

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SENSORIAMENTO REMOTO E ESTIMATIVA DE RECARGA DE AQUÍFEROS: UMA ANÁLISE ESTRATÉGICA BASEADA NA MATRIZ SWOT

Thaise Suanne Guimarães Ferreira¹ & José Almir Cirilo²

Abstract: The use of remote sensing products has emerged as a promising approach for estimating groundwater recharge, especially in regions with limited observational data. This study aimed to conduct a SWOT analysis to identify the main strengths, weaknesses, opportunities, and threats associated with this methodology. The research was based on a critical review of recent scientific literature on the subject. The results indicate that remote sensing-based methods show good correlation with traditional techniques, in addition to offering broad spatial coverage and replicability across different geographic and climatic contexts. However, limitations related to data resolution, the need for calibration, and sensitivity to input variable errors remain as challenges. Opportunities include technological advancements, integration with hydrological models, and the growing demand for water resource management tools. On the other hand, threats such as data uncertainties, institutional limitations, and the impacts of climate change may compromise operational-scale applications. It is concluded that, despite these challenges, remote sensing represents a strategic tool with significant potential to support groundwater resource management and planning.

Resumo: O uso de produtos de sensoriamento remoto tem se destacado como uma alternativa promissora para a estimativa da recarga de água subterrânea, especialmente em regiões com escassez de dados observacionais. Este estudo teve como objetivo realizar uma análise SWOT para identificar os principais pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças associados a essa abordagem. A metodologia adotada envolveu uma revisão crítica da literatura científica recente sobre o tema. Os resultados indicam que os métodos baseados em sensoriamento remoto apresentam boa correlação com técnicas tradicionais, além de oferecerem ampla cobertura espacial e replicabilidade em diferentes contextos geográficos e climáticos. No entanto, limitações relacionadas à resolução dos dados, necessidade de calibração e sensibilidade a erros nas variáveis de entrada ainda representam desafios. As oportunidades incluem o avanço tecnológico, a integração com modelos hidrológicos e a crescente demanda por ferramentas de gestão dos recursos hídricos. Por outro lado, ameaças como incertezas nos dados, limitações institucionais e os impactos das mudanças climáticas podem comprometer a aplicação em escala operacional. Conclui-se que, apesar dos desafios, o sensoriamento remoto representa uma ferramenta estratégica com grande potencial para apoiar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-Chave – Sensoriamento remoto, recarga de aquíferos, análise SWOT.

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.

INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial das populações urbanas e rurais, escassez de água superficial durante as estações chuvosas, mudanças climáticas, urbanização, desmatamento, degradação da terra e desenvolvimento de irrigação expansiva aumentaram a preocupação sobre a gestão sustentável das águas subterrâneas (Ayenew, 2001; Yu et al., 2020).

Quantificar a recarga é uma etapa fundamental em qualquer estudo sobre a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. No entanto, a recarga é um fenômeno natural complexo, que depende de uma grande variedade de fatores, como intensidade e duração da chuva, condições meteorológicas, características dos tipos e usos do solo, entre outros (Jiménez-Martínez et al., 2013; Scanlon et al., 2006; Smerdon, 2017), que possuem uma variabilidade temporal e espacial relevante para sua quantificação. Sua quantificação varia em ordens de magnitude globalmente, especialmente com a intensificação das mudanças climáticas (Kalu et al., 2024; Vries & Simmers, 2002).

Compreender as variabilidades espacial e temporais dos componentes do balanço hídrico é fundamental para a gestão eficiente, equitativa e sustentável das águas subterrâneas (Gebremeskel & Kebede, 2017). Entretanto, estimar a recarga é uma tarefa difícil, pois não pode ser medida diretamente e é altamente influenciada por medições imprecisas e uso indevido de suposições (Adhikari et al., 2022; Kumar et al., 2022; Martos-Rosillo et al., 2015).

Nos últimos anos, tecnologias inovadoras, como o sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica (SIG), têm desempenhado um papel fundamental no fornecimento de informações para a gestão de recursos hídricos (Coelho et al., 2017). O uso de dados de sensoriamento remoto é vantajoso devido à ampla cobertura espacial, acesso gratuito e quase em tempo real, possibilitando o monitoramento contínuo das águas subterrâneas em diferentes escalas (Ahamed et al., 2022).

O sensoriamento remoto associado às técnicas de geoprocessamento tem revelado alternativas para o monitoramento de aquíferos com aspectos mais favoráveis em relação a custos operacionais, velocidade de processamento, continuidade e escopo em grande escala espacial e temporal (Baalousha et al., 2018; Crosbie et al., 2015; Li et al., 2019).

Alguns componentes do balanço hídrico, como a precipitação e a evapotranspiração, essenciais para estimativa da recarga, podem ser obtidos através de produtos de sensoriamento remoto. E essas bases de dados podem ser utilizadas como dados de entrada para os diversos métodos existentes de estimativa de recarga, além de possibilitar o surgimento de novas metodologias.

O objetivo deste artigo é apresentar uma perspectiva baseada na aplicação da Matriz SWOT sobre o uso de produtos de sensoriamento remoto na estimativa da recarga de água subterrânea, a partir da análise crítica de estudos existentes na área.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo consistiu na aplicação da análise SWOT com o objetivo de avaliar, de forma sistemática e estruturada, as vantagens e desvantagens associadas ao uso de produtos de sensoriamento remoto na estimativa da recarga de água subterrânea. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, contemplando artigos científicos em inglês disponíveis em bases de dados *Scopus* e *Web of Science*.

O processo de seleção das fontes considerou estudos que abordassem diretamente a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de recarga de aquíferos, bem como trabalhos que discutissem os desafios, limitações, oportunidades e avanços tecnológicos relacionados ao tema. As informações extraídas dos estudos selecionados foram organizadas e categorizadas de acordo com os quatro quadrantes da análise SWOT: Forças (*Strengths*), Fraquezas (*Weaknesses*), Oportunidades (*Opportunities*) e Ameaças (*Threats*).

A análise SWOT consiste em uma ferramenta de gestão estratégica que permite classificar informações sobre o objeto de pesquisa em quatro grupos distintos e identificar as inter-relações entre os elementos atribuídos a cada grupo. Segundo Kordana et al. (2019), os pontos fortes permitem que novas oportunidades sejam aproveitadas e que possíveis ameaças sejam superadas. Por outro lado, os pontos fracos aumentam os riscos e podem impedir a obtenção de benefícios advindos de condições favoráveis de desenvolvimento (Gürel & Tat, 2011). Nesse contexto, as forças e fraquezas foram consideradas como fatores internos, refletindo as características intrínsecas das metodologias, ferramentas e dados disponíveis na área de sensoriamento remoto aplicado aos recursos hídricos subterrâneos. Já as oportunidades e ameaças foram analisadas como fatores externos, relacionados ao ambiente tecnológico, institucional, socioeconômico e ambiental.

A classificação dos elementos seguiu os seguintes critérios:

- **Forças (*Strengths*):** Aspectos positivos internos ao uso do sensoriamento remoto, como a ampla cobertura espacial, a capacidade de monitoramento em diferentes escalas e a redução de custos em comparação a métodos tradicionais.
- **Fraquezas (*Weaknesses*):** Limitações internas, como a necessidade de validação em campo, possíveis incertezas nos dados gerados, limitações na resolução espacial e temporal de alguns sensores, além de dificuldades no processamento e interpretação de grandes volumes de dados.
- **Oportunidades (*Opportunities*):** Condições externas favoráveis, como os avanços tecnológicos em sensores e plataformas orbitais, a ampliação do acesso a dados gratuitos de alta qualidade e o crescente interesse por soluções integradas para a gestão de recursos hídricos.
- **Ameaças (*Threats*):** Fatores externos que podem dificultar ou limitar a aplicação das metodologias, incluindo restrições orçamentárias, falta de capacitação técnica, desafios institucionais e os impactos das mudanças climáticas sobre os processos hidrológicos.

Por meio dessa abordagem metodológica, buscou-se sintetizar de forma crítica e sistematizada os principais fatores que influenciam o uso de produtos de sensoriamento remoto para a estimativa da recarga de aquíferos, apontando tanto as potencialidades quanto as limitações observadas na literatura especializada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Matriz SWOT apresenta-se como um recurso eficaz para organizar e visualizar de forma clara os diferentes aspectos que influenciam o uso de produtos de sensoriamento remoto na estimativa da recarga de aquíferos. Ao agrupar os fatores em categorias específicas, essa ferramenta facilita a identificação de elementos que podem ser explorados estrategicamente, bem como aqueles que demandam atenção para superar desafios.

Na Figura 1, é possível observar a síntese dos principais pontos levantados neste estudo, distribuídos entre forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Essa representação visual permite uma

compreensão integrada das condições que permeiam o tema, servindo como base para a discussão detalhada dos resultados a seguir.

Figura 1 – Matriz SWOT aplicada à análise do uso de sensoriamento remoto na estimativa da recarga de aquíferos.



A análise SWOT realizada evidencia que o uso de produtos de sensoriamento remoto para a estimativa da recarga de água subterrânea apresenta um cenário promissor, porém, ainda cercado por desafios técnicos e institucionais que precisam ser considerados para a consolidação dessa abordagem como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos.

Entre os pontos fortes (*Strengths*), destaca-se a capacidade do sensoriamento remoto em fornecer estimativas confiáveis de recarga quando comparado aos métodos tradicionais, como apontado por Belay et al. (2024) Lucas et al. (2015). Essa boa correlação entre as metodologias reforça a confiabilidade dos dados gerados por satélites. Além disso, a possibilidade de trabalhar com alta resolução espacial e em grandes áreas, incluindo regiões remotas com escassez de dados in situ, representa um ganho significativo para o monitoramento hídrico em escalas regionais e nacionais (Fallatah et al., 2019; Szilagyi & Jozsa, 2013). Outro aspecto relevante é a replicabilidade das metodologias, que permite a aplicação dos modelos em diferentes condições climáticas e geográficas (Santarosa et al., 2024), bem como a integração de diferentes produtos e modelos para reduzir incertezas, favorecendo a melhoria contínua da acurácia das estimativas (Barbosa et al., 2023; Yang et al., 2024).

No entanto, algumas fraquezas (*Weaknesses*) ainda limitam o desempenho e a confiabilidade das estimativas. A subestimação ou superestimação das taxas de recarga, diretamente associada à resolução espacial dos produtos de sensoriamento remoto, é um fator que pode comprometer a precisão dos resultados, especialmente em bacias de pequeno porte ou áreas com elevada heterogeneidade do solo e cobertura vegetal (Coelho et al., 2017; Shu et al., 2018). Além disso, a sensibilidade dos modelos aos erros de entrada de dados, como evapotranspiração e precipitação, é uma preocupação recorrente, conforme apontado por Münch et al. (2013) e Zhang et al. (2020). Tais

limitações reforçam a necessidade de calibração e validação dos modelos com dados de campo, como destacado por Knoche et al. (2014), o que, por sua vez, exige infraestrutura e investimento em monitoramento hidrológico local.

No campo das oportunidades (*Opportunities*), observa-se uma tendência crescente de desenvolvimento de novas técnicas que integram diferentes sensores e modelos hidrológicos, visando maior precisão nas estimativas de recarga (Barbosa et al., 2022; Githui et al., 2012). Essa evolução tecnológica abre caminhos especialmente para regiões semiáridas e com escassez de dados locais, como o Semiárido brasileiro, onde a gestão eficiente da água subterrânea é estratégica para a segurança hídrica (Coelho et al., 2017; Santarosa et al., 2024). Além disso, a combinação entre dados de sensoriamento remoto e métodos tradicionais pode representar um avanço importante na calibração de modelos, melhorando a robustez dos resultados (Belay et al., 2024; González-Ortigoza et al., 2023). Outro destaque é a expansão de missões espaciais, como o GRACE, que vem ampliando o acesso a dados globais de monitoramento das águas subterrâneas (Barbosa et al., 2022; Fallatah et al., 2019), o que pode beneficiar principalmente países em desenvolvimento.

Por outro lado, as ameaças (*Threats*) identificadas indicam que incertezas inerentes à resolução espacial e temporal dos dados de sensoriamento remoto ainda podem comprometer o uso desses produtos em aplicações que demandam alta precisão, como o planejamento hídrico (Shu et al., 2018; Zhang et al., 2020). Além disso, inconsistências nos dados de satélite, resultantes de falhas nos sensores, variações nos algoritmos de processamento ou até o encerramento de missões espaciais, podem afetar a continuidade dos estudos (Knoche et al., 2014; Münch et al., 2013). Outro aspecto preocupante é a necessidade constante de atualização dos modelos, considerando as mudanças climáticas e seus impactos sobre os padrões hidrológicos (Yang et al., 2024). Por fim, destaca-se o desafio da aceitação institucional desses dados, sobretudo em processos de formulação de políticas públicas para gestão das águas subterrâneas, onde ainda há resistência quanto à adoção de dados derivados de sensoriamento remoto como base para tomadas de decisão (Santarosa et al., 2021).

De maneira geral, os resultados da análise SWOT sugerem que, apesar das limitações e incertezas, o uso de produtos de sensoriamento remoto apresenta-se como uma ferramenta estratégica, com elevado potencial de aplicação em escala regional e global, especialmente quando aliado a métodos tradicionais e com esforços contínuos de calibração, validação e aprimoramento tecnológico.

CONCLUSÕES

A análise realizada neste estudo, com base na Matriz SWOT, permitiu identificar de forma sistemática os principais pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionados ao uso de produtos de sensoriamento remoto para a estimativa da recarga de água subterrânea. Os resultados evidenciam que essa abordagem apresenta grande potencial para ampliar o conhecimento sobre os processos de recarga, especialmente em regiões com escassez de dados de campo, como é o caso de áreas semiáridas.

Os pontos fortes observados, como a ampla cobertura espacial, a replicabilidade em diferentes contextos climáticos e a possibilidade de integração entre diferentes fontes de dados e modelos, reforçam a importância do sensoriamento remoto como uma ferramenta de suporte à gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Por outro lado, as fraquezas, como as incertezas associadas à resolução espacial e à qualidade dos dados de entrada, apontam para a necessidade de calibração constante e validação com dados observados para aumentar a confiabilidade dos resultados.

As oportunidades sinalizam um cenário favorável, com o desenvolvimento de novas tecnologias, a expansão de missões espaciais e a crescente demanda por soluções integradas de gestão hídrica, principalmente em contextos de vulnerabilidade socioambiental. No entanto, as ameaças,

como as limitações institucionais, a disponibilidade e continuidade dos dados de satélite, além das mudanças climáticas, ressaltam a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa, capacitação e infraestrutura tecnológica.

Diante desse panorama, conclui-se que, para maximizar os benefícios do uso de sensoriamento remoto na estimativa da recarga de aquíferos, é essencial o desenvolvimento de estratégias integradas, que considerem tanto os avanços tecnológicos quanto as limitações operacionais e institucionais. A combinação de diferentes fontes de dados, aliada a esforços de validação em campo e ao fortalecimento das políticas públicas de gestão de recursos hídricos, representa um caminho promissor para ampliar a eficácia e a aplicabilidade dessas metodologias no contexto brasileiro e internacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à agência de fomento CAPES pelas bolsa 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.
- AYENEW, T. (2001). “*Numerical groundwater flow modeling of the central main Ethiopian rift lakes basin*”. *Ethiop. J. Sci.*, 24(2), pp. 167–184.
- BAALOUSHA, H. M.; BARTH, N.; RAMASOMANANA, F. H.; AHZI, S. (2018). “*Groundwater recharge estimation and its spatial distribution in arid regions using GIS: a case study from Qatar karst aquifer*”. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(4), pp. 1319–1329.
- BARBOSA, S. A.; JONES, N. L.; WILLIAMS, G. P.; MAMANE, B.; BEGOU, J.; NELSON, E. J.; AMES, D. P. (2023). “*Exploiting Earth observations to enable groundwater modeling in the data-sparse region of Goulbi Maradi, Niger*”. *Remote Sensing*, 15(21).
- BARBOSA, S. A.; PULLA, S. T.; WILLIAMS, G. P.; JONES, N. L.; MAMANE, B.; SANCHEZ, J. L. (2022). “*Evaluating groundwater storage change and recharge using GRACE data: a case study of aquifers in Niger, West Africa*”. *Remote Sensing*, 14(7).
- BELAY, A. S.; YENEHUN, A.; NIGATE, F.; TILAHUN, S. A.; DESSIE, M.; MOGES, M. M.; CHEN, M.; FENTIE, D.; ADGO, E.; NYSSEN, J.; WALRAEVENS, K. (2024). “*Estimation of spatially distributed groundwater recharge in data-scarce regions*”. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56.

- 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.
- CROSBIE, R. S.; DAVIES, P.; HARRINGTON, N.; LAMONTAGNE, S. (2015). "Ground truthing groundwater-recharge estimates derived from remotely sensed evapotranspiration: a case in South Australia". *Hydrogeology Journal*, 23(2), pp. 335–350.
- FALLATAH, O. A.; AHMED, M.; CARDACE, D.; BOVING, T.; AKANDA, A. S. (2019). "Assessment of modern recharge to arid region aquifers using an integrated geophysical, geochemical, and remote sensing approach". *Journal of Hydrology*, 569, pp. 600–611.
- GEBREMESKEL, G.; KEBEDE, A. (2017). "Spatial estimation of long-term seasonal and annual groundwater resources: application of WetSpass model in the Werri watershed of the Tekeze River Basin, Ethiopia". *Physical Geography*, 38(4), pp. 338–359.
- GITHUI, F.; SELLE, B.; THAYALAKUMARAN, T. (2012). "Recharge estimation using remotely sensed evapotranspiration in an irrigated catchment in southeast Australia". *Hydrological Processes*, 26(9), pp. 1379–1389.
- 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.
- GÜREL, E.; TAT, M. (2011). "SWOT analysis: A theoretical review". *The Journal of International Social Research*, 4(19), pp. 346–370. Disponível em: www.sosyalarastirmalar.com.
- 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.
- KALU, I.; NDEHEDEHE, C. E.; FERREIRA, V. G.; JANARDHANAN, S.; CURRELL, M.; CROSBIE, R. S.; KENNARD, M. J. (2024). "Remote sensing estimation of shallow and deep aquifer response to precipitation-based recharge through downscaling". *Water Resources Research*, 60(12).
- KNOCHE, M.; FISCHER, C.; POHL, E.; KRAUSE, P.; MERZ, R. (2014). "Combined uncertainty of hydrological model complexity and satellite-based forcing data evaluated in two data-scarce semi-arid catchments in Ethiopia". *Journal of Hydrology*, 519, pp. 2049–2066.
- KORDANA, S.; POCHWAT, K.; SŁYŚ, D.; STARZEC, M. (2019). "Opportunities and threats of implementing drain water heat recovery units in Poland". *Resources*, 8(2).
- 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).
- LI, B. et al. (2019). "Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: Advances and challenges". *Water Resources Research*, 55(9), pp. 7564–7586.

- LUCAS, M.; OLIVEIRA, P. T. S.; MELO, D. C. D.; WENDLAND, E. (2015). “Evaluation of remotely sensed data for estimating recharge to an outcrop zone of the Guarani Aquifer System (South America)”. *Hydrogeology Journal*, 23(5), pp. 961–969.
- 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.
- MÜNCH, Z.; CONRAD, J. E.; GIBSON, L. A.; PALMER, A. R.; HUGHES, D. (2013). “Satellite earth observation as a tool to conceptualize hydrogeological fluxes in the Sandveld, South Africa”. *Hydrogeology Journal*, 21(5), pp. 1053–1070.
- SANTAROSA, L. V.; GASTMANS, D.; SITOLINI, T. P.; KIRCHHEIM, R. E.; BETANCUR, S. B.; DE OLIVEIRA, M. E. D.; CAMPOS, J. C. V.; MANZIONE, R. L. (2021). “Assessment of groundwater recharge along the Guarani aquifer system outcrop zone in São Paulo State (Brazil): an important tool towards integrated management”. *Environmental Earth Sciences*, 80(3).
- SANTAROSA, L. V.; PINTO, G. V. F.; BLANDÓN LUENGAS, J. S.; GASTMANS, D. (2024). “Remote sensing to quantify potential aquifer recharge as a complementary tool for groundwater monitoring”. *Hydrological Sciences Journal*.
- 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.
- SHU, Y.; LI, H.; LEI, Y. (2018). “Modelling groundwater flow with MIKE SHE using conventional climate data and satellite data as model forcing in Haihe Plain, China”. *Water (Switzerland)*, 10(10).
- SMERDON, B. D. (2017). “A synopsis of climate change effects on groundwater recharge”. *Journal of Hydrology*, 555, pp. 125–128.
- SZILAGYI, J.; JOZSA, J. (2013). “MODIS-aided statewide net groundwater-recharge estimation in Nebraska”. *Groundwater*, 51(5), pp. 735–744.
- VRIES, J. J. de; SIMMERS, I. (2002). “Groundwater recharge: An overview of process and challenges”. *Hydrogeology Journal*, 10(1), pp. 5–17.
- 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.
- YU, Z.; YANG, K.; LUO, Y.; SHANG, C. (2020). “Spatial-temporal process simulation and prediction of chlorophyll-a concentration in Dianchi Lake based on wavelet analysis and long-short term memory network”. *Journal of Hydrology*, 582.
- ZHANG, L.; XIN, Z.; ZHOU, H. (2020). “Assessment of TMPA 3B42V7 and PERSIANN-CDR in driving hydrological modeling in a semi-humid watershed in northeastern China”. *Remote Sensing*, 12(19).