

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEARIM, MARANHÃO

Jonas Felipe Santos de Souza¹; Mayara Silva de Oliveira² & Alfredo Ribeiro Neto³

Abstract: The use of conventional monitoring data has become increasingly restricted in more comprehensive applications, therefore, data from remote sensing can provide complementary information on natural resources over large areas, with significant spatial resolution and temporal frequency. This work analyzed the applicability of remote sensing products and products from the combination of *in situ* and orbital data over the Mearim River basin, in the state of Maranhão. For this purpose, land use and occupation, surface water area, precipitation and evapotranspiration were evaluated. The results showed that there is a correlation between the analyzed variables, so that it is possible to identify the natural dynamics of the hydrological cycle. However, some limitations were found, such as the lack of *in situ* data for the validation of water detection. In conclusion, the use of products already validated in regions with similar environmental characteristics is recommended. In addition, a more comprehensive analysis period can improve the understanding of the hydrological cycle.

Keywords – Google Earth Engine; remote sensing; hydrological cycle.

Resumo: O uso de dados de monitoramento convencional tem se tornado cada vez mais restrito em aplicações mais abrangentes. Desse modo, dados provenientes de sensoriamento remoto podem fornecer informações complementares dos recursos naturais sobre grandes áreas, com resolução espacial e frequência temporal significativas. Este trabalho analisou a aplicabilidade de produtos de sensoriamento remoto e de produtos da combinação de dados *in situ* e orbitais sobre a bacia hidrográfica do Rio Mearim, no Estado do Maranhão. Para isso, foram avaliados o uso e ocupação do solo, a área de água superficial, a precipitação e a evapotranspiração. Os resultados mostraram que existe uma correlação entre as variáveis analisadas, de modo que é possível identificar a dinâmica natural do ciclo hidrológico. No entanto, algumas limitações foram encontradas, como a falta de dados *in situ* para a validação da detecção de água. Como conclusão, é recomendado o uso de produtos já validados em regiões com características ambientais semelhantes. Além disso, um período de análise mais abrangente pode melhorar a compreensão do ciclo hidrológico.

Palavras-Chave – Google Earth Engine; sensoriamento remoto; ciclo hidrológico.

1) Doutorando em Recursos Hídricos pelo PPGEC-UFPE, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE; jonas.ssouza@ufpe.br
2) Doutoranda em Recursos Hídricos pelo PPGEC-UFPE, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE; mayara.oliveira@ufpe.br

3) Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE; alfredo.ribeiro@ufpe.br

INTRODUÇÃO

Com as rápidas mudanças no clima e no uso da terra, o ciclo global da água tem experienciado altos níveis de variabilidade espacial e temporal, o que tem resultado em numerosas questões relacionadas à água que representam desafios para a segurança hídrica. Um melhor entendimento do ciclo hidrológico e dos recursos hídricos é fundamental para uma melhor gestão dos recursos naturais frente às mudanças climáticas (Xia, 2017). Pesquisas hidrológicas tradicionais focaram nas interações de chuva-vazão, evaporação, água superficial-subterrânea, demanda e fornecimento de água, dentre outros, baseadas, em sua maioria, em dados *in situ*. Entretanto, o uso de dados de monitoramento convencional tem se tornado cada vez mais restrito em aplicações mais abrangentes, em função do alto custo de manutenção das redes de monitoramento *in situ* e da baixa representação espacial (Yang *et al.*, 2021). Assim, dados provenientes de sensoriamento remoto podem fornecer informações complementares dos recursos naturais sobre grandes áreas, com resolução espacial e frequência temporal significativas (Wieland; Martinis, 2020).

Avaliações hidrológicas de grandes áreas necessitam de uma grande quantidade de dados e, quando se trata de produtos de sensoriamento remoto, requer também uma quantidade considerável de memória de armazenamento. A plataforma *Google Earth Engine* (GEE) surge como alternativa para aplicações de monitoramento das mudanças hidrológicas a longo prazo, com acesso livre a um grande número de dados multitemporais de sensoriamento remoto com cobertura local e global com a simplificação da gestão de dados e do grande número de etapas de pré-processamento (Gorelick *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2022).

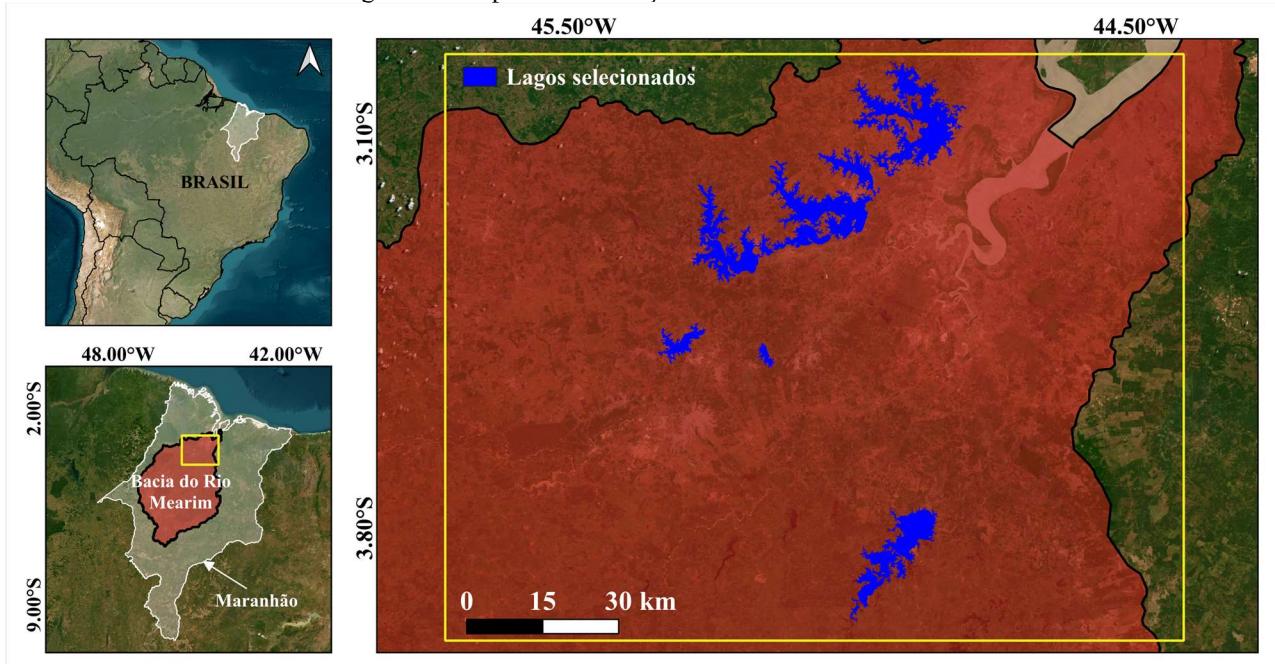
O objetivo deste trabalho foi fazer uma avaliação hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Mearim, no estado do Maranhão, com a predominância do uso de produtos disponíveis na plataforma GEE. Desse modo, buscou-se avaliar o uso e ocupação do solo, pela comparação entre os anos de 1985 e 2023, e avaliar as variáveis de área de água superficial, precipitação e evapotranspiração no período de 2016-2019.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Mearim está localizada na parte central do estado do Maranhão, nordeste do Brasil, com uma área estimada em 98.289 km^2 . Da extensão total da bacia, os biomas predominantes são 54% Amazônico e 46% de Cerrado, de modo que a área da bacia é uma zona de transição entre dois grandes biomas brasileiros, caracterizando-a como um ponto estratégico para a produção e escoamento de alimentos e matérias-primas (CODEVASF, 2019). Foram selecionados 8 lagos na região da Baixada Maranhense, porção norte da bacia hidrográfica do Rio Mearim: (1) Açu; (2) Belém; (3) Itans; (4) Aquari; (5) Viana; (6) Capivari; (7) Castelo; e (8) Cajari. A Figura 1 ilustra a composição da área de estudo.

Figura 1 – Mapa de Localização da bacia do Rio Mearim.



A Baixada Maranhense é caracterizada como um ecocomplexo, constituída por rios, lagos, estuários, campos naturais, conhecida principalmente por suas áreas alagáveis (Pinheiro; Machado, 2016). Devido a sua importância, pelo Decreto 11.900, foi estabelecida como Área de Proteção Ambiental (APA). A rede de drenagem da bacia e suas características fisiográficas foram calculadas com base no Modelo Digital do Terreno (MDT) da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução de 30 m, armazenadas no banco de dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e são apresentadas nas Figura 2 e Tabela 1, respectivamente.

Figura 2 – Rede de drenagem e canal principal da Bacia do Rio Mearim.

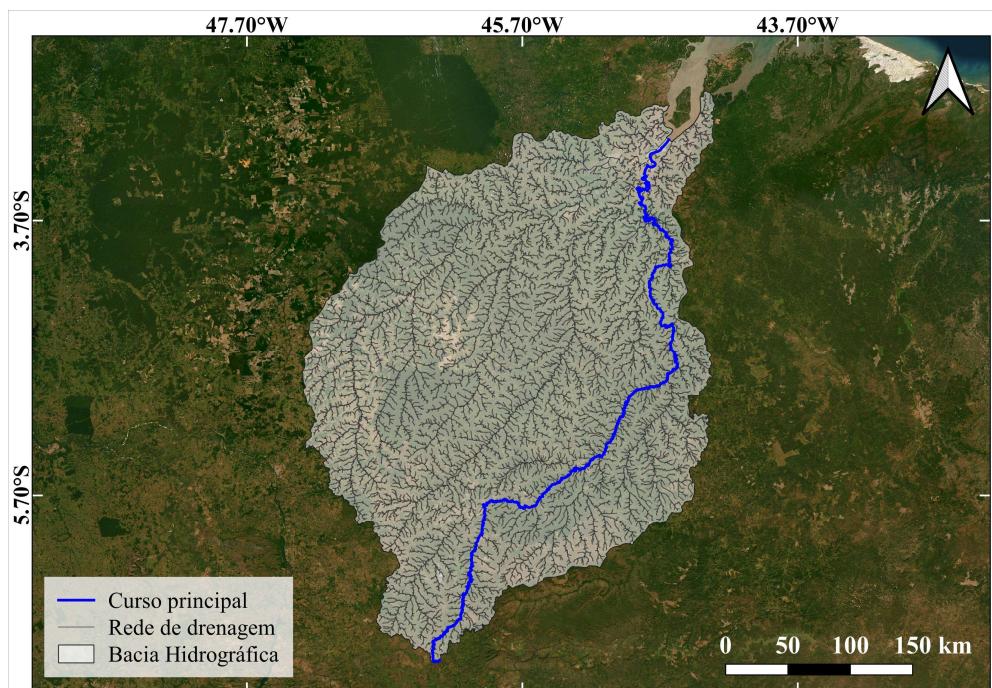


Tabela 1 – Características Fisiográficas da Bacia do Rio Mearim.

Característica	Valor
Área de Drenagem (A_D , km^2)	98861,44
Fator de Forma (K_f)	0,119
Coeficiente de Compacidade (K_c)	1,634
Densidade de Drenagem (D_D , km/km^2)	0,376
Sinuosidade do Curso D'água (Sin)	2,044

Dados utilizados

Para avaliação e comparação do uso e cobertura do solo nos anos 1985 e 2023 foram utilizados produtos da Coleção 9 do MapBiomas, uma iniciativa do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG/OC) e produzido por uma rede colaborativa formada por universidades, empresas de tecnologia e ONGs em 2015 para desenvolver um método de baixo custo de produção de séries temporais anuais de cobertura e uso do solo no Brasil com imagens Landsat processadas pela plataforma GEE com resolução espacial de 30 m disponíveis no período 1985–2023 (Souza *et al.*, 2020; SEEG/OC, 2024).

A detecção da área superficial de água nos lagos com o algoritmo CASCADES (Giustarini *et al.*, 2013) foi feita utilizando imagens de radar de abertura sintética (SAR) do satélite Sentinel 1 no período ago/2016–dez/2019 obtidas da base de dados ESA-EC Copernicus Open Access Hub (<https://dataspace.copernicus.eu/>). Os produtos foram obtidos com tempo de revisita de aproximadamente 12 dias. No modo de aquisição principal (*Interferometric Wide Swath*), o produto de *Ground Range Detected* em alta resolução e Nível 1 possui resolução de 20 m na polarização dupla VV/VH. Para este trabalho, foi utilizada apenas a polarização VV. Para a avaliação da estimativa de extensão de água, foram utilizados dados de área de água superficial obtidos da Coleção 9 do MapBiomas (SEEG/OC, 2024).

Os produtos de precipitação foram obtidos do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS), um conjunto de dados de precipitação de longo prazo desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e pelo Grupo de Riscos Climáticos (CHG). O CHIRPS incorpora imagens de satélite, com resolução de 0,05°, com dados de estações *in situ* para criar uma série temporal em grade (Funk *et al.*, 2015). Para a validação dos dados CHIRPS foram utilizados produtos dos dados meteorológicos diários brasileiros em grade (DWGD – do inglês *Brasilian Daily Weather Gridded Data*) (Xavier *et al.*, 2016; Xavier *et al.*, 2022) com resolução espacial de 0,1° no período 2016–2019 por meio de um *script* na plataforma GEE. Além disso, também foi obtido um mapa da normal climatológica de precipitação gerado com dados no período 1960–1990 da base de dados WorldClim versão 1 (Hijmans *et al.*, 2005).

Por fim, para a avaliação da evapotranspiração, foram utilizados dados do produto MOD16A2GF Versão 6.1, com resolução de 500 m, dos satélites Terra e Aqua (MODIS) (Running *et al.*, 2021), no período 2016–2019. Além disso, para fins de comparação, também foram obtidas as componentes de evapotranspiração do produto PML_V2 (Penman-Monteith-Leuning), com resolução de 500 m (Zhang *et al.*, 2016; Gan *et al.*, 2018).

Detecção de água com CASCADES

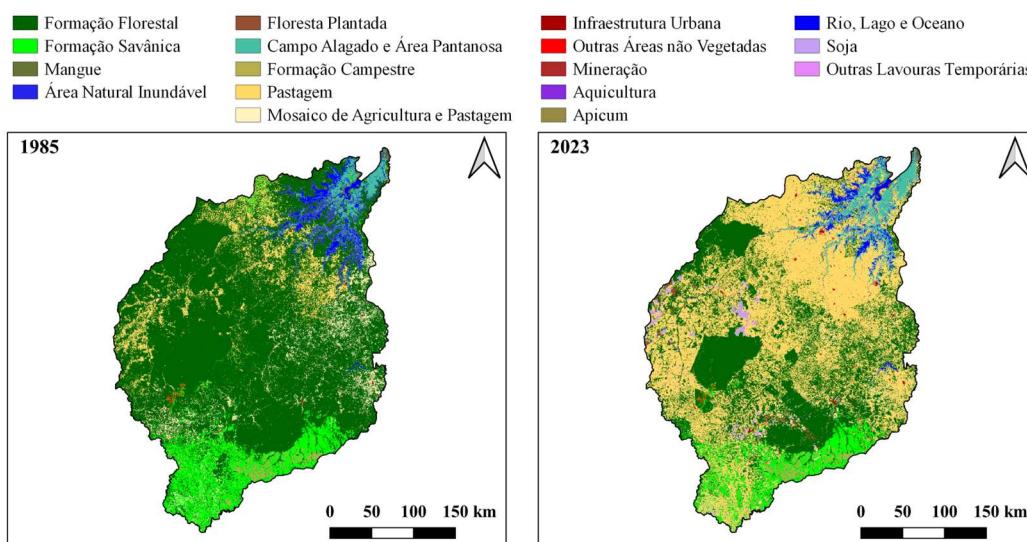
O conjunto de imagens Sentinel 1 de polarização VV foi pré-processado pelo *Sentinel Application Platform* (SNAP). Como demonstrado por Filippioni (2019), para que os dados Sentinel 1 estejam aptos para a detecção de água pela abordagem proposta é necessário a realização de um pré-tratamento que consiste em um conjunto padrão de correções aplicadas: (a) aplicação e atualização de arquivos de órbita; (b) remoção de ruído térmico; (c) remoção de ruído de borda; (d) calibração radiométrica; (e) filtragem Speckle; e (f) correção geométrica do terreno.

Em métodos de limiarização, é conveniente representar a distribuição dos níveis de cinza na imagem na forma de um histograma que fornece a frequência de ocorrência de cada nível de cinza. O método CASCADES, via parametrização de histograma, pode ser usado por qualquer imagem SAR para detecção de água sem a necessidade da fase de treinamento. O código é baseado em limiarização radiométrica, crescimento de região e detecção de mudanças, onde os valores de limiar são otimizados por meio da minimização do desvio quadrático médio entre as distribuições de retroespalhamento do corpo d'água. Para imagens com histograma bimodal, é ajustado automaticamente uma distribuição de mistura bigaussiana sobre o histograma da imagem de retroespalhamento. Para histogramas de comportamento não-bimodal, o algoritmo divide a imagem SAR em pequenos blocos de 100×100 pixels, identifica os blocos onde o histograma é bimodal e recalcula o histograma para a união dos blocos selecionados, que é, portanto, bimodal (Matgen *et al.*, 2010; Giustarini *et al.*, 2013).

RESULTADOS

A Figura 3 apresenta os mapas de uso e cobertura do solo correspondentes à Bacia do Rio Mearim nos anos 1985 e 2023, obtidos da coleção 9 do MapBiomas.

Figura 3 – Uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Mearim nos anos 1985 e 2023.

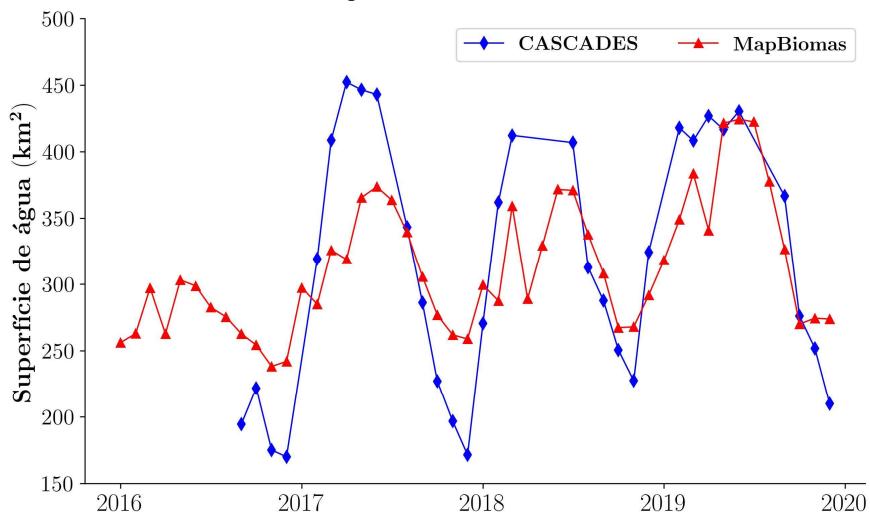


Observando os mapas apresentados, é possível destacar uma mudança considerável nas áreas de formação florestal, de $67.687,74 \text{ km}^2$ para $33.335,98 \text{ km}^2$, uma queda de 49,2%. Além disso, também houve diminuição das áreas de formação savânica. Isso pode ser decorrente do aumento das áreas de pasto, quando em 1985 a pastagem ocupava uma área de $8.464,19 \text{ km}^2$, comparada ao valor

de $47.310,89 \text{ km}^2$ em 2023, um crescimento de quase seis vezes. É possível notar ainda diminuição significativa das áreas de água superficial, com o decrescimento das áreas inundáveis naturais de $2.341,08 \text{ km}^2$ para $691,63 \text{ km}^2$.

A Figura 4 apresenta as séries temporais de superfície de água total para os 8 lagos selecionados na Baixada Maranhense obtidas com o algoritmo CASCades e dos produtos MapBiomas no período 2016–2019. É importante mencionar que a comparação foi feita para a escala mensal, visto que o MapBiomas gera dados apenas nas escalas mensal e anual. Além disso, as imagens Sentinel 1 só estão disponíveis a partir de agosto de 2016, o que motivou a escolha do período de análise das demais variáveis. As séries temporais de área de água MapBiomas e CASCades alcançaram um valor de coeficiente de correlação Pearson $r = 0,87$, o que pode refletir um bom ajuste dos produtos orbitais à situação real do conjunto de lagos. Nota-se ainda que, em relação aos dados MapBiomas, há um aumento gradual dos valores máximos, de modo que em 2016 alcançou máximos de área de água superficial inferiores àqueles alcançados no ano de 2020. As imagens radar indicam uma maior amplitude da área de água dos lagos, não identificada na série fornecida pelo MapBiomas.

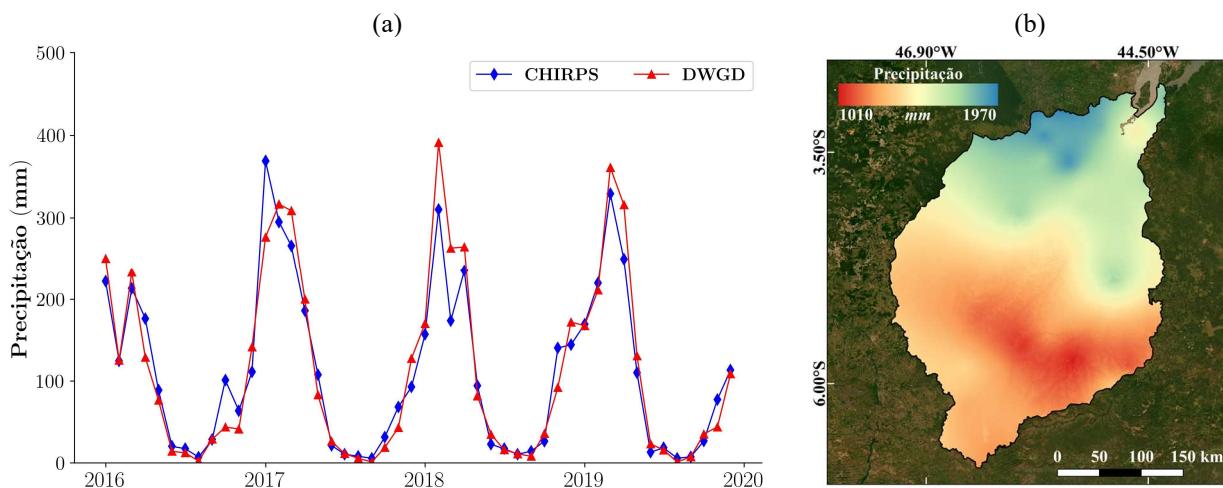
Figura 4 – Área de água MapBiomas e calculada pelo CASCades na região da Baixada Maranhense na escala mensal no período 2016–2019.



A Figura 5a apresenta as séries temporais de precipitação obtidas dos conjuntos de dados CHIRPS e DWGD. Para a avaliação dos dados CHIRPS em relação aos dados DWGD foram utilizadas as métricas de erro médio absoluto (MAE – do inglês *mean absolute error*) e raiz do erro quadrático médio (RMSE – do inglês *root mean square error*). As duas séries temporais obtiveram um bom ajuste, com coeficiente de correlação Pearson $r = 0,87$. Os dados CHIRPS obtiveram MAE = $47,28 \text{ mm}$ e RMSE = $56,02 \text{ mm}$. É possível observar uma forte sazonalidade, com os períodos secos (entre maio e novembro) e úmidos (entre dezembro e abril) bem marcados, o que está de acordo com os resultados apresentados por Xavier *et al.* (2021). Comparando o gráfico apresentado na Figura 5a com o gráfico da Figura 4, nota-se uma correlação entre os dados CHIRPS e DWGD com os dados de área de água superficial MapBiomas, de modo que os valores máximos de 2016 são inferiores aos demais anos analisados, com um aumento gradual desses máximos ao longo dos anos. Esse comportamento pode ser um reflexo dos episódios de El Niño ocorridos no período 2012-2016, em que o regime de secas foi predominante, com a recuperação dos recursos hídricos a partir de 2017 (Silva *et al.*, 2016; Pinheiro; Araújo, 2019). A Figura 5b apresenta a normal climatológica de precipitação WorldClim. É possível notar que as taxas de precipitação são maiores na região norte da

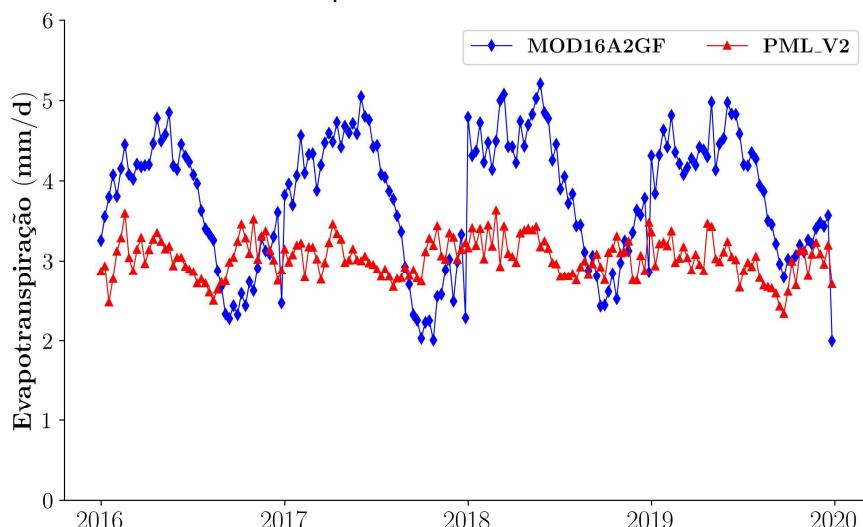
bacia (Baixada Maranhense), com as regiões central e sudeste obtendo um baixo volume médio de precipitação. Esse comportamento coincide com a transição entre os climas tropical úmido e tropical subúmido na bacia, causado pelos sistemas de monções (Alvares *et al.*, 2013).

Figura 5 – (a) Precipitação CHIRPS e DWGD na região da Bacia do Rio Mearim na escala mensal no período 2016–2019. (b) Ocorrência de precipitação total anual dos valores médios mensais WORLDCLIM.



Por fim, a Figura 6 apresenta as séries temporais de evapotranspiração dos produtos MOD16A2GF e PML_V2. Para os dois conjuntos de dados de evapotranspiração alcançou-se um coeficiente de correlação Pearson $r = 0,25$, o que reflete um ajuste ruim entre os produtos utilizados. Entretanto, quando comparadas as séries de evapotranspiração às séries históricas de área de água superficial e precipitação (Figuras 4 e 5a, respectivamente), o produto MOD16A2GF representa melhor a tendência da série temporal, de modo que os valores de evapotranspiração são mais altos no primeiro semestre e menores no segundo semestres dos anos do período de análise, comportamento semelhante aos apresentados para as outras variáveis analisadas.

Figura 6 – Evapotranspiração MOD16A2GF e PML_V2 na região da Bacia do Rio Mearim na escala de 8 dias no período 2016–2019.



CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma avaliação das componentes hidrológicas de área superficial de água, precipitação e evapotranspiração no período 2016–2019 sobre a bacia do Rio Mearim, Maranhão, a partir de dados provenientes de sensoriamento remoto e de bases de dados que combinam produtos *in situ* e orbitais, tendo como contexto as mudanças ocorridas no uso e ocupação do solo entre os anos de 1985 e 2023. Os resultados mostraram que existe uma forte correlação entre as variáveis analisadas, de modo que é possível identificar a dinâmica natural do ciclo hidrológico – isto é, os períodos secos e úmidos no ano.

Entretanto, as avaliações realizadas aqui são bastante restritivas, tanto em função do curto período analisado (2016–2019) quanto em função das dificuldades na obtenção de dados *in situ* para validação. Por exemplo, o conjunto de lagos utilizados para avaliação da detecção de água com dados Sentinel 1 não possuem monitoramento *in situ*, de modo que inviabilizou sua validação, restringindo-se apenas a uma comparação com os produtos de área de água MapBiomass. Para estudos futuros, recomenda-se a ampliação do período de análise, podendo-se utilizar toda a série temporal disponível das imagens Sentinel 1 para avaliação da área de água superficial, bem como produtos de precipitação e evapotranspiração com séries temporais atualizadas. Além disso, para fins de validação, na falta de dados *in situ*, é recomendada (1) a utilização de produtos já validados em regiões com características ambientais semelhantes e (2) a comparação com produtos de melhor resolução espacial.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os primeiro e segundo autores são bolsistas de doutorado da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE). O terceiro autor é bolsista de Produtividade e Pesquisa do CNPq.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. (2013). “*Köppen’s Climate Classification Map for Brazil*”. Meteorologische Zeitschrift 22, pp. 711–728.
- CODEVASF. (2019). “*Plano Nascente Mearim: Plano de Preservação e Recuperação de Nascentes da Bacia do rio Mearim*”. Evolução do Conhecimento Científico na Engenharia Ambiental e Sanitária: Brasília, 190 p.
- FILIPONI, F. (2019). “*Sentinel-1 GRD preprocessing workflow*”. Proceedings 18(1).
- FU, B. et al. (2022). “*Spatio-temporal coupling coordination analysis between marsh vegetation and hydrology change from 1985 to 2019 using LandTrendr algorithm and Google Earth Engine*.” Ecological Indicators 137(108763).
- FUNK, C. et al. (2015). “*The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*”. Scientific Data 2(150066).
- GAN, R. et al. (2018). “*Use of satellite leaf area index estimating evapotranspiration and gross assimilation for Australian ecosystems*”. Ecohydrology 11(e1974).

- GIUSTARINI, L. et al. (2013). “*A change detection approach to flood mapping in urban areas using TerraSAR-X*”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 51(4), pp. 2417–2430.
- GORELICK, N. et al. (2017). “*Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*”. Remote Sensing of Environment 202, pp. 18-27.
- HIJMANS, R. J. et al. “*Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas*”. International Journal of Climatology 25, pp. 1965-1978, 2005.
- MATGEN, P. et al. (2010). “*Towards the sequential assimilation of SAR-derived water stages into hydraulic models using the particle filter: proof of concept*”. Hydrology and Earth System Sciences 7(2), pp. 1785-1819.
- PINHEIRO, C. U. B.; MACHADO, M. A. (2016). “*Da água doce à água salgada: mudanças na vegetação de igapó em margens de lagos, rios e canais no baixo curso do rio Pindaré, Baixada Maranhense*”. Revista Brasileira De Geografia Física 9(5), pp. 1410–1427.
- PINHEIRO, J. M.; ARAÚJO, R. R. (2019). “*Impactos do fenômeno El Niño e La Niña no município de São Luís – Maranhão*”. Revista GeoUECE (Online) 8(15), pp. 124-136.
- RUNNING, S. et al. “*MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]*”. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061>>. Acesso em: 06 dez. 2024.
- SILVA, F. B. et al. (2016). “*Evidências de Mudanças Climáticas na Região de Transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão*”. Revista Brasileira de Meteorologia 31(3), pp. 330-336.
- Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima. *Projeto MapBiomas – Coleção 9 da Serie Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil*. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/>>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- SOUZA, C. M. et al. (2020). “*Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian Biomes with Landsat archive and Earth Engine*”. Remote Sensing 12(17).
- WIELAND, M.; MARTINIS, S. (2020). “*Large-scale surface water change observed by Sentinel-2 during the 2018 drought in Germany*”. International Journal of Remote Sensing 41(12), pp. 4742–4756.
- XAVIER, A. C. et al. (2022). “*New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)*”. International Journal of Climatology 42(16), pp. 8390–8404.
- XAVIER, A. C. et al. (2016). “*Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)*”. International Journal of Climatology 36(6), pp. 2644–2659.
- XAVIER, A. C. F. et al. (2021). “*Evaluation of satellite-derived products for the daily average and extreme rainfall in the Mearim river drainage basin (Maranhão, Brazil)*”. Remote Sensing 13(21).
- XIA, J. et al. (2017). “*Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China*”. Science China Earth Sciences 60, pp. 652–658.

YANG, D. et al. (2021). “*Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review*”. *Geography and Sustainability* 2(2), pp. 115-122.

ZHANG, Y. et al. (2016). “*Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components*”. *Scientific Reports* 6(19124).