ao longo de 2020 que foram transformadas em médias mensais. Entretanto, nem todos os meses tiveram imagens disponíveis, devido ao filtro de nebulosidade aplicado. Com isso, a figura 3 ilustra a média mensal da evapotranspiração diária no estado da Paraíba. Como explicado, os meses de janeiro, fevereiro, março e abril não apresentaram imagens com o baixo percentual de nuvens, devido a esse fato concentrou-se a análise nos oito meses subsequentes: maio (a), junho (b), julho (c), agosto (d), setembro (e), outubro (f), novembro (g) e dezembro (h).

Figura 3. Média mensal da evapotranspiração diária no estado da Paraíba.



No mês de maio, pode-se observar que os menores valores de evapotranspiração, foram identificados na região Agreste do Estado, com predominância de pixels com média inferior a 2 mm por dia. Nos meses de junho e julho, observa-se um padrão para todo o estado de baixo índice de evapotranspiração, com pouquíssimos pixels acima dos 5 mm/dia. A partir do mês agosto, é possível verificar uma mudança considerável no comportamento da evapotranspiração média na região litorânea do Estado, onde é possível identificar pixels com valores médios superiores a 8 mm, enquanto as áreas com as menores médias diárias de ET tornam-se mais representativas a oeste do Estado.

Apesar dessa variação identificada, também é possível verificar que em algumas zonas do Estado o comportamento se mantém praticamente estável ao longo ano. Nesse sentido, pode-se destacar as áreas de baixa evapotranspiração na região noroeste do Estado e a região central da Borborema.

Visando uma análise sazonal da distribuição dos níveis de evapotranspiração, conduziu-se um estudo quadrimestral (Figura 4), dividido em dois blocos de análise. O primeiro bloco (a) concentrou-se no período do meio do ano (primavera e inverno), abrangendo os meses de maio, junho, julho e agosto. O segundo bloco (b) agrupou os meses mais próximos do fim do ano (outono e verão), contemplando os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.

A representação resultante destaca as áreas de baixa evapotranspiração de forma mais clara, evidenciando a dinâmica das zonas que variam seus índices de acordo com os níveis de pluviosidade. Nota-se que a região com menor ET durante o período do meio do ano (a) se concentra na área central do estado, entre o Agreste paraibano e a Borborema. No quadrimestre final do ano, essa área começa a se concentrar mais no setor norte do sertão. Em contrapartida, os índices mais elevados de evapotranspiração começam a aparecer no período final do ano na mesorregião da Zona da Mata e no contorno sul do sertão e da Borborema.

Existem áreas do estado que permanecem quase homogêneas durante todo o período de estudo, quando comparadas às médias obtidas. No município de Patos, por exemplo, podemos identificar uma área que se encontra continuamente com baixos níveis de evapotranspiração enquanto a região do município de Princesa Isabel, por exemplo, se apresenta acima de 5 mm durante os dois períodos.

Considerando a média diária anual ao longo de 2020 (Figura 5), observa-se que as mesorregiões exibem similaridades, excetuando a Zona da Mata, que devido a sua localização apresenta teores mais elevados. Os resultados anuais sintetizam as discussões anterior sobre a concentração de áreas com índices variados de ET.

Figura 4. Média quadrimestral da ET no estado da Paraíba.

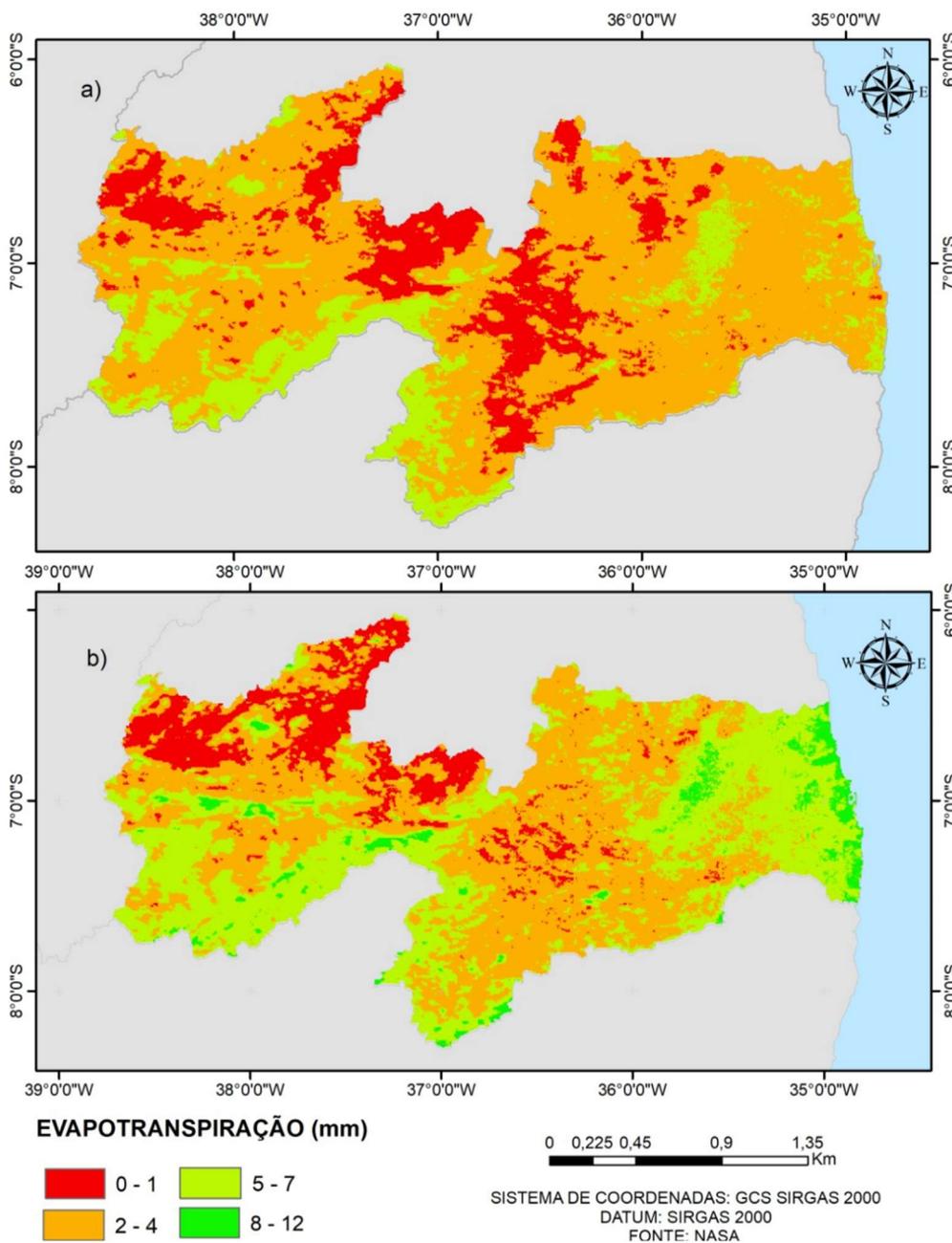
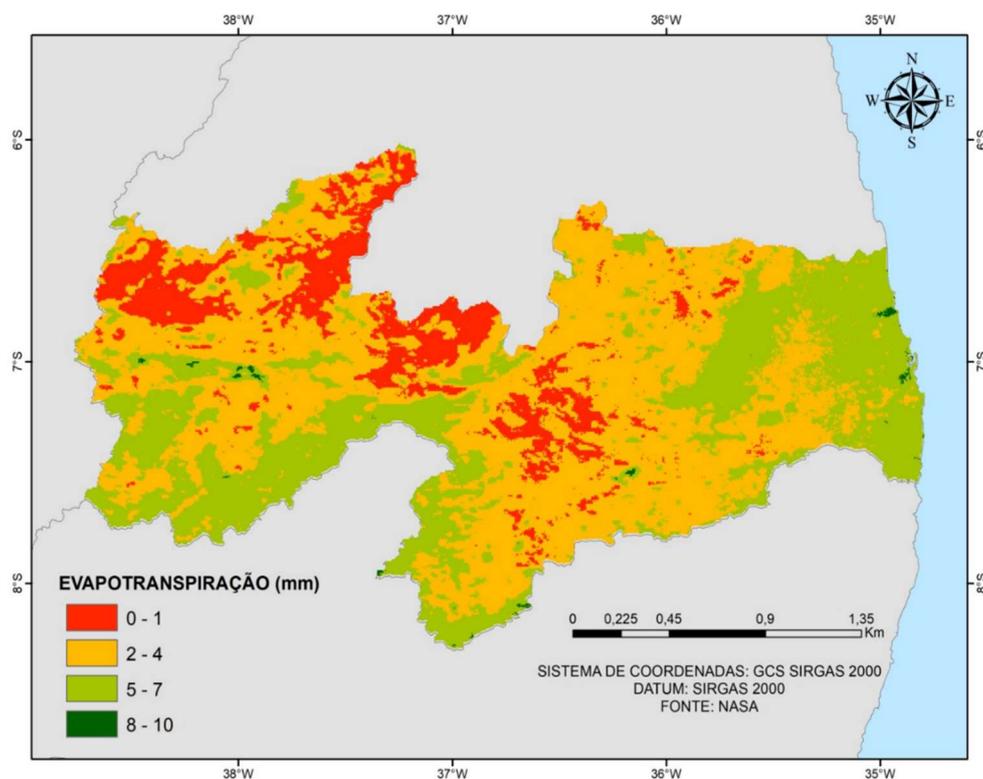


Figura 5. Média diária anual da evapotranspiração na Paraíba.

A Tabela 1 apresenta a média mensal por mesorregião, destacando a Borborema e o Sertão como as regiões com menores índices de ET. Por outro lado, a Zona da Mata apresenta-se com 2 mm a mais na média, ainda que, em termos de médias, estejam próximas das três mesorregiões do interior. No entanto, acaba por ser um dado enganoso devido às áreas de picos localizadas no norte e sul das regiões do Sertão e Borborema, enquanto o Agreste exibe uma distribuição mais homogênea.

Tabela 1. Média da evapotranspiração diária por mesorregião.

Mesorregião	Média	Desvio Padrão
Sertão Paraibano	4,30	1,94
Borborema	4,11	1,59
Agreste Paraibano	4,78	1,35
Mata Paraibana	6,33	0,89

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa se propôs a utilizar o algoritmo ASEBAL para estimar a evapotranspiração no estado da Paraíba durante o ano de 2020, testando sua

aplicabilidade em uma área diferente da que já foi testado anteriormente, identificando zonas críticas com maiores índices de ET no estado e também seu comportamento temporal. Em uma curta escala de tempo, o algoritmo se mostrou de extrema eficiência ao conseguir estimar a ET de forma rápida, onde o código para as 23 imagens demorou em torno de duas horas, de forma eficaz.

Foram pontuadas as áreas como o sul das mesorregiões da Borborema e a Zona da Mata com os maiores índices encontrados nesse ano, de forma bastante elevada na comparação com o restante do estado, que se mostrou bastante homogêneo nas suas transformações temporais e áreas com os menores índices também concentradas no norte do Sertão paraibano e no limite do agreste com a Borborema, na região mais central do estado. Vale ressaltar que com uma maior escala temporal o estudo pode traçar padrões e uma estimativa de tendência para que possa ser mais explorado no decorrer do planejamento regional.

É fundamental ressaltar que, embora tenham sido alcançados resultados significativos, pode-se utilizar produtos de diferentes sensores, utilizando metodologias mais complexas, a fim de diminuir as incertezas e os “vazios” encontrados nas imagens. Essas observações fornecem oportunidades para investigações futuras tais como, análise da tendência da ET para anos futuros, comparativo aos dados de uso e ocupação do solo, análise pixel a pixel.

AGRADECIMENTO

Agradecemos à Universidade Federal da Paraíba pelo financiamento obtido por meio do edital PROPESQ 03/2021.

REFERÊNCIAS

- ABID, N., JAAFAR, A. B., BARGAOUI, Z., & MANNAERTS, C. M. Assessment of long term MOD16 and LSA SAF actual evapotranspiration using Budyko curve. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 34, 101166, 2024.
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Advanced training and Users Manual, Idaho, 2002, 98p.
- ALLEN, R.G; TASUMI, M, TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380-394, 2007.
- BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1–2), 87–100, 2000.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 213–229, 1998.
- BHATTARAI, N.; QUACKENBUSH, L.J; IM, J.; SHAW, S.B. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196, 178-192, 2017.
- CAO, X., ZHENG, Y., LEI, Q., LI, W., SONG, S., WANG, C., KHAN, K. Increasing actual evapotranspiration on the Loess Plateau of China: An insight from anthropologic activities and climate change. *Ecological Indicators*, 157, 2023.
- DE LIMA, C.E.S., COSTA, V.S.O., GALVÍNCIO, J.D., DA SILVA, R.M., SANTOS C.A.G. Assessment of automated evapotranspiration estimates obtained using the GP-SEBAL algorithm for dry forest vegetation (Caatinga) and agricultural areas in the Brazilian semiarid region. *Agricultural Water Management*, 250, 106863, 2021.
- DOS SANTOS, R. A., MANTOVANI, E. C., BUFON, V. B., & FERNANDES-FILHO, E. I. Improving actual evapotranspiration estimates through an integrated remote sensing and cutting-edge machine learning approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225, 2024.
- JIAO, Ping et al. Uncertain effect of component differences on land evapotranspiration. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 55, p. 101904, 2024.
- SILVA, A.M., SILVA, R.M., SANTOS, C.A.G. Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79(1), 1-11, 2019.

SILVA, ALEXANDRO MEDEIROS. Relação da variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo e da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL automatizado na bacia do rio Ipanema. UFPB. 2017.

SILVA, J. F. C. B. C. Crise hídrica no abastecimento de água em Campina Grande: análise de cenários futuros no volume de água do reservatório Eptácio Pessoa entre 2020 e 2030. 2019. Tese de Doutorado em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, p 122.

XIANG, KEYU, LI, YI, HORTON, ROBERT, FENG, HAO. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. *Agricultural Water Management*. V.232. 2020.

Contato com o autor: ahasoares456@gmail.com

Recebido em: 29/11/2023

Aprovado em: 09/06/2024