

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **ABORDAGENS MULTICRITÉRIO APLICADAS À SEGURANÇA HÍDRICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

*APOLINÁRIO<sup>1</sup>, Andressa Ellen Silva; SILVA<sup>2</sup>, Wesley Douglas de Oliveira; SILVA<sup>3</sup>, Risomário Willams da; LIMA<sup>4</sup>, Marcos dos Santos de; SILVA<sup>5</sup>, Manoel Mariano Neto da; Morais<sup>6</sup>, Alysson Matheus Pimentel de; PEDRO<sup>7</sup>, Hemmylly Cawanne Alves; BELARMINO<sup>8</sup>, Hugo Leonardo; SANTOS<sup>9</sup>, Maria Débora Valério*

**Abstract:** This study conducts a systematic literature review on the application of multi-criteria decision analysis (MCDA) methods in the assessment of water security. The review is based on 112 peer-reviewed articles retrieved from indexed scientific databases, using rigorous selection criteria. Six research questions were analyzed, related to the evolution of the field, areas of application, employed techniques, mathematical modeling, use of geospatial tools (GIS), and the criteria adopted in decision-making. The results indicate a significant increase in publications since 2018, with particular emphasis on AHP, PROMETHEE, and fuzzy approaches. Applications span multiple dimensions of water security, with strong integration between MCDA and GIS. Bibliometric analysis identified three thematic clusters, although a low density of collaboration among authors is still observed. Most studies are concentrated in Asia, followed by the Americas and Europe. It is concluded that MCDA approaches offer relevant support for decision-making in complex contexts, though greater standardization and interdisciplinary integration are needed to address the emerging challenges of water security.

**Resumo:** O presente estudo realiza uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação de métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA) na avaliação da segurança hídrica. A revisão baseia-se em 112 artigos revisados por pares, extraídos de bases científicas indexadas, utilizando critérios rigorosos de seleção. Foram analisadas seis questões de pesquisa relacionadas à evolução do campo, áreas de aplicação, técnicas empregadas, modelagem matemática, uso de ferramentas geoespaciais (GIS) e critérios adotados nas decisões. Os resultados indicam uma expansão significativa das publicações a partir de 2018, com destaque para os métodos AHP, PROMETHEE e abordagens fuzzy. As aplicações abrangem diversas dimensões da segurança hídrica, com forte integração entre MCDA e GIS. A análise bibliométrica identificou três *clusters* temáticos, embora ainda se observe baixa densidade de colaboração entre autores. A maioria dos estudos se concentra na Ásia, seguida pelas Américas e Europa. Conclui-se que as abordagens MCDA oferecem suporte relevante à tomada de decisão em contextos complexos, mas há necessidade de maior padronização e integração interdisciplinar para enfrentar os desafios emergentes da segurança hídrica.

**Palavras-chave:** Segurança hídrica; Decisão multicritério; Revisão sistemática.

1) Afiliação: Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC/UFAL), andressaelenadm@hotmail.com

2) Afiliação: Professor do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC-UFAL), wesley.silva@ceca.ufal.br;

3) Afiliação: Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Economia (UFPE), risomario.williams@ufpe.br;

4) Afiliação: Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC/UFAL), markos.eng.producao.sq@gmail.com;

5) Afiliação: Professor do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC/UFAL), manoel.mariano@ctec.ufal.br;

6) Afiliação: Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC/UFAL), alysson.morais@ctec.ufal.br;

7) Afiliação: Graduanda em Engenharia de Produção (UFAL – Penedo), hemmylly.pedro@arapiraca.ufal.br;

8) Afiliação: Graduado em Engenharia de Produção (UNICAP), belarmino hugo leonardo@hotmail.com;

9) Afiliação: Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária (CTEC/UFAL), maria.valerio@ctec.ufal.br.

## INTRODUÇÃO

A desigualdade no acesso à água, intensificada pelas mudanças climáticas, urbanização, crescimento populacional e uso insustentável dos recursos hídricos (Gain; Giupponi; Wada, 2016), além das variabilidades espaciais e temporais do ciclo hidrológico (Ortiz-Partida *et al.*, 2023), tem ampliado os desafios associados à segurança hídrica global. Nesse cenário, a tomada de decisão torna-se complexa, uma vez que segurança hídrica envolve a interconexão entre múltiplos critérios sociais, ambientais, econômicos e técnicos (Mukherjee *et al.*, 2022).

Embora seja vinculada à melhoria do acesso à alimentação, energia e aos direitos humanos básicos (McNally *et al.*, 2019), a segurança hídrica e, por consequência, o alcance do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, ainda apresenta avanços limitados e insuficientes (Sandhu *et al.*, 2024). Assim, as metodologias de apoio à decisão multicritério (MCDA, na sigla em inglês) têm sido cada vez mais adotadas em estudos voltados à segurança hídrica (Octavianti; Staddon, 2021).

A literatura que aborda a aplicação de abordagens multicritérios no campo da segurança hídrica é ampla e heterogênea. Contudo, observa-se a ausência de uma sistematização quanto às áreas de aplicação, aos métodos utilizados, aos critérios considerados e ao uso de ferramentas geoespaciais como suporte à análise. Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a adoção de métodos MCDA à segurança hídrica, sintetizando os avanços científicos, as lacunas existentes e as tendências emergentes desse campo de estudo.

## METODOLOGIA

A elaboração deste estudo seguiu as diretrizes metodológicas propostas por Galvão e Pereira (2014), que estabelecem um protocolo estruturado para revisões sistemáticas. A revisão foi guiada pelas seguintes **questões de pesquisa (QP)**:

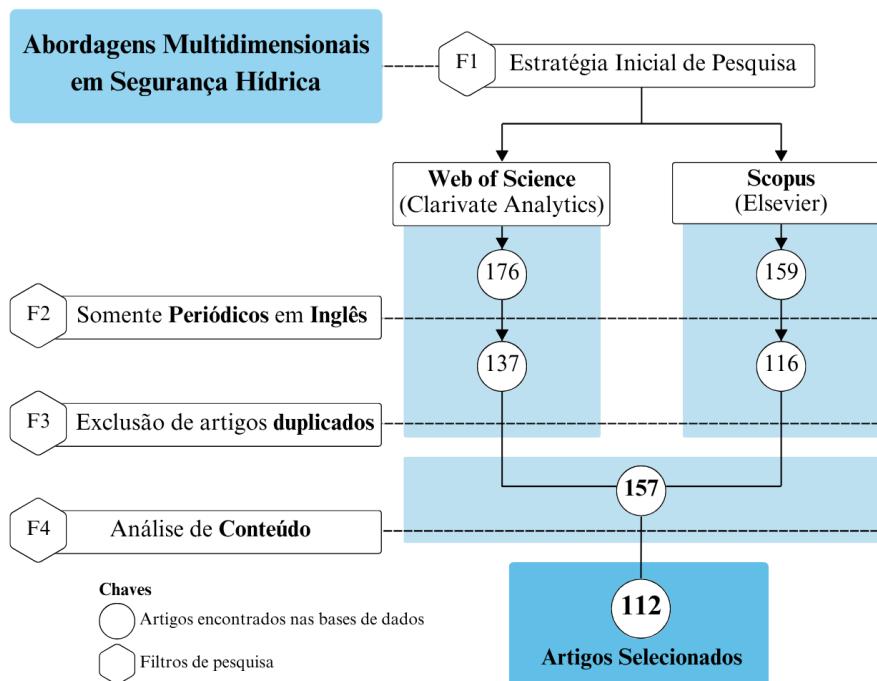
- **QP1:** Como os modelos de decisão multicritério aplicados à segurança hídrica evoluíram em termos do interesse demonstrado por acadêmicos e pela comunidade?
- **QP2:** Em quais áreas de pesquisa e campos do conhecimento essas abordagens são mais aplicadas para avaliar a segurança hídrica?
- **QP3:** Que abordagens multicritério e problemas de decisão são mais frequentemente utilizados para avaliar a segurança hídrica?
- **QP4:** Como os artigos modelam matematicamente a segurança hídrica nos problemas de decisão?
- **QP5:** Como as ferramentas GIS contribuem para a tomada de melhores decisões e, assim, para a avaliação da segurança hídrica?
- **QP6:** Quais critérios, indicadores e outros parâmetros foram levados em consideração na justificativa das decisões sobre segurança hídrica?

As buscas foram realizadas em bases científicas revisadas por pares, com a seguinte expressão: ("multicriteria" OR "multi-criteria" OR "multiattribute" OR "multi-attribute" OR "multi-criteria decision making" OR "multi-criteria analysis" OR "multi-attribute decision making" OR "decision support" AND "water security" OR "water safety").

Após refinamento iterativo dos termos, 112 artigos foram selecionados conforme critérios de inclusão (relevância temática, aplicação de MCDA e foco em segurança hídrica), com exclusão de 97 duplicatas. Os dados foram extraídos e analisados por meio de ferramentas bibliométricas e de

conteúdo, com apoio do *software* VOSviewer. O fluxograma de aplicação das estratégias de busca é apresentado na Figura 1:

Figura 1 - Fluxograma das estratégias de busca para seleção de artigos

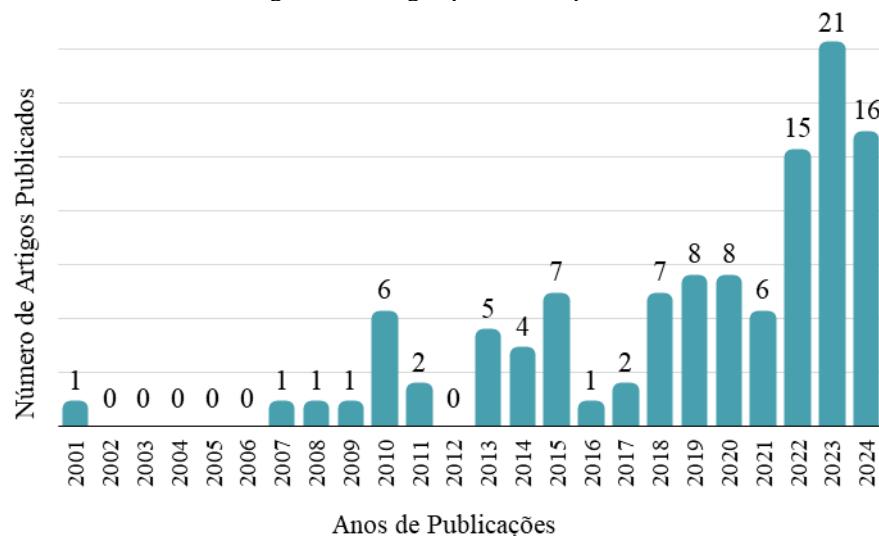


## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Evolução da Produção Científica (QP1)

Os resultados demonstram que o interesse por métodos MCDA aplicados à segurança hídrica teve início em 2001, com crescimento a partir de 2018 (Figura 2). Nenhum artigo sobre abordagens multidimensionais em segurança hídrica foi identificado antes de 2001, o que sugere que o foco nesse tema é relativamente recente, com um aumento acentuado na produção acadêmica entre 2022 e 2024. Essa tendência é semelhante à observada em outras pesquisas de revisão sobre problemas decisórios relacionados à água, como alocação (Gebre *et al.*, 2021) e riscos de inundação (da Silva *et al.*, 2020).

Figura 2 – Artigos publicados por ano



## Áreas de Aplicação e Campos do Conhecimento (QP2)

As aplicações de MCDA concentram-se em oito categorias principais: águas subterrâneas, qualidade da água, gestão de recursos, indicadores, abastecimento, mudanças climáticas, alocação de água e análise de risco. A combinação de MCDA com GIS é particularmente recorrente no mapeamento de zonas potenciais de recarga (Verma *et al.*, 2020; Abdekareem *et al.*, 2022).

Em estudos sobre qualidade da água, abordagens híbridas como AHP-fuzzy-SWOT são aplicadas na avaliação de impactos da mineração (Nti *et al.*, 2023) e na priorização de estratégias de tratamento (Gokcekus *et al.*, 2020).

## Abordagens e Problemas de Decisão (QP3)

As técnicas mais utilizadas são o AHP, PROMETHEE, *fuzzy logic* e otimização multiobjetivo. Os principais problemas enfrentados envolvem a priorização de riscos, escolha de dispositivos, identificação de áreas críticas e distribuição equitativa da água (Garcia-Bartolomei *et al.*, 2022; Marcellin *et al.*, 2024). O uso do AHP em conjunto com o método Delphi *fuzzy* foi empregado, por exemplo, na construção de indicadores urbanos de sustentabilidade hídrica (Namavar *et al.*, 2023), demonstrando a flexibilidade dessas ferramentas.

## Modelagem Matemática (QP4)

Diversos estudos têm empregado modelagem matemática para simular cenários e otimizar a alocação de recursos, como demonstrado por Roman *et al.* (2021) e Zhou *et al.* (2023), que desenvolveram modelos em mesoescala baseados em redes de *backbone*. Essas abordagens permitem representar a realidade física dos sistemas de abastecimento, mesmo diante de limitações estruturais ou de disponibilidade de dados.

A modelagem matemática voltada à segurança hídrica em problemas de decisão envolve a integração de múltiplos critérios e indicadores, por meio de técnicas como a otimização multiobjetivo e a análise de cenários. Esses modelos buscam equilibrar os *trade-offs* entre diferentes objetivos, como o acesso equitativo à água e a sustentabilidade ambiental.

## Contribuição das Ferramentas GIS (QP5)

O uso de GIS em associação com MCDA permite análises espaciais detalhadas, como a identificação de áreas vulneráveis a eventos climáticos extremos ou à escassez hídrica (Tiwari *et al.*, 2024). Além disso, auxilia na visualização de indicadores e na definição de áreas prioritárias para intervenção (Liang *et al.*, 2022).

Nos estudos relacionados às águas subterrâneas, a utilização do GIS combinada com AHP é frequentemente evidenciada, sendo integrada a dados obtidos por sensoriamento remoto, como hidrogeomorfologia e modelos de elevação digital (DEM). Essa abordagem é aplicada no mapeamento da Zona Potencial de Recarga de Águas Subterrâneas (GWRPZ), como ilustrado nos artigos de Verma *et al.* (2020) e Abdekareem *et al.* (2022), que demonstram o uso dessa metodologia em escala de bacia hidrográfica. No entanto, Abdekareem *et al.* (2022) apontam uma limitação na metodologia, que se restringe a consideração apenas das características físicas dos parâmetros utilizados, sem levar em conta outros fatores relevantes.

## Critérios e Indicadores nas Decisões (QP6)

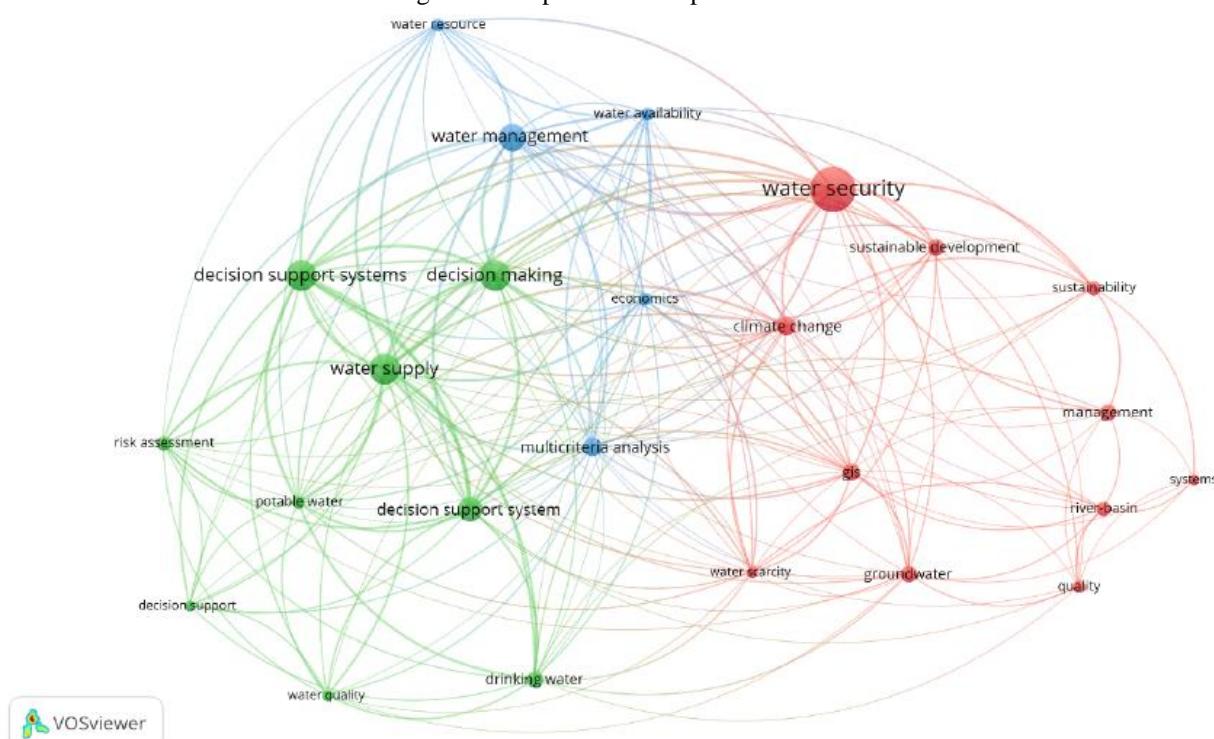
Os critérios mais comuns nos modelos incluem: qualidade da água, disponibilidade hídrica, acessibilidade, risco de contaminação e impactos sociais e econômicos (Gain *et al.*, 2016; Babel *et al.*, 2023). A ponderação desses critérios varia conforme o contexto: enquanto fatores financeiros

foram priorizados em contextos urbanos (Parween; Sinha, 2024), critérios ambientais ganharam destaque em regiões costeiras (Cetinkaya; Gunacti, 2018).

### Análise Bibliométrica

A análise de coautoria revelou 489 autores, com apenas 31 tendo duas publicações. Três principais *clusters* de pesquisa foram identificados, conforme Figura 3:

Figura 3 - Mapa de rede de palavras-chave em *clusters*



- O *cluster* verde abrange artigos que utilizam métodos de suporte a decisão multicritério para avaliar a segurança hídrica no contexto do abastecimento de água, com foco em termos como "água potável", "qualidade da água" e "avaliação de risco".
- O *cluster* azul destaca artigos que modelam os problemas de decisão sobre segurança hídrica sob a ótica econômica e de gestão de recursos, como "quantidade de água" e "gestão de recursos hídricos".
- O *cluster* vermelho foca em artigos que utilizam o conceito mais abrangente da segurança hídrica, com ênfase em termos como "desenvolvimento sustentável", "sustentabilidade", "bacia hidrográfica", além de "mudanças climáticas", "escassez hídrica" e "GIS".

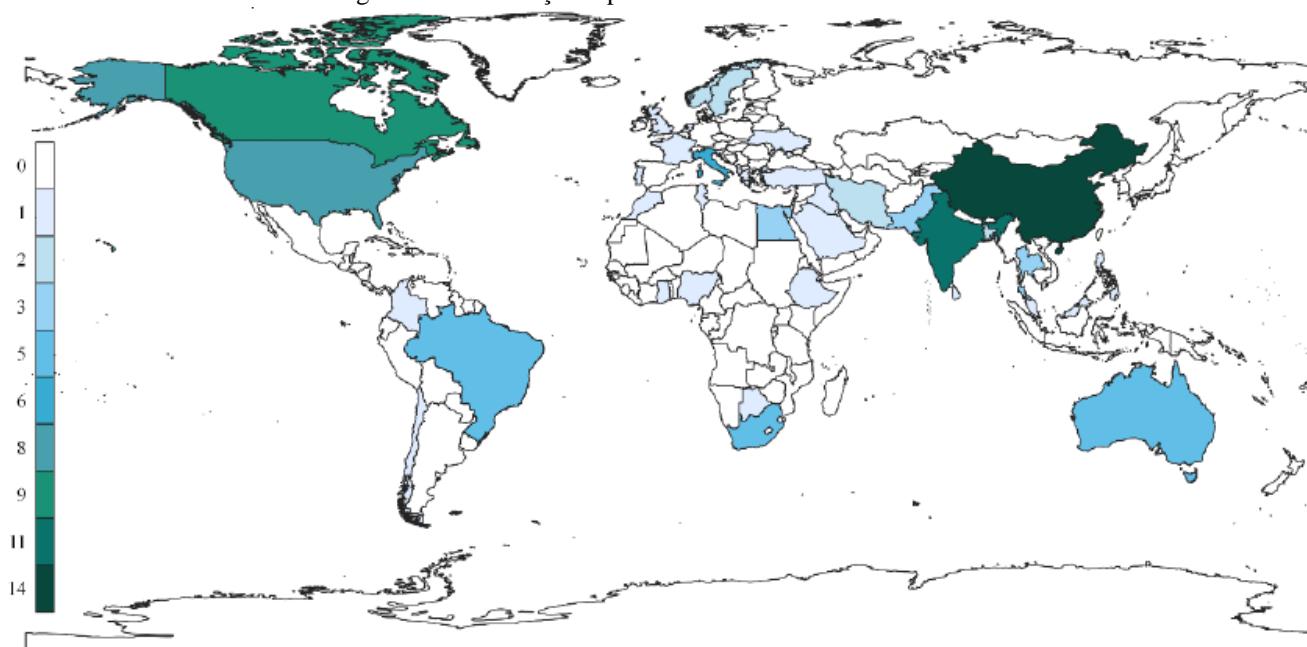
A dispersão autoral sugere que, apesar do aumento do interesse, ainda não há uma rede internacional consolidada de colaboração. Dos 489 autores identificados, poucos possuem colaborações recorrentes. A maior parte das publicações é isolada, indicando potencial para expansão de redes colaborativas internacionais. A análise de palavras-chave mostra fragmentação na terminologia, o que pode prejudicar a precisão das análises temáticas.

### Distribuição Geográfica dos Estudos

A análise geoespacial, conforme Figura 4, indica que a Ásia concentra o maior número de estudos de caso (41), representando 38,0% do total. Isso pode refletir a importância da gestão de recursos hídricos em países populosos e em desenvolvimento, como China, 14 estudos (13,3% do

total), e Índia, 11 estudos (10,5% do total). As Américas somam 25 estudos, com destaque para Canadá (9) e Estados Unidos (8), indicando um interesse significativo em pesquisas sobre abordagens multicritério e segurança hídrica nesses países.

Figura 4 - Distribuição espacial dos estudos de caso em todo o mundo



Em contrapartida, há dispersão em muitos países: 22 países têm apenas 1 estudo de caso cada, representando 21,0% do total. Isso sugere que a pesquisa sobre o tema está amplamente distribuída, mas com foco limitado em muitos locais. Outrossim, estudos de múltiplos casos, como em Smeets (2019), permitem que os achados sejam comparados, que paralelos sejam traçados e que as diferenças em contextos culturais, ambientais e governamentais diversos sejam examinadas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão sistemática revelou que as abordagens multicritério vêm sendo amplamente utilizadas na avaliação da segurança hídrica, especialmente diante de sua capacidade de integrar critérios diversos em contextos incertos. O campo apresenta crescimento recente e significativo, com aplicações em diferentes dimensões da segurança hídrica. No entanto, observam-se fragilidades na padronização terminológica e na articulação entre pesquisadores. Há carência de estudos empíricos em alguns contextos e de modelos que incorporem, de forma integrada, dimensões como risco de desastres naturais, impactos sociais e resiliência climática.

O fortalecimento de redes de colaboração científica, aliado ao avanço das ferramentas geoespaciais e à incorporação de dados em tempo real, é essencial para que as abordagens MCDA se consolidem como suporte decisório eficaz no enfrentamento dos desafios da segurança hídrica.

## REFERÊNCIAS

- ABDEKAREEM, M.; AL-ARIFI, N.; ABDALLA, F.; MANSOUR, A.; EL-BAZ, F. (2022). "Fusion of Remote Sensing Data Using GIS-Based AHP-Weighted Overlay Techniques for Groundwater Sustainability in Arid Regions". *Sustainability*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137871>

BABEL, M. S.; CHAPAGAIN, K.; SHINDE, V. R. (2023). "How to measure urban water security? An introduction to the Water Security Assessment Tool (WATSAT)". *APN Science Bulletin*, 2023(13), pp. 60–75. <https://doi.org/10.30852/sb.2023.2166>

CETINKAYA, C. P.; GUNACTI, M. C. (2018). "Multi-Criteria Analysis of Water Allocation Scenarios in a Water Scarce Basin". *Water Resources Management*, 32(8), pp. 2867–2884. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1963-z>

DA SILVA, ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. (2020). "Multidimensional flood risk management under climate changes: Bibliometric analysis, trends and strategic guidelines for decision-making in urban dynamics". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101865. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101865>

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. (2014). "Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração". *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 23, pp. 183–184. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742014000100018>

GAIN, A. K.; GIUPPONI, C.; WADA, Y. (2016). "Measuring global water security towards sustainable development goals". *Environmental Research Letters*, 11(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>

GARCIA-BARTOLOMEI, E.; VASQUEZ, V.; REBOLLEDO, G.; VIVALLO, A.; ACUNA-RUZ, T.; REBOLLEDO, J.; ORREGO, R.; BARRA, R. O. (2022). "Defining Priority Areas for the Sustainable Development of the Desalination Industry in Chile: A GIS Multi-Criteria Analysis Approach". *Sustainability (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137772>

GEBRE, S. L.; CATTRYSSE, D.; VAN ORSHOVEN, J. (2021). "Multi-Criteria Decision-Making Methods to Address Water Allocation Problems: A Systematic Review". *Water*, 13(2), p. 125. <https://doi.org/10.3390/w13020125>

GOKCEKUS, H.; OZSAHIN, D. U.; MUSTAPHA, M. T. (2020). "Simulation and evaluation of water sterilization devices". *Desalination and Water Treatment*, 177, pp. 431–436. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25115>

LIANG, F.; BRUNELLI, M.; REZAEI, J. (2022). "Best-worst Tradeoff method". *Information Sciences*, 610, pp. 957–976. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.07.097>

MARCELLIN, M. C.; PAVUR, G.; LOOSE, D. C.; CARDENAS, J. J.; DENEHY, D.; ALMASHHADANI, M.; WAHEED, S. Q.; TRUMP, B. D.; POLMATEER, T. L.; LINKOV, I.; LAKSHMI, V.; LAMBERT, J. H. (2024). "Systems analysis for energy assets of Iraq influenced by water scarcity". *Environment Systems and Decisions*, 44(2), pp. 259–279. <https://doi.org/10.1007/s10669-024-09967-w>

MCNALLY, A., MCCARTNEY, S., RUANE, A. C., MLADENOVA, I. E., WHITCRAFT, A. K., BECKER-RESHEF, I., BOLTEN, J. D., PETERS-LIDARD, C. D., ROSENZWEIG, C., & UZ, S. S. (2019). "Hydrologic and Agricultural Earth Observations and Modeling for the Water-Food Nexus". *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00023>

NAMAVAR, M.; MOGHADDAM, M. R. A.; SHAFIEI, M. (2023). "Developing an indicator-based assessment framework for assessing the sustainability of urban water management". *Sustainable Production and Consumption*, 40, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.006>

NTI, E. K.; KRANJAC-BERISAVLJEVIC, G.; DOKE, D. A.; WONGNAA, C. A.; ATTAFAUAH, E. E.; GYAN, M. A. (2023). "The impact of artisanal gold mining on the sustainability of Ghana's river basins: The case of the Pra basin". *Environmental and Sustainability Indicators*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100264>

OCTAVIANTI, T.; STADDON, C. (2021). "A review of 80 assessment tools measuring water security". *WIREs Water*, 8(3). <https://doi.org/10.1002/wat2.1516>

ORTIZ-PARTIDA, J. P., FERNANDEZ-BOU, A. S., MASKEY, M., RODRÍGUEZ-FLORES, J. M., MEDELLÍN-AZUARA, J., SANDOVAL-SOLIS, S., ERMOLIEVA, T., KANAVAS, Z., SAHU, R. K., WADA, Y., & KAHIL, T. (2023). "Hydro-Economic Modeling of Water Resources Management Challenges: Current Applications and Future Directions". *Water Economics and Policy*, 09(01). <https://doi.org/10.1142/S2382624X23400039>

PARWEEN, S.; SINHA, R. C. (2024). "An Analytical Hierarchy Process Approach for Prioritization of Objectives and Parameters for an Integrated Urban Water Management". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(4), pp. 1566–1579. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1019-2>

ROMAN, O.; HOQUE, S. F.; FORD, L.; SALEHIN, M.; ALAM, M. M.; HOPE, R.; HALL, J. W. (2021). "Optimizing Rural Drinking Water Supply Infrastructure to Account for Spatial Variations in Groundwater Quality and Household Welfare in Coastal Bangladesh". *Water Resources Research*, 57(8). <https://doi.org/10.1029/2021WR029621>

SANDHU, G., WEBER, O., WOOD, M. O., RUS, H. A., & THISTLETHWAITE, J. (2024). "Developing a transdisciplinary tool for water risk management and decision-support in Ontario, Canada". *Environmental Research Communications*, 6(7). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad5b3f>

SMEETS, P. W. M. H. (2019)." Quantitative microbial risk assessment (Qmra) to support decisions for water supply in affluent and developing countries". *Water Practice and Technology*, 14(3), 542–548. <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.038>

TIWARI, V.; KUMAR, A.; MUKHERJEE, M. (2024). "GIS and AHP-based groundwater recharge potential zones in urban region: A study of Ajmer City, Rajasthan, India". *Urban Climate*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101840>

VERMA, P.; SINGH, P.; SRIVASTAVA, S. K. (2020). "Development of spatial decision-making for groundwater recharge suitability assessment by considering geoinformatics and field data". *Arabian Journal of Geosciences*, 13(8). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05290-1>

ZHOU, X.; DUNAS-OSORIO, L.; DOSS-GOLLIN, J.; LIU, L.; STADLER, L.; LI, Q. (2023). "Mesoscale Modeling of Distributed Water Systems Enables Policy Search". *Water Resources Research*, 59(5). <https://doi.org/10.1029/2022WR033758>