AVALIAÇÃO DO PERFORMANCE DE DADOS DE REANÁLISE DE RECURSOS HÍDRICOS PARA MONITORAMENTO MENSAL DA SEGURANÇA HÍDRICA NO BRASIL

Edna Lizeth Higuera-Castro[1] ; Ana Paula Frazão [2]; Aline Paiva Moreira[3]; Suzana Maria Gico Lima Montenegro[4] & Marcos Roberto Benso[5]

Palavras-Chave – FLDAS; Índice de Falkenmark; disponibilidade hídrica renovável per capita.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água enfrenta desafios crescentes a nível global. Mais de dois bilhões de pessoas vivem em países com elevado estresse hídrico, e cerca de quatro bilhões experimentam escassez severa de água durante pelo menos um mês por ano (Sheng & Cheng, 2026; WWAP, 2019). Embora o Brasil possua 12% da água doce no mundo, sua distribuição é desigual no território e no tempo. Assim mesmo há um aumento das demandas de água no Brasil e os conflitos nos usos da água ameaçam a segurança hídrica no País (Gesualdo *et al.*, 2021).

O monitoramento da segurança hídrica é essencial para identificar tendências de disponibilidade hídrica, antecipar situações de escassez e apoiar a tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos. A avaliação dos indicadores de disponibilidade, demanda e qualidade da água permite detectar vulnerabilidades, reduzir riscos associados a secas, eventos extremos e o aumento das demandas hídricas, além de apoiar estratégias de adaptação às mudanças climáticas (Hasan *et al.,* 2019). Nesse sentido, destaca-se o uso de técnicas de modelagem e análise de dados como uma alternativa relevante para analisar e garantir a segurança hídrica, assim mesmo são necessários para o planejamento e gestão dos recursos hídricos (Benso *et al.*, 2025).

O Índice de Falkenmark é um indicador que permite avaliar e identificar situações de estresse ou escassez de água em uma região, definido como a quantidade de água doce renovável disponível a cada ano por habitante em uma determinada região (Falkenmark, 1989). O objetivo do estudo consistiu em avaliar o desempenho de dados de reanálise de escoamento do produto FLDAS para o monitoramento mensal do estresse hídrico no Brasil, por meio da estimativa da disponibilidade de água doce renovável disponível por habitante, utilizando o índice de Falkenmark, como auxiliar o planejamento dos recursos hídricos e identificar com antecedência, situações de estresse hídrico.

METODOLOGIA

O Índice de Falkenmark foi estimado a partir da relação entre a disponibilidade hídrica e a população residente em cada bacia hidrográfica de nível 4. A disponibilidade hídrica corresponde ao volume de recursos hídricos potencialmente disponíveis para o abastecimento urbano e foi estimada a partir dos dados mensais de escoamento superficial (Qs_tavg) e subsuperficial (Qsb_tavg), expressos em unidades de kg.m-2.s-1, extraídos do modelo Noah 3.6.1 do produto FLDAS (*Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System*) da NASA. Este produto tem resolução espacial de

1) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, elhiguerac@unal.edu.co
2) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, anapaulafrazao123@gmail.com
3) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, alinepaivamoreira@usp.br
4) Diretora Presidente – Agência Pernambucana de Água e Clima, APAC. Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. Av. Cruz Cabugá, 1111, Santo Amaro, Recife/PE. E-mail: suzana.montenegro@apac.pe.gov.br
5) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, marcosbenso@usp.br

0,1°, resolução temporal mensal e cobertura global. O período dos dados corresponde a janeiro de 1995 a dezembro de 2025.

No processo foi realizada uma interpolação areal dos valores de escoamento para as ottobacias de nível 4, permitindo a estimativa da disponibilidade hídrica mensal em cada ottobacia. As equações utilizadas foram:

$$IF = \frac{RHD}{N° hab} \quad (1)$$

$$RHD = EXC * AT \quad (2)$$

$$EXC = Escoamento\ superficial + escoamento\ subsuperficial \quad (3)$$

Onde: IF é o Índice de Falkenmark, RHD são os recursos hídricos disponíveis, EXC é o excedente hídrico expressado em termos de escoamento superficial e subsuperficial, AT é a área delimitada e $N° hab$ é o número de habitantes dessa área.

Para a validação dos dados utilizados do FLDAS, foram utilizados dados de vazão observada provenientes da base CAMELS-BR (*Catchment Attributes and Meteorology for Large-sample Studies – Brazil).* Essa base contém as séries hidrológicas observadas de estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Foram utilizadas as séries mensais de vazão do período de outubro de 2022 a setembro de 2023, comparando os valores mensais de escoamento total do FLDAS e os valores observados nas 231 bacias da base CAMELS-BR.

Após, os valores observados e simulados foram classificados em seis classes associados aos níveis progressivos de disponibilidade hídrica, conforme a classificação do Indice de Falkenmark adotada por Rebouças *et al.* (2006), consolidados em uma matriz de confusão e os indicadores de desempenho como acurácia, o coeficiente Kappa, sensibilidade, especificidade, sensitividade (o recall) e precisão foram calculados, com o fim de avaliar o desempenho do produto FLDAS com relação aos observados.

RESULTADOS

A média mensal do Indice de Falkenmark (IF) para o ano hidrológico de outubro de 2022 a setembro de 2023 é apresentada Na Figura 1. A região da Amazônia tem predominância na classificação de "Muito Rico", como valores de IF maiores a 100000 $m^3/hab/ano$ e resulta ser consistente devido a que esta região concentra quase 80% da disponibilidade hídrica superficial do Brasil (ANA, 2024) e com uma densidade populacional menor comparada com outras regiões. Em contraste, o semiárido nordestino concentra as classes de "Muito Pobre" com valores menores a 500 $m^3/hab/ano$ e "Pobre" com valores entre 500 e 1000 $m^3/hab/ano$. Estes valores de estresse hídrico são esperados devido às baixas precipitações anuais entre 400 e 800 mm e de sua evapotranspiração de 2100 mm/ano (Meira Neto *et al*., 2024). Além de sua significativa densidade populacional, por ter 22 milhões de habitantes em 1200 municípios (Pilz *et al*., 2019).

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e de Rio de Janeiro mostram uma escassez hídrica derivada pelas demandas hídricas e da concentração de mais de 30 milhões de habitantes nestas áreas (IBGE, 2023; 2025). Finalmente, as regiões Sul, Centro-Oeste e o interior da região Sudeste apresentam uma predominância na classificação de "Rico" com valores entre 10000 e 100000 $m^3/hab/ano$ e "Suficiente" com 2000 e 10000 $m^3/hab/ano$ e com alguns valores classificados como "Regular" com valores entre 1000 e 2000 $m^3/hab/ano$.

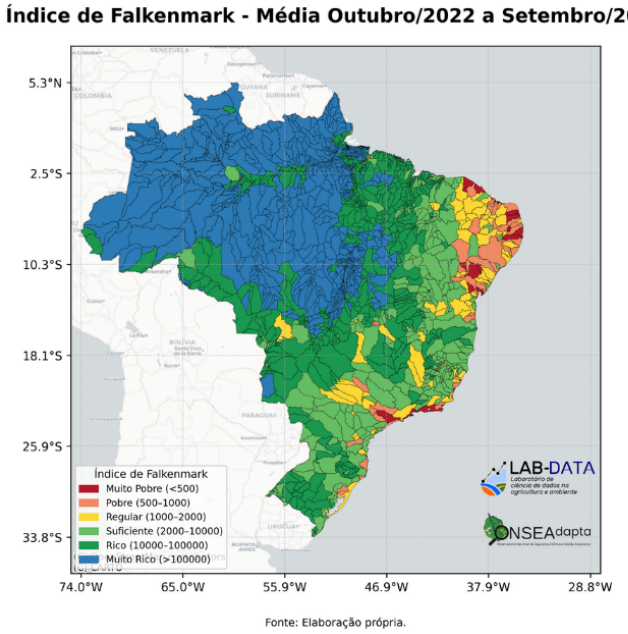


Figura 1. Índice de Falkenmark por mês para o período de outubro de 2022 a setembro de 2023, em unidades de m^3/hab ano. Fonte: elaboração própria.

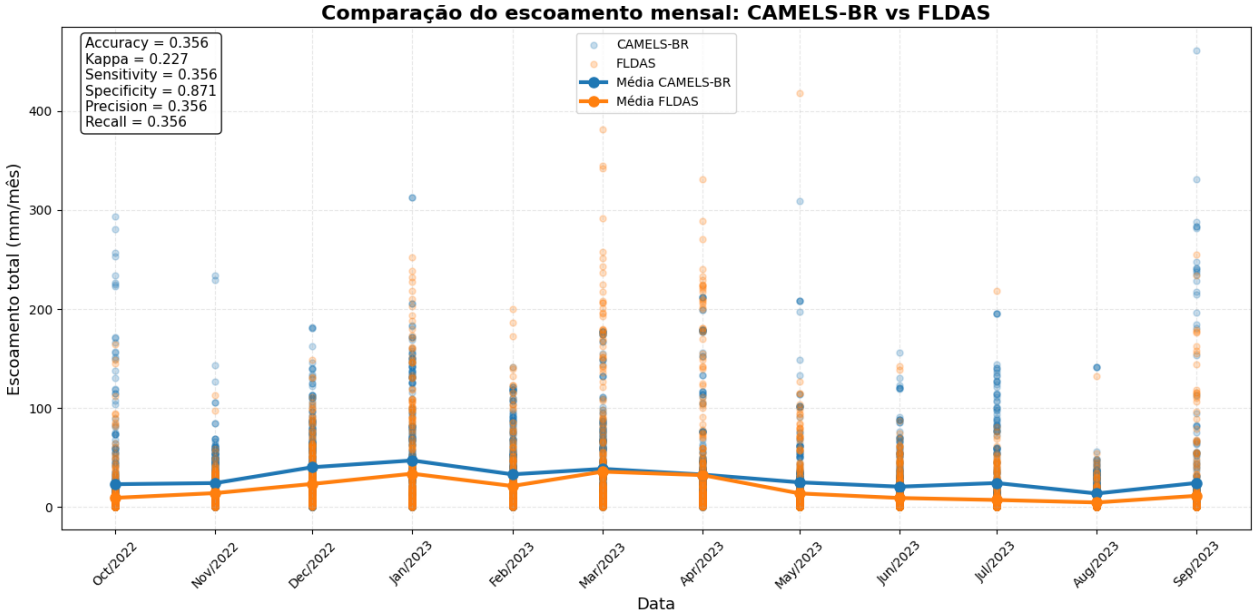


Figura 2. Comparação do escoamento mensal dos dados observados (CAMELS-BR) com os dados simulados (FLDAS). Fonte: elaboração própria.

Na Figura 2 é apresentada a comparação das séries mensais de escoamento total entre os dados observados do CAMELS-BR e os dados simulados do FLDAS para as 231 bacias hidrográficas selecionadas. Os resultados indicam que os dados de escoamento total do produto FLDAS reproduz adequadamente a sazonalidade e as dinâmicas hidrológicas das bacias. No entanto, apresenta uma subestimação dos valores de escoamento, em uma tendencia de subestimação dos volumes escoados, especialmente nos períodos com maior vazão, sendo uma estimação conservadora da disponibilidade hídrica. Esses achados são suportados pelos indicadores de desempenho, com uma acurácia de 0.356, Kappa de 0.227 e especificidade de 0.871, evidenciando uma correspondência moderada entre os dados observados e simulados. Neste sentido, as classes de IF “Muito Pobre” e “Pobre” tendem a sobrestimar os valores de escassez hídrica, em especial durante a estação seca.

CONCLUSÕES

- O produto FLDAS reproduz adequadamente os padrões espaciais e temporais do escoamento, apesar da subestimação com relação aos valores observados.
- A subestimação dos valores de escoamento do FLDAS tende a gerar uma sobrestimação de estresse hídrico, especialmente durante a estação seca.
- O uso de dados confiáveis para o monitoramento da segurança hídrica auxilia o planejamento dos recursos hídricos, assim como a gestão de risco e de desastres, permitindo a identificação antecipada de situações de estresse hídrico em locais específicos.

REFERÊNCIAS

ANA. (2024). Manual de usos consuntivos da água no Brasil (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA)

BENSO, M. R., SILVA, R. F., CHIQUITO GESUALDO, G., SARAIVA, A. M., DELBEM, A. C. B., MARQUES, P. A. A., MARENGO, J. A., & MENDIONDO, E. M. (2025). "*A data-driven framework for assessing climatic impact drivers in the context of food security*". Natural Hazards and Earth System Sciences, 25(4), 1387–1404. https://doi.org/10.5194/nhess-25-1387-2025

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023). Censo Demográfico 2022: População e domicílios – Primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2025). Estimativas da População residente para os municípios e para as unidades da federação – data de referência 1º de julho de 2025.

FALKENMARK, M. (1989). *"The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed?"* Ambio, 18(2), 112–118.

GESUALDO, G. C., SONE, J. S., GALVÃO, C. DE O., MARTINS, E. S., MONTENEGRO, S. M. G. L., TOMASELLA, J., & MENDIONDO, E. M. (2021). *"Unveiling water security in Brazil: current challenges and future perspectives"*. Hydrological Sciences Journal, 66(5), 759–768. https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1899182

HASAN, E., TARHULE, A., HONG, Y., & MOORE, B. (2019). *"Evaluation of Sentinel-1 and 2 time series for land cover classification of forest-agriculture mosaics in temperate and tropical landscapes"*. Remote Sensing, 11(8). https://doi.org/10.3390/rs11080904

MEIRA NETO, A. A.; MEDEIROS, P.; ARAÚJO, J.C.; PEREIRA, B.; SIVAPALAN, M. (2024). *"Evolution of drought mitigation and water security through 100 years of reservoir expansion in semi-arid Brazil"*. Water Resources Research, 60, e2023WR036411.

PILZ, T.; DELGADO, J. M.; VOSS, S.; VORMOOR, K.; FRANCKE, T.; COSTA, A.; MARTINS, E.; BRONSTERT, A. (2019). *"Seasonal drought prediction for semiarid northeast Brazil: What is the added value of a process-based hydrological model?"* Hydrology and Earth System Sciences, 23, 1951–1971.

REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (2006). Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3ª ed. São Paulo: Escrituras Editora, 748p.

SHENG, J., & CHENG, Q. (2026). *"Global water security is by rising inequality"*. Nature Geoscience 2026 19:3, 19(3), 243–244. https://doi.org/10.1038/s41561-025-01909-8

WWAP. (2019). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind (UNESCO World Water Assessment Programme, Ed.).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de DTI-A, vinculada ao projeto n° 406919/2022-4. Também agradecem ao Observatório Nacional de Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa - ONSEAdapta e ao LabData pelo suporte institucional, infraestrutura e ambiente colaborativo que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.