

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

INTEGRAÇÃO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E ESTAÇÕES IN SITU PARA ESTIMATIVA DA RECARGA DE AQUIFEROS

Thaise Suanne Guimarães Ferreira¹ & José Almir Cirilo²

Abstract: This study evaluated groundwater recharge estimation in the Metropolitan Region of Recife using the BALSEQ water balance model with different input data combinations from meteorological stations and remote sensing products. Historical series of precipitation and potential evapotranspiration from CHIRPS, ERA5, ANA, and INMET datasets were analyzed. Recharge estimates were compared using statistical metrics such as correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2), percentage bias (PBIAS), and root mean square error (RMSE), evaluated at different temporal scales. The best performances were obtained with the CHIRPS_INMET and ANA_ERA5 combinations, both showing high correlation and low bias relative to the observed dataset (ANA_INMET). Results indicate that combining remote sensing data with in situ measurements is a viable alternative for groundwater recharge estimation, especially in data-scarce regions.

Resumo: Este estudo avaliou a estimativa da recarga de águas subterrâneas na Região Metropolitana do Recife utilizando o modelo de balanço hídrico BALSEQ, com diferentes combinações de dados de entrada provenientes de estações meteorológicas e produtos de sensoriamento remoto. Foram analisadas séries históricas de precipitação e evapotranspiração potencial, com dados do CHIRPS, ERA5, ANA e INMET. As estimativas de recarga foram comparadas com base em métricas estatísticas como coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R^2), percentual de tendência (PBIAS) e erro quadrático médio (RMSE), avaliadas em diferentes escalas temporais. Os melhores resultados foram obtidos com as combinações CHIRPS_INMET e ANA_ERA5, ambas com alta correlação e baixo viés em relação ao conjunto de dados observados (ANA_INMET). Os resultados indicam que a combinação de dados de sensoriamento remoto com medições in situ é uma alternativa viável para a estimativa da recarga, especialmente em regiões com escassez de dados hidrológicos.

Palavras-Chave – BALSEQ; recarga de aquíferos; sensoriamento remoto.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são fundamentais para o desenvolvimento sustentável e socioeconômico (Ayadi et al., 2024), representando a maior reserva acessível de água doce do planeta e cerca de um terço das retiradas globais (Famiglietti, 2014; Siebert et al., 2010). No entanto, evidências crescentes indicam seu esgotamento e os impactos ambientais associados, apontando falhas nas estratégias de gestão atuais (de Graaf et al., 2019; Gorelick & Zheng, 2015).

A recarga dos aquíferos, variável essencial no balanço hídrico subterrâneo, precisa ser quantificada com precisão (Ali & Mubarak, 2017; Singh et al., 2019) para uma gestão eficiente e para

1) Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE, Campus Recife

2) Professor do Núcleo de Tecnologia do Campus do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco.

entender os impactos das mudanças climáticas (Bierkens & Wada, 2019; Jasechko & Perrone, 2021; Yenehun et al., 2020). Esse processo é complexo e depende de fatores como precipitação, uso da terra, características do solo e interação entre águas superficiais e subterrâneas (Jiménez-Martínez et al., 2013; Scanlon et al., 2006; Smerdon, 2017), os quais variam no tempo e espaço.

A recarga não pode ser medida diretamente e está sujeita a incertezas decorrentes de dados limitados e suposições inadequadas (Adhikari et al., 2022; Kumar et al., 2022; Martos-Rosillo et al., 2015). A escassez de dados é um desafio, especialmente para avaliar a variabilidade espacial da recarga (Brito et al., 2018; Coelho et al., 2017). Em áreas extensas e com poucos dados, modelos simplificados, como o BALSEQ (Lobo Ferreira, 1981), podem ser uma solução viável, exigindo menos dados de entrada.

O BALSEQ estima a recarga potencial como a água que percola além da zona radicular, podendo atingir a zona saturada (Perkins et al., 2014). Estudos demonstraram sua aplicabilidade em diferentes cenários. Cambraia Neto & Rodrigues (2021) mostraram que mudanças no uso do solo, como a substituição por vegetação nativa, reduziram em até 45% a recarga potencial no DF. Martins et al. (2024), analisando cenários climáticos no sul de Portugal, constataram redução de até 60% na infiltração profunda.

O sensoriamento remoto surge como alternativa promissora para estimar os componentes do balanço hídrico em áreas com poucos dados (Belay et al., 2019; Brocca et al., 2020, podendo ser integrado a modelos como o BALSEQ (Babaei & Katabchi, 2022; Hidayat et al., 2021; Hu et al., 2017). Sua ampla cobertura, acesso gratuito e dados quase em tempo real facilitam o monitoramento regional das águas subterrâneas (Ahamed et al., 2022). Estudos demonstram que a integração de dados de múltiplas fontes espaciais pode aprimorar o entendimento dos sistemas aquíferos e apoiar a tomada de decisão (Ahamed et al., 2022; Rashid & Ahmed, 2018; Trabelsi & Abida, 2024; Yang et al., 2024).

Contudo, as incertezas inerentes aos dados de sensoriamento remoto, como diferenças regionais de precisão, permanecem um desafio (Senay, Kagone e Velpuri, 2020; Tian e Peters-Lidard, 2010). Diante disso, o objetivo deste estudo é avaliar os resultados das estimativas de recarga de água subterrânea obtidas com o BALSEQ, comparando os resultados baseados exclusivamente em dados de estações medidas com aqueles obtidos por meio da combinação de dados de sensoriamento remoto e dados medidos, visando verificar a viabilidade e a precisão dessa integração. A análise será aplicada à Região Metropolitana do Recife, em Pernambuco.

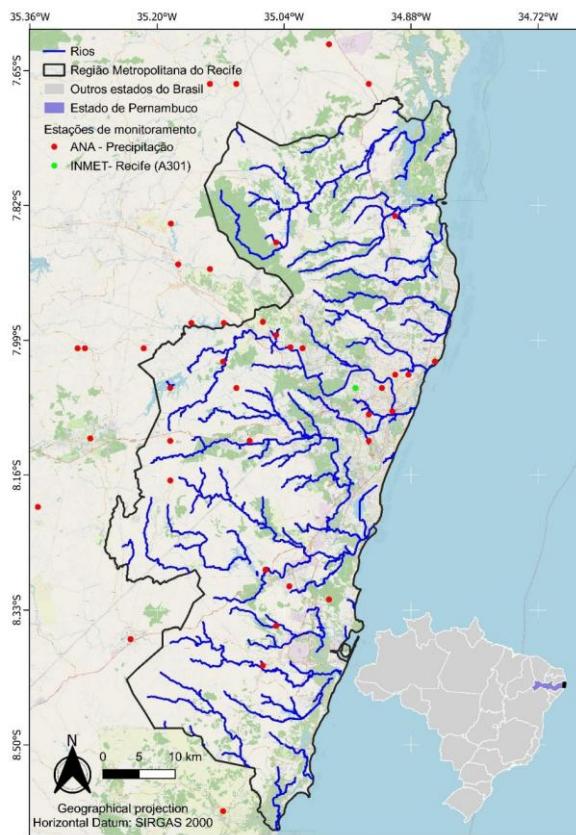
MATERIAIS E MÉTODO

Área de Estudo

A Região Metropolitana do Recife (RMR) está localizada na faixa costeira do estado de Pernambuco, estendendo-se por um comprimento de cerca de 80 km (Figura 1). Situa-se entre os paralelos 7°40'56" e 8°38'00" ao sul e os meridianos 34°49'00" e 35°15'52" oeste de Greenwich.

A principal forma de recarga dos aquíferos se dá por meio de precipitação. O índice pluviométrico anual varia entre 2.000 mm/ano e 2500 mm/ano na região, onde os maiores totais anuais se encontram na faixa litorânea, principalmente na porção central da RMR, reduzindo à medida que desloca para oeste do continente (E. C. da Silva, 2018). Os meses de abril a agosto compõem o período chuvoso da região, correspondendo por quase 70% da precipitação anual (E. C. da Silva, 2018).

Figura 1 - Localização da Região Metropolitana do Recife, no estado de Pernambuco.



Base de dados hidrológico

Foram utilizados dados de precipitação e evapotranspiração potencial provenientes de estações de medição in situ e de produtos de sensoriamento remoto (Tabela 1), abrangendo o período de 2004 a 2023 para a Região Metropolitana do Recife.

As precipitações observadas foram obtidas de 44 estações pluviométricas da ANA, selecionadas com base na continuidade dos registros. A chuva média da área foi calculada pelo Método do Inverso do Quadrado das Distâncias. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Penman-Monteith, com dados da estação meteorológica do INMET em Recife.

Entre os produtos de sensoriamento remoto, foram usados o CHIRPS e o ERA5. O CHIRPS, com resolução espacial de $0,05^\circ$, combina diferentes fontes para gerar séries de precipitação quase globais (Funk et al., 2015). Já o ERA5, do ECMWF, fornece dados de reanálise atmosférica com resolução de 30 km, incluindo precipitação, temperatura, umidade, vento e radiação solar (Hersbach et al., 2020). Neste estudo, os dados do ERA5 foram utilizados tanto para a precipitação quanto para o cálculo da evapotranspiração potencial via Penman-Monteith.

Tabela 1 – Conjunto de dados utilizados no presente estudo

Fonte de dado	Tipo de dado	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Disponibilidade
Estações Pluviométricas	Precipitação	Pontual	Diário	2004-2023
CHIRPS	Precipitação	25 km	Mensal	2004-2023
ERA5	Precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global	30 km	Mensal	2004-2023
Estações Meteorológicas	Temperatura máxima e mínima, umidade relativa máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica	Pontual	Horário	2004-2021

O modelo BALSEQ

O BALSEQ é um modelo de balanço hídrico sequencial diário desenvolvido por Lobo Ferreira (1981), que estima a recarga subterrânea com dados de fácil acesso (Martins et al., 2021). Seus principais insumos são precipitação diária, evapotranspiração potencial (PET), número de curva (CN) e a capacidade máxima de água disponível no solo para evapotranspiração (AGUT).

O modelo calcula o escoamento direto (Ed) e a infiltração profunda (Ip), considerando que a infiltração ocorre apenas verticalmente, segundo a equação:

$$Ip = P - Ed - ETR - \Delta AI \quad (1)$$

Onde: P = precipitação, ETR = evapotranspiração real e ΔAI = variação do armazenamento no solo. O Ed é estimado pelo método do Número de Curva (SCS, 1972).

O BALSEQ foi implementado em Excel e rodado diariamente para o período de 2004 a 2023, assumindo armazenamento inicial nulo.

Para a caracterização espacial, foram definidas Unidades Hidrogeológicas Homogêneas (UHH), combinando informações de solo do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco e uso e ocupação do solo do Mapbiomas. Cada UHH recebeu valores de CN e AGUT, definidos a partir da capacidade utilizável de água no solo (Cu) e da profundidade efetiva das raízes (Rp), conforme:

$$AGUT = Cu \times Rp \quad (2)$$

Essa abordagem permitiu a divisão da área de estudo em subáreas com propriedades físico-hidrológicas semelhantes, utilizadas como base para a aplicação do modelo.

Métricas de avaliação

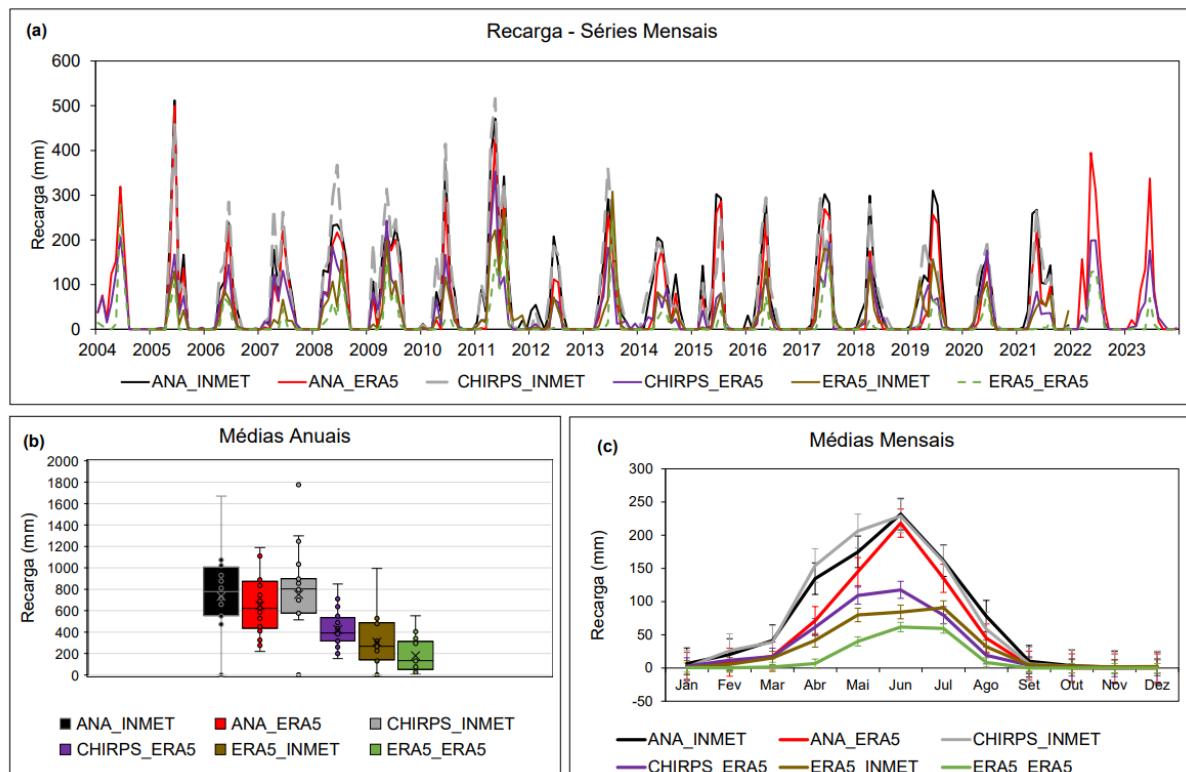
Foram analisadas as correlações entre os diferentes conjuntos de dados utilizados como entrada no modelo BALSEQ, incluindo precipitação e evapotranspiração potencial provenientes de estações e produtos de sensoriamento remoto. As métricas avaliadas mensal e sazonalmente foram: Coeficiente de Determinação (R^2), Correlação de Pearson (r), Percentual de Tendência (PBIAS) e

Erro Quadrático Médio (RMSE), conforme critérios de desempenho propostos por Moriasi et al. (2007).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados para a estimativa de recarga a partir de diferentes conjuntos de dados de entrada realizada através do BALSEQ são apresentados da Figura 2. Na mesma figura também são visualizados os gráficos do tipo box plot que ilustram as médias anuais, bem como o gráfico que mostra as médias mensais acompanhadas dos respectivos desvios padrões.

Figura 2 – Gráficos das estimativas para recarga modelada através BALSEQ para simulação da Região Metropolitana do Recife. Em (a) séries temporais mensais em milímetros de 2004 a 2023, em (b) box-plot mostrando médias anuais, desvios padrão e valores atípicos e em (c) médias mensais com barras de erro correspondentes aos desvios padrão.

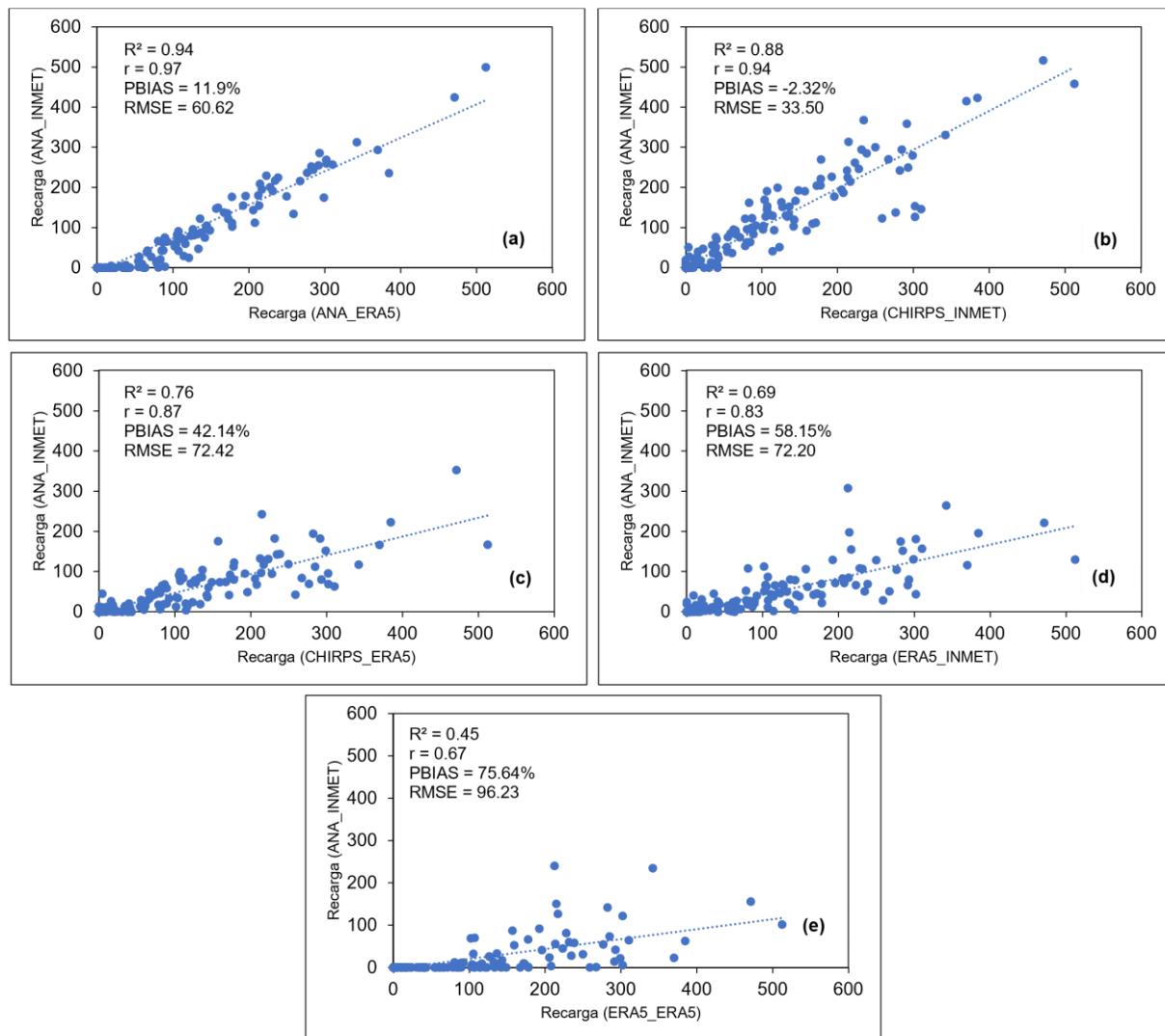


Os resultados das métricas estatísticas estão apresentados na Figura 3. As métricas foram avaliadas a partir da relação dos resultados da recarga estimada a partir do conjunto de dados observados (ANA_INMET) com as demais combinações propostas nesse estudo. Com exceção da combinação ERA5 ERA5, todas as combinações apresentaram um r superior a 0.70. As combinações ANA ERA5 e CHIRPS_INMET tiverem r superior a 0.90 (0.97 e 0.94, respectivamente), sendo classificados como “quase perfeitos”. CHIRPS ERA5 e ERA5_INMET com r de 0.87 e 0.83, respectivamente, são classificados com uma correlação linear “muito alta”.

Dentre as cinco combinações, três (CHIRPS ERA5, ERA5_INMET e ERA5 ERA5) apresentaram valores de PBIAS superiores a 25%, indicando que a estimativa da recarga é insatisfatória, comparadas à combinação ANA_INMET. O PBIAS para o conjunto ANA ERA5 foi

de 11.9%, classificado como uma boa estimativa segundo Moriasi et al. (2007) indicando apenas uma leve superestimação da série. Já a combinação CHIRPS_INMET estimou satisfatoriamente a recarga, com PBIAS de -2.32%.

Figura 3- Métricas estatísticas das estimativas de recarga calculada através do BALSEQ com a combinação de dados observados ANA_ERA5, em escala mensal, a partir das combinações (a) ANA_ERA5, (b) CHIRPS_INMET, (c) CHIRPS_ERA5, (d) ERA5_INMET, e (e) ERA5_ERA5.



O PBIAS, RMSE e r foram analisados também para dois períodos distintos: estação chuvosa (abril a julho) e estação seca (novembro a fevereiro). Os resultados são mostrados na Tabela 2.

Os dados de precipitação do ERA5 quando combinados com as duas fontes de dados de potencial de evapotranspiração (INMET e ERA5), apresentaram resultados fortemente insatisfatórios na maioria métricas avaliadas. Apenas o r indica uma boa correlação linear entre os dados, com valores de 0.62 e 0.83 para a combinação ERA5_INMET nas estações chuvosa e seca, respectivamente, e 0.74 e 0.50 para a combinação ERA5_ERA5 nessas mesmas estações. A combinação do CHIRPS com a evapotranspiração potencial do INMET apresentou resultados

satisfatórios quanto ao PBIAS, apenas com uma leve tendência a superestimar os valores tanto na estação chuvosa quanto na estação seca, com PBIAS de -6.61 e -0.80, respectivamente.

Tabela 2 – Métricas estatísticas das estimativas de recarga calculada através do BALSEQ com a combinação de dados observados ANA ERA5, para as estações chuvosa e seca, a partir das combinações (a) ANA ERA5, (b) CHIRPS INMET, (c) CHIRPS ERA5, (d) ERA5 INMET, e (e) ERA5 ERA5.

		ANA ERA5	CHIRPS INMET	CHIRPS ERA5	ERA5 INMET	ERA5 ERA5
PBIAS	Estação Chuvosa	18.96	-6.61	47.61	57.77	76.11
	Estação Seca	61.67	-0.80	45.24	63.63	96.08
RMSE	Estação Chuvosa	38.04	18.73	85.69	105.34	135.94
	Estação Seca	6.24	3.99	4.81	8.06	10.46
r	Estação Chuvosa	0.98	0.91	0.89	0.62	0.74
	Estação Seca	1.00	0.96	0.99	0.83	0.50

Segundo Beyene et al. (2024), uma representação espacial aprimorada da precipitação aumenta a precisão das estimativas espaciais de recarga. Os autores também afirmam que a representação espacial da evapotranspiração pode ter um impacto significativo nas estimativas de recarga a longo prazo.

No estudo de González-Ortigoza et al. (2023), a caracterização da distribuição temporal e espacial da recarga de água subterrânea é feita a partir de informações de sensoriamento remoto e dados hidrológicos globais, como o CHIRPS. Os resultados demonstraram que as estimativas de recarga usando esses dados apresentam padrões regionais e taxas semelhantes àquelas observadas em áreas com alta densidade de estações climatológicas terrestres.

CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a viabilidade de utilizar dados de sensoriamento remoto combinados a medições in situ na estimativa da recarga de águas subterrâneas, por meio da aplicação do modelo BALSEQ na Região Metropolitana do Recife. Os resultados indicam que, embora o uso exclusivo de dados reanalisados do ERA5 apresente limitações, principalmente quanto à acurácia das estimativas de precipitação e evapotranspiração, a combinação de produtos como o CHIRPS com dados observados de estações meteorológicas (INMET) demonstrou bom desempenho, com alta correlação e baixos vieses em relação aos dados de referência.

A análise estatística evidenciou que as combinações que utilizaram precipitação do CHIRPS e evapotranspiração do INMET (CHIRPS_INMET), além da combinação ANA ERA5, produziram estimativas de recarga mais próximas das obtidas com o conjunto totalmente observado (ANA_INMET), inclusive em diferentes escalas temporais (mensal, sazonal e anual). Esses

resultados reforçam o potencial da integração de dados de sensoriamento remoto como alternativa viável em áreas com escassez de dados hidrometeorológicos.

Por fim, o estudo destaca a relevância de uma boa representação espacial da precipitação e da evapotranspiração no aprimoramento das estimativas de recarga, alinhando-se a evidências encontradas na literatura (Beyene et al., 2024; González-Ortigoza et al., 2023). A adoção de metodologias que combinem múltiplas fontes de dados pode contribuir significativamente para o planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente em regiões com limitações na rede de monitoramento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à agência de fomento CAPES pelas bolsas de doutorado concedida, proporcionando dessa forma suporte para o desenvolvimento do avanço científico-tecnológico na área do presente estudo.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, R. K.; YILMAZ, A. G.; MAINALI, B.; DYSON, P.; IMTEAZ, M. A. (2022). *"Methods of Groundwater Recharge Estimation under Climate Change: A Review"*. *Sustainability* (Switzerland), 14(23).
- 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.
- ALI, M.; MUBARAK, S. (2017). *"Approaches and Methods of Quantifying Natural Groundwater Recharge – A Review"*. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 5(1), pp. 1–27.
- AYADI, Y.; MOKADEM, N.; KHELIFI, F.; KHALIL, R.; DHAWADI, L.; HAMED, Y. (2024). *"Groundwater potential recharge assessment in Southern Mediterranean basin using GIS and remote sensing tools: case of Khalled-Teboursouk basin, karst aquifer"*. *Applied Geomatics*, 16(3), pp. 677–693.
- BABAEI, M.; KETABCHI, H. (2022). *"Determining Groundwater Recharge Rate with a Distributed Model and Remote Sensing Techniques"*. *Water Resources Management*, 36(14), pp. 5401–5423.
- BELAY, A. S.; FENTA, A. A.; YENEHUN, A.; NIGATE, F.; TILAHUN, S. A.; MOGES, M. M.; DESSIE, M.; ADGO, E.; NYSSEN, J.; CHEN, M.; VAN GRIENSVEN, A.; WALRAEVENS, K. (2019). *"Evaluation and application of multi-source satellite rainfall product CHIRPS to assess spatio-temporal rainfall variability on data-sparse western margins of Ethiopian highlands"*. *Remote Sensing*, 11(22).
- BEYENE, T. D.; ZIMALE, F. A.; GEBREKRISTOS, S. T.; NEDAW, D. (2024). *"Assessment of the impact of rainfall uncertainties on the groundwater recharge estimations of the Tikur-Wuha watershed, rift valley lakes basin, Ethiopia"*. *Heliyon*, 10(2).
- BIERKENS, M. F. P.; WADA, Y. (2019). *"Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: A review"*. *Environmental Research Letters*, 14(6).
- BRITO, G. L. M.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. da S. P.; SANTOS NETO, S. M. dos; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A.; BRAGA, R. A. P.; SILVA FILHO, S. L. da. (2018). *"Characterization of the Capibaribe River Dry Bed with Ground Penetrating Radar (GPR)"*. *Brazilian Journal of Water Resources*, 23(e1).
- BROCCA, L.; MASSARI, C.; PELLARIN, T.; FILIPPUCCI, P.; CIABATTA, L.; CAMICI, S.; KERR, Y. H.; FERNÁNDEZ-PRIETO, D. (2020). *"River flow prediction in data scarce regions: soil*

moisture integrated satellite rainfall products outperform rain gauge observations in West Africa". *Scientific Reports*, 10(1).

CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N. (2021). *"Impact of land use and occupation on potential groundwater recharge in a Brazilian savannah watershed"*. *Water International*, 46(3), pp. 348–364.

COELHO, V. H. R.; MONTENEGRO, S.; ALMEIDA, C. N.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M.; GUSMÃO, A. C. V.; FREITAS, E. S.; MONTENEGRO, A. A. A. (2017). *"Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data"*. *Journal of Hydrology*, 548, pp. 1–15.

DE GRAAF, I. E. M.; GLEESON, T.; (RENS) VAN BEEK, L. P. H.; SUTANUDJAJA, E. H.; BIERKENS, M. F. P. (2019). *"Environmental flow limits to global groundwater pumping"*. *Nature*, 574(7776), pp. 90–94.

FAMIGLIETTI, J. S. (2014). *"The global groundwater crisis"*. *Nature Climate Change*, 4(11), pp. 945–948.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. (2015). *"The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes"*. *Scientific Data*, 2.

GONZÁLEZ-ORTIGOZA, S.; HERNÁNDEZ-ESPRIÚ, A.; ARGINIEGA-ESPARZA, S. (2023). *"Regional modeling of groundwater recharge in the Basin of Mexico: new insights from satellite observations and global data sources"*. *Hydrogeology Journal*, 31(7), pp. 1971–1990.

GORELICK, S. M.; ZHENG, C. (2015). *"Global change and the groundwater management challenge"*. *Water Resources Research*, pp. 3031–3051.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRARAH, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVITA, M.; ... THÉPAUT, J. N. (2020). *"The ERA5 global reanalysis"*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), pp. 1999–2049.

HIDAYAT, D. P. A.; DARSONO, S. L. W.; FARID, M. (2021). *"MODELLING OF POTENTIAL RECHARGE ZONE USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM BASED ON INDONESIA REGULATION AND WATER BALANCE MODEL"*. *International Journal of GEOMATE*, 20(79), pp. 147–154.

HU, K.; AWANGE, J. L.; KHANDU; FOROOTAN, E.; GONCALVES, R. M.; FLEMING, K. (2017). *"Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products"*. *Science of the Total Environment*, 599–600, pp. 372–386.

JASECHKO, S.; PERRONE, D. (2021). *"Global groundwater wells at risk of running dry"*. *Science*, 372(6540), pp. 418–421.

JIMÉNEZ-MARTÍNEZ, J.; LONGUEVERGNE, L.; LE BORGNE, T.; DAVY, P.; RUSSIAN, A.; BOUR, O. (2013). *"Temporal and spatial scaling of hydraulic response to recharge in fractured aquifers: Insights from a frequency domain analysis"*. *Water Resources Research*, 49(5), pp. 3007–3023.

KUMAR, P. J. S.; SCHNEIDER, M.; ELANGO, L. (2022). *"The state-of-the-art estimation of groundwater recharge and water balance with a special emphasis on India: A critical review"*. *Sustainability* (Switzerland), 14(1).

LOBO FERREIRA, J. P. (1981). *"Mathematical model for the evaluation of the recharge of aquifers in semiarid regions with Scarce (Lack) hydrogeological data"*. *EUROPEAN MECHANICS COLLOQUIUM - EUROMECH*, 143.

- MARTINS, T. N.; OLIVEIRA, M. M.; PORTELA, M. M.; LEITÃO, T. E. (2021). "Sensitivity analysis of a simplified precipitation-runoff model to estimate water availability in Southern Portuguese watersheds". *Acque Sotterranei - Italian Journal of Groundwater*, 10(2), pp. 33–47.
- MARTINS, T. N.; OLIVEIRA, M. M.; PORTELA, M. M.; LEITÃO, T. E. (2024). "Assessing climate change impacts on water availability in southern Portugal using a daily sequential soil-water budget model". *Journal of Water and Climate Change*, 15(7), pp. 2899–2917.
- MARTOS-ROSILLO, S.; GONZÁLEZ-RAMÓN, A.; JIMÉNEZ-GAVILÁN, P.; ANDREO, B.; DURÁN, J. J.; MANCERA, E. (2015). "Review on groundwater recharge in carbonate aquifers from SW Mediterranean (Betic Cordillera, S Spain)". *Environmental Earth Sciences*, 74(12), pp. 7571–7581.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007). "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations". *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp. 885–900.
- RASHID, M.; AHMED, S. (2018). "Appraisal of the groundwater balance components from multi-remote sensing datasets in a semi-arid region". *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11).
- SCANLON, B. R.; KEESE, K. E.; FLINT, A. L.; FLINT, L. E.; GAYE, C. B.; EDMUNDS, W. M.; SIMMERS, I. (2006). "Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions". *Hydrological Processes*, 20(15), pp. 3335–3370.
- SCS - SOIL CONSERVATION SERVICE. (1972). Section 4: Hydrology. In *National Engineering Handbook*, p. 127.
- SIEBERT, S.; BURKE, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; HOOGEVEEN, J.; DÖLL, P.; PORTMANN, F. T. (2010). "Groundwater use for irrigation - A global inventory". *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), pp. 1863–1880.
- SILVA, E. C. da. (2018). *Variabilidade espaço-temporal da pluviosidade da Região Metropolitana de Recife* [Tese]. Universidade Federal de Pernambuco.
- SINGH, A.; PANDA, S. N.; UZOKWE, V. N. E.; KRAUSE, P. (2019). "An assessment of groundwater recharge estimation techniques for sustainable resource management". *Groundwater for Sustainable Development*, 9.
- SMERDON, B. D. (2017). "A synopsis of climate change effects on groundwater recharge". *Journal of Hydrology*, 555, pp. 125–128.
- TRABELSI, R.; ABIDA, H. (2024). "Wetland water balance estimation in an arid region using remote sensing technology and hydrological modelling". *Hydrological Sciences Journal*, 69(7), pp. 905–922.
- YANG, L.; WANG, H.; LENG, D.; FANG, S.; YANG, Y.; DU, Y. (2024). "Machine learning applications in nanomaterials: Recent advances and future perspectives". *Chemical Engineering Journal*, 500.
- YENEHUN, A.; NIGATE, F.; BELAY, A. S.; DESTA, M. T.; VAN CAMP, M.; WALRAEVEN, K. (2020). "Groundwater recharge and water table response to changing conditions for aquifers at different physiography: The case of a semi-humid river catchment, northwestern highlands of Ethiopia". *Science of the Total Environment*, 748.