

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## METODOLOGIAS E ÍNDICES DE SEGURANÇA HÍDRICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA APLICAÇÃO EM BACIAS E NA INDÚSTRIA

Jussara Ferreira-Santos<sup>1</sup>  
Renan Rodrigues Campos da Silva<sup>1</sup>  
\* Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>1</sup>

## METHODOLOGIES AND WATER SECURITY INDICES: A SYSTEMATIC REVIEW OF THEIR APPLICATION IN BASINS AND INDUSTRY

Recibido el 23 de abril de 2024. Aceptado el 22 de abril de 2025

### Abstract

Water scarcity, intensified by climate change and population growth, represents a global challenge that directly affects water security and makes the industrial sector vulnerable due to its high demand for water in operational processes. This article presents a systematic review conducted according to the PRISMA methodology and the PICO strategy, aiming to identify and analyze methodologies used for water security assessment in different territorial and sectoral contexts, with emphasis on contributions and gaps related to the industrial sector. Several approaches for assessing water security, risk, and vulnerability were identified, notably multi-criteria methods such as AHP and its variations (FAHP, BWM, Delphi, entropy), fuzzy models (FCE), conceptual frameworks such as DPSIR and PSER, grey forecasting, and decision support systems (DSS). Many of these methodologies have been applied to the construction of indices and indicators for urban and rural water security analysis, water stress assessment, and water resources sustainability. The analysis of 26 studies revealed both established and emerging methods, often combined with analytical and geospatial tools to enhance the accuracy and applicability of results. Although the literature search explicitly included the term "industry," few direct applications were found, revealing a significant gap in the use of these methodologies in the sector. Nevertheless, the identified methods provide a robust basis for future adaptations capable of supporting diagnosis, forecasting, and strategic decision-making in industrial contexts and in territories under increasing water stress.

**Keywords:** multicriteria analysis, water resources, industrial sector, hydrographic basin, systematic review.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

\* Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora. Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Martelos, Juiz de Fora, Minas Gerais. 36036-330. Brasil. Email: [celso.bandeira@ufjf.edu.br](mailto:celso.bandeira@ufjf.edu.br)

## Resumo

A escassez hídrica, intensificada pelas mudanças climáticas e pelo crescimento populacional, representa um desafio global que afeta diretamente a segurança hídrica e, em particular, torna o setor industrial vulnerável devido à elevada demanda por água em seus processos. Este artigo apresenta uma revisão sistemática conduzida segundo a metodologia PRISMA e a estratégia PICO, com o objetivo de identificar e analisar as metodologias utilizadas para avaliação da segurança hídrica em diferentes contextos territoriais e setoriais, enfatizando as contribuições e lacunas relacionadas ao setor industrial. Foram identificadas diversas abordagens para avaliação da segurança hídrica, risco e vulnerabilidade, com destaque para métodos multicritério como AHP e suas variações (FAHP, BWM, Delphi, entropia), modelos fuzzy (FCE), estruturas conceituais como DPSIR e PSER, previsão cinza e sistemas de apoio à decisão (DSS). Muitas dessas metodologias foram aplicadas à construção de índices e indicadores voltados à análise de segurança hídrica urbana e rural, à avaliação de estresse hídrico e à sustentabilidade dos recursos hídricos. A análise de 26 estudos evidenciou tanto métodos consolidados quanto emergentes, frequentemente combinados com ferramentas analíticas e geoespaciais para aprimorar a precisão e a aplicabilidade dos resultados. Embora a busca bibliográfica tenha incluído explicitamente o termo “indústria”, poucas aplicações diretas foram encontradas, revelando uma lacuna significativa no uso dessas metodologias no setor. Ainda assim, os métodos identificados oferecem bases robustas para adaptações futuras, capazes de apoiar diagnósticos, previsões e decisões estratégicas em contextos industriais e em territórios sob crescente pressão hídrica.

**Palavras-chave:** análise multicritério, recursos hídricos, indústria, bacia hidrográfica, revisão sistemática.

---

## Introdução

A gestão sustentável dos recursos hídricos é fundamental para o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental nos níveis local, regional e global. A falta de acesso à água em quantidade e qualidade adequadas pode gerar implicações socioeconômicas e ambientais severas, incluindo reduções expressivas no Produto Interno Bruto (PIB) (Hope *et al.*, 2012). A água é um recurso imprescindível para diversas cadeias produtivas, como a agricultura e a indústria, que dependem de sua disponibilidade para manter operações estáveis e competitivas.

A escassez de água, intensificada por mudanças climáticas e pelo crescimento populacional, representa um risco crescente à sustentabilidade das atividades industriais e à gestão de bacias hidrográficas. O aumento do estresse hídrico e a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos ampliam a vulnerabilidade de setores estratégicos, reforçando a necessidade de processos eficientes de gestão e estratégias de segurança hídrica.

As indústrias, grandes consumidoras de água, enfrentam desafios não apenas quanto ao suprimento direto, mas também em relação à previsibilidade hídrica nos territórios onde atuam (Fayer *et al.*, 2018). Nesta conjuntura, surgem metodologias específicas para avaliar a segurança hídrica, propor soluções e orientar a gestão integrada dos recursos. A avaliação nesse setor exige abordagens capazes de lidar com incertezas, integrar múltiplas dimensões e subsidiar tomadas de decisão em diferentes escalas.

Diversas propostas metodológicas combinam técnicas multicritério, lógica fuzzy, sensoriamento remoto, indicadores de desempenho e modelos de apoio à decisão. No campo da avaliação e gestão de recursos hídricos, há priorização de metodologias que abrangem índices, indicadores, avaliações de risco e de vulnerabilidade à escassez de água, além da gestão integrada. As principais técnicas identificadas incluem o processo de hierarquia analítica difusa AHP e suas variações, muitas vezes associado à matriz SWOT (Chitsaz e Azarnivand, 2017), e modelos fuzzy, como o FCE (Liu *et al.*, 2017), Fuzzy BWM-TOPSIS e Fuzzy BWM-AHP (Tu *et al.*, 2020). Essas abordagens frequentemente incorporam elementos locais (disponibilidade de água, variabilidade temporal e espacial, sazonalidade e qualidade), bem como projeções de demandas futuras e impactos das mudanças climáticas.

Diante desse cenário, a revisão sistemática se apresenta como uma ferramenta para compreender os sistemas de gestão de segurança hídrica e de análises de risco em contextos de indisponibilidade hídrica. Essa análise pode direcionar intervenções mais precisas e contribuir para o aprimoramento da gestão hídrica, especialmente no setor industrial.

Isso posto, o presente trabalho possui como objetivo identificar e analisar as metodologias utilizadas para a avaliação da segurança hídrica em diferentes contextos territoriais e setoriais, enfatizando as contribuições e lacunas relacionadas ao setor industrial, com base em uma revisão sistemática estruturada segundo a metodologia PRISMA e a estratégia PICO.

### Metodologia

A revisão foi conduzida segundo as diretrizes do PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que asseguram transparência, reprodutibilidade e rigor na seleção, triagem e inclusão de estudos. Para a formulação da pergunta científica, adotou-se a estratégia PICO (População, Intervenção, Comparador e Resultado), amplamente utilizada para estruturar questões de pesquisa de forma objetiva e consistente, evitando formulações vagas que possam comprometer a qualidade das conclusões (Donato e Donato, 2019).

A aplicação da estratégia PICO permitiu delimitar o escopo da revisão, considerando: População (P): indústrias e territórios sob pressão hídrica, sujeitos a cenários de escassez; Intervenção (I): implementação de sistemas e metodologias para gestão da segurança hídrica e avaliação de risco; Comparador (C): diferentes abordagens metodológicas e suas combinações; Resultado (O): capacidade das metodologias de apoiar o diagnóstico, a previsão e a gestão integrada dos recursos hídricos, com potencial de aplicação no contexto industrial. Com base nesses elementos, formulou-se a pergunta central da pesquisa: “Quais metodologias de gestão da segurança hídrica e de análise de risco (I) são aplicadas em indústrias e territórios sob escassez de água (P) para apoiar o diagnóstico, a previsão e o direcionamento de intervenções na gestão de bacias hidrográficas (O), considerando diferentes abordagens metodológicas (C)?”

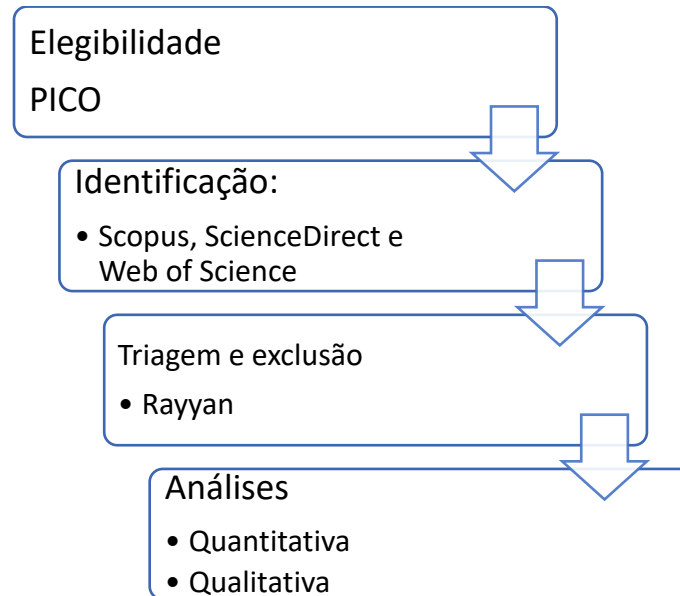


Figura 1. Fluxograma metodológico

Entre os critérios de elegibilidade foram incluídos os que abordavam a segurança hídrica em indústrias afetadas por indisponibilidade, utilizavam sistemas de gestão de segurança ou análises de risco para a previsibilidade e o direcionamento de intervenções. A inclusão considerou estudos que permitissem mensurar e avaliar através de índices e indicadores, ou apresentassem mapeamentos de bacias hidrográficas sobre a perspectiva da segurança e disponibilidade hídrica e previsibilidade. Não foram aplicadas restrições de idioma e data. Os critérios de exclusão dos estudos consideraram aqueles não disponíveis eletronicamente, outras revisões sistemáticas e capítulos de livros. Além disso, avaliou-se a não recepção aos critérios definidos e, portanto, não aderência à temática, como os direcionados à segurança alimentar, energia, saúde ambiental e monitoramento de metais pesados.

As buscas foram realizadas nas bases Scopus, ScienceDirect e Web of Science, utilizando palavras-chave estruturadas: ("industry") AND ("water availability" OR "surface water" OR "groundwater") AND ("risk management" OR "risk analysis" OR "water resources management") AND ("water security" OR "water shortage"). Foram realizadas adequações de acordo com os mecanismos, campos de busca individuais e aplicação de filtros de maneira a selecionar apenas artigos acadêmicos. A seleção foi realizada por meio do software Rayyan (Ouzzani *et al.*, 2016), e os resultados foram organizados conforme pode ser visualizado através do fluxograma PRISMA 2020 com o mapeamento do número de registros identificados, incluídos e excluídos trazido na Figura 2.

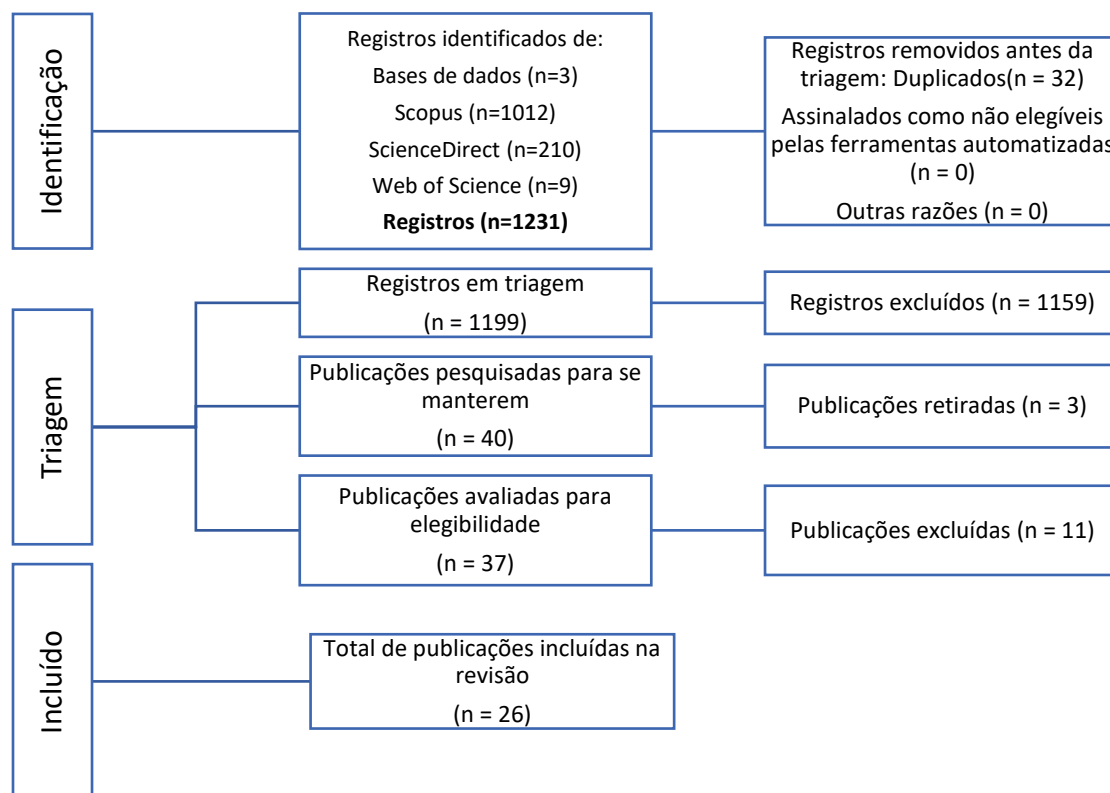


Figura 2. Fluxograma PRISMA 2020 para a identificação dos estudos através de bases de dados e registros

## Resultados e discussão

### Análise quantitativa

A pesquisa realizada nas bases de dados resultou em 1231 artigos encontrados, distribuídos entre Scopus (1012), ScienceDirect (210) e Web of Science (9). Após a inserção no software Rayyan, 32 artigos foram identificados como duplicatas e excluídos. O balanço final indicou que, dos 1199 documentos restantes, 1159 artigos (96.7%) foram excluídos por falta de aderência ao objeto de estudo, enquanto 40 (3.3%) foram pré-selecionados. Dessa forma, através da leitura completa dos 40 pré-selecionados, destes, 26 foram efetivamente incluídos para a síntese qualitativa e análise de seus resultados.

A análise do mapa de ocorrência de palavras-chave (Figura 3) dos 26 artigos selecionados demonstra uma forte correlação com a pergunta científica, confirmando a assertividade da estratégia de busca. Um achado notável é a alta frequência de estudos focados na China. O que sugere que o país é um importante centro de pesquisa sobre segurança hídrica, impulsionado pela alta demanda de água resultante do crescimento populacional, da expansão econômica e das mudanças nos padrões de consumo (Chen *et al.*, 2017).



Figura 3. Palabras-clave extraídas del Rayyan de los 26 artículos incluidos

A análise qualitativa dos artigos focou em coletar dados sobre as metodologias, índices, variáveis, ferramentas e dimensões de análise utilizadas. As dimensões consideradas nos estudos incluíram aspectos naturais (clima, disponibilidade hídrica), estruturais (sistemas de captação e distribuição), econômicos (custos, impactos financeiros), sociais (qualidade de vida, saúde) e de governança (políticas de gestão). Esta seção apresenta uma análise aprofundada das metodologias identificadas, agrupadas por suas abordagens principais, avaliando suas contribuições, limitações e potencial de aplicação em contextos industriais.

Para apresentar os resultados e dados extraídos dos artigos, foi utilizado um quadro de termos técnicos (Tabela 1), e um quadro resumo (Tabela 2) com intuito de familiarizar o leitor às principais metodologias empregadas apresentadas após as tabelas.

Tabela 1. Termos Técnicos extraídos dos artigos selecionados

Sigla	Termo
AHP	Analytical Hierarchy Process
BWM	Best Worst Method
SWOT	Strengths–Weaknesses–Opportunities–Threats
FCE	Fuzzy comprehensive evaluation
TOPSIS	Technique for order preference by similarity to ideal solution
VIC	Variable infiltration capacity
WDI	Water depletion index
DPSIR	Driving forces pressures states impacts responses
KPI	Key performance indicators
PSO-PEE	Projection pursuit model based on particle swarm optimization
PSER	Press - Status - Effect - Response

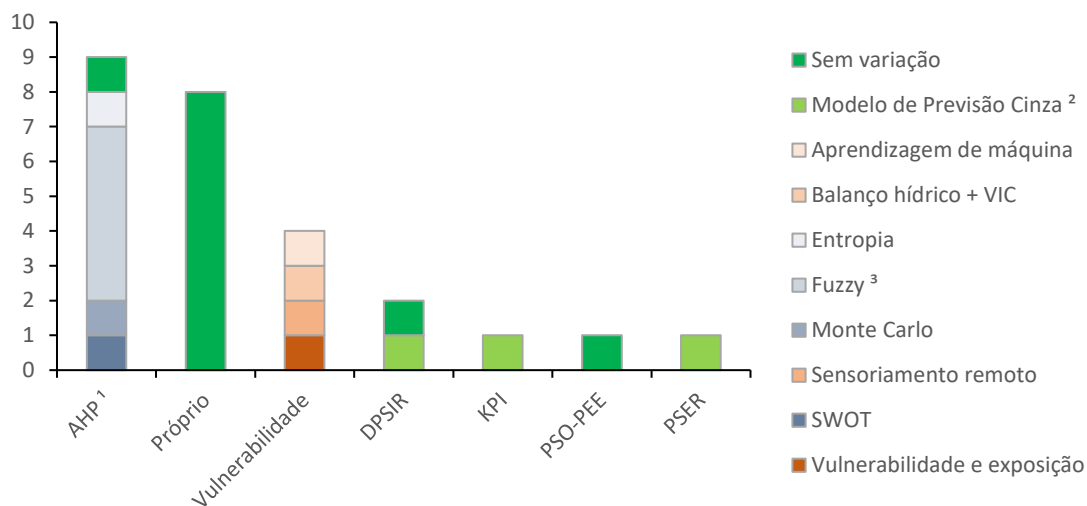
Tabela 2. Resumo dos artigos selecionados

Título	Autores	Produto	Metodologia	Variación	Área de estudo	Dimensão
Water Scarcity Management in Arid Regions Based on an Extended Multiple Criteria Technique	Chitsaz e Azarnivand (2017)	Estratégias para a mitigação da escassez hídrica	AHP; BWM	SWOT	Bacia/cidade	Natural, social e econômico
A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins	Pandey <i>et al.</i> (2011)	Índice de capacidade adaptativa	AHP	-	Bacia do Rio Bagmati, Nepal	Natural, estrutural, econômico e social
Fuzzy AHP integrated with GIS analyses for drought risk assessment: A case study from Upper Phetchaburi River Basin, Thailand	Wijitkosum e Sriburi (2019)	Avaliação de risco de seca	AHP	Fuzzy	Bacia do Alto Rio Phetchaburi, Tailândia	Natural e social
Water resources stress assessment and risk early warning—a case of Hebei Province China	Liu <i>et al.</i> (2017)	Índice de estresse hídrico	AHP	Fuzzy	Província de Hebei, China	Natural, econômico e social
Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin	Safavi, Golmohammadi e Sandoval-solis (2016)	Índice de Sustentabilidade dos Recursos Hídricos	AHP	Fuzzy	Bacia do rio Zayandehrud, no Irã	Legal, político, ambiental, social e econômico
Water risk assessment in supply chains	Schaefer <i>et al.</i> (2019)	Avaliação do risco hídrico	AHP	Monte Carlo	Global, empresarial	Natural e econômico
Regional water resources security evaluation based on a hybrid fuzzy BWM-TOPSIS method	Tu <i>et al.</i> (2020)	Avaliação dos níveis de segurança hídrica	AHP; TOPSIS	Fuzzy + BWM	Macro: Seis regiões no norte da China	Natural e social
Spatial differentiation and driving mechanism of rural water security in typical “engineering water depletion” of karst mountainous area - A lesson of Guizhou, China	Zhou <i>et al.</i> (2021)	Índice de segurança hídrica rural	AHP	Entropia	Província de Guizhou, China	Natural, estrutural, econômico e social
Sustainability assessment of water management at river basin level: Concept, methodology and application	Shafiei <i>et al.</i> (2022)	Avaliação da Sustentabilidade (AS)	AHP	Fuzzy + Delphi	Bacia de Mashhad, Irã	Técnico, ambiental, econômico e social

Título	Autores	Producto	Metodología	Variación	Área de estudio	Dimensión
Flexibility and intensity of global water use	Qin <i>et al.</i> (2019)	Índice de estresse hídrico	Próprio	Escassez, flexibilidade e variabilidade	6 continentes	Natural e social
Drivers of spatial and temporal variability of streamflow in the Incomati River basin	Saraiva Okello <i>et al.</i> (2015)	Indicadores de alteração hidrológica de vazão	Próprio	Indicadores de Alteração Hidrológica (AIH)	Bacia do rio Incomati, sul da África	Natural e social
Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China	Zhang <i>et al.</i> (2021)	Índice de segurança hídrica	Próprio	VIC e Método dos Detectores Geográficos	Bacia do rio Weihe, China	Natural, social e econômico
Can there be water scarcity with abundance of water? Analyzing water stress during a severe drought in Finland	Ahopelto <i>et al.</i> (2019)	Índice de depleção de água	Próprio	WDI	Finlândia	Natural
Spatiotemporal analysis of water resources system vulnerability in the Lancang River Basin, China	Gui, Chen e He (2021)	Índice de vulnerabilidade hídrica	Próprio	Sensibilidade, exposição, perigo e adaptabilidade	Bacia do Rio Lancang, China	Natural, econômico e social
China's water risk assessment and industrial source analysis based on the localization of WWF water risk assessment tools	Xiao, Gao e Su (2019)	Avaliação de risco hídrico	Próprio	Riscos físicos, riscos regulatórios e riscos de reputação	China	Natural e social
Perspectives of current and future urban water security in Iran	Alavijeh <i>et al.</i> (2021)	Índice de segurança hídrica urbana	Próprio	Previsão de vazão	Irã	Natural, estrutural, econômico e social
The growing water crisis in Central Asia and the driving forces behind it	Wang <i>et al.</i> (2022)	Índice de estresse hídrico (IAMS)	Próprio	Oferta e demanda de água (WSI) e poluição da água	Ásia Central	Ambiental/natural, econômico e social

Título	Autores	Producto	Metodología	Variación	Área de estudio	Dimensión
The vulnerability of thermoelectric power generation to water scarcity in China: Current status and future scenarios for power planning and climate change	Zheng <i>et al.</i> (2016)	Vulnerabilidade à escassez de água	Vulnerabilidade	Balço hídrico + VIC	Unidades Administrativas de Bacias Hidrográficas Chinesas	Natural e estrutural
Assessing vulnerability to natural hazards: Impact-based method and application to drought in Washington state	Fontaine e Steinemann (2009)	Método de avaliação de vulnerabilidade VAM	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade e exposição	Subsetores de Washington, EUA	-
New approach of water quantity vulnerability assessment using satellite images and GIS-based model: An application to a case study in Vietnam	Nguyen <i>et al.</i> (2020)	Índice de vulnerabilidade hídrica	Vulnerabilidade	Sensoriamento remoto	Provinciais e regiões do Vietnã	Natural, econômico e social
Risk assessment of water resource shortages in the Aksu River basin of northwest China under climate change	Yang <i>et al.</i> (2022)	Risco de seca	Vulnerabilidade	Aprendizagem de máquina	Bacia do Rio Aksu, China	Natural, estrutural, econômico e social
Measuring water security: A vital step for climate change adaptation	Babel <i>et al.</i> (2020)	Índice de Segurança Hídrica (WSI)	DPSIR	-	Cidade de Bangkok, Tailândia	Natural, estrutural, econômico e político
Comprehensive Evaluation Model for Urban Water Security: A Case Study in Dongguan, China	Cao <i>et al.</i> (2022)	Índice de segurança hídrica urbana	DPSIR	Modelo de Previsão Cinza	Dongguan, China	Natural, estrutural, econômico e social
Prediction of water security level for achieving sustainable development objectives in Saskatchewan, Canada: Implications for resource conservation in developed economies	Aalirezaei <i>et al.</i> (2021)	Nível de segurança hídrica	KPI	Modelo de Previsão Cinza	Bacias de Saskatchewan, Canadá	Social e político
Development and utilization of water resources and assessment of water security in Central Asia	Wang <i>et al.</i> (2020)	Avaliação da segurança hídrica	PSO-PEE	-	Países da Ásia Central	Natural, estrutural, econômico e social
Influencing indicators and quantitative assessment of water resources security in karst region based on PSER model-the case of Guizhou	Zhou <i>et al.</i> (2019)	Avaliação da segurança hídrica	PSER	Modelo de Previsão Cinza + TOPSIS	Guizhou, China	Natural, estrutural, econômico e social

O gráfico demonstrando as diferentes metodologias e variações observadas na presente revisão sistemática pode ser visualizada através da Figura 4.



<sup>1</sup> Comparado com o TOPSIS em Tu et al. (2020) e com BWM em Chitsaz e Azarnivand (2017). <sup>2</sup> Aplicado junto ao TOPSIS em Zhou et al. (2019). <sup>3</sup> Aplicado junto ao Delphi em Shafiei et al. (2022) e ao BWM em Tu et al. (2020). Sem variação equivale à metodologia sem associações de outras técnicas\*

Figura 4. Gráfico de colunas empilhadas de metodologias e variações observadas.

### Analytical Hierarchy Process - AHP

A Análise Hierárquica de Processos (AHP) foi uma das metodologias mais prevalentes, destacando-se uma clara evolução no seu uso. Dos 26 artigos triados sobre o tema, nove deles utilizaram a metodologia de Análise Hierárquica de Processos (AHP), representando cerca de 35% dos estudos selecionados entre os quais foi identificada uma alta variabilidade na abordagem de aplicação da metodologia. Isto porque, embora seja uma técnica robusta para a tomada de decisões multicritério (MCA), sua aplicação isolada, dependente de julgamentos de especialistas, possui limitações significativas para refletir adequadamente incertezas e subjetividades (Safavi et al., 2016; Wijitkosum & Sriburi, 2019). Essa fragilidade incentivou a literatura a buscar combinações com outras técnicas para mitigar suas desvantagens.

Uma das tendências mais notáveis é a integração do AHP com o Método Melhor-Pior (BWM). O estudo de Chitsaz e Azarnivand (2017) comparou o AHP isolado com o BWM-SWOT e demonstrou que o BWM oferece resultados superiores em termos de consistência e confiabilidade. Essa

abordagem, que prioriza estratégias de mitigação da escassez hídrica com base em múltiplos critérios de risco, destaca um caminho promissor para aprimorar a tomada de decisões. Outra variação, o BWM-TOPSIS, utilizada por Tu *et al.* (2020), reforça essa evolução, permitindo uma avaliação mais precisa ao derivar pesos dos indicadores de forma comparativa, superando a limitação do AHP de atribuir pesos de forma menos objetiva.

A combinação do AHP com a Lógica Fuzzy (FAHP) foi outra abordagem recorrente. Exemplos de Wijitkosum e Sriburi (2019) e Safavi *et al.* (2016) demonstram como o FAHP é eficaz ao lidar com a imprecisão e a subjetividade inerentes às avaliações complexas de segurança hídrica. Safavi *et al.* (2016) é particularmente relevante para o contexto industrial, pois utilizou o FAHP para avaliar a sustentabilidade hídrica em bacias, estabelecendo hierarquias que consideram explicitamente aspectos industriais, agrícolas e municipais. A integração com o Sistema de Informações Geográficas (GIS), como no trabalho de Wijitkosum e Sriburi (2019), fortalece essa abordagem ao permitir a visualização espacial dos riscos de seca.

Outras combinações sofisticadas incluem a simulação de Monte Carlo (MCAHP), aplicada por Schaefer *et al.* (2019). Esta técnica avança a AHP ao incorporar incerteza e oferecer uma interpretação probabilística dos resultados, calculando intervalos de confiança para os pesos. Esse método é de grande utilidade para medir riscos hídricos em locais de alta demanda de água, como em áreas com forte presença industrial. Por fim, o estudo de Zhou *et al.* (2021) e Shafiei *et al.* (2022) exemplificam a integração do AHP com o Método da Entropia e o método Delphi. Essas abordagens buscam aumentar a objetividade na determinação dos pesos, seja por meio da entropia de Shannon (Zhou *et al.*, 2021) ou por um consenso de especialistas (Shafiei *et al.*, 2022), oferecendo soluções para a subjetividade do AHP tradicional.

Implicações para o setor industrial: A evolução do AHP demonstra que as abordagens mais robustas para a gestão de recursos hídricos não se baseiam em métodos isolados, mas em combinações que mitigam suas limitações. As versões híbridas (FAHP, BWM-AHP, MCAHP) são particularmente promissoras para a indústria, pois permitem uma análise mais precisa e confiável para a avaliação de riscos hídricos em suas cadeias de valor e operações, considerando a complexidade das variáveis e a necessidade de lidar com incertezas. A combinação com GIS e métodos de ponderação mais objetivos, como a entropia, pode ajudar a criar ferramentas de apoio à decisão mais transparentes e replicáveis para o setor.

#### Metodologia própria

Oito estudos entre os analisados optaram por desenvolver metodologias próprias ou índices customizados para traduzir as particularidades do estresse hídrico em suas áreas de estudo. Embora essa abordagem seja flexível, ela levanta questões sobre a replicabilidade e a generalização dos

resultados, o que representa um desafio. No entanto, o valor dessas metodologias reside justamente na sua capacidade de focar em elementos específicos que modelos padronizados não capturam.

Exemplos de índices customizados ilustram essa abordagem. O estudo de Qin *et al.* (2019) criou o índice de estresse hídrico SFV (Escassez-Flexibilidade-Variabilidade), que incluiu a flexibilidade dos usos da água e a variabilidade histórica das vazões. O índice foi aplicado em bacias de seis continentes para analisar o consumo de 1980 a 2016 nos setores agrícola, energético e doméstico, comparando o consumo total e o consumo inflexível com o escoamento médio da região. De forma similar, o Índice de Alteração Hidrológica (IAH) de Saraiva Okello *et al.* (2015) foi aplicado na bacia semiárida do rio Incomati, utilizando dados de 33 estações para caracterizar os regimes hidrológicos com base em parâmetros ecológicos.

A integração de modelos e dados espaciais também é uma característica marcante dessas abordagens. Zhang *et al.* (2021) utilizaram o modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) e dados de serviços ecossistêmicos para simular padrões espaciais de segurança hídrica na Bacia do Rio Weihe, na China. Já o Índice de Segurança Hídrica (WSI), empregado por Wang *et al.* (2022) para a crise hídrica na Ásia Central, foi calculado como um indicador não espacial, utilizando parâmetros como temperatura, precipitação, população e PIB para refletir o grau de pressão sobre o uso da água em uma região. A combinação dessas abordagens mostra a diversidade de ferramentas para avaliar o problema em diferentes escalas e com distintos focos de análise.

A revisão também destacou abordagens que enfatizam contextos específicos. O estudo de Ahopelto *et al.* (2019) utilizou o Water Depletion Index (WDI) para analisar secas severas na Finlândia, um país com amplos recursos hídricos, ressaltando a necessidade de estratégias de gerenciamento mesmo em regiões de abundância. Além disso, a metodologia da WWF, aplicada por Xiao, Gao e Su (2019), foi particularmente relevante por estruturar a avaliação de risco em três categorias — riscos físicos, regulatórios e de reputação — e identificar setores industriais suscetíveis, oferecendo sugestões de gerenciamento. No entanto, o estudo apontou desafios de replicabilidade, ressaltando a dificuldade de transferir metodologias proprietárias para outros contextos sem ajustes.

Outras abordagens focadas em vulnerabilidade, como as de Gui, Chen e He (2021) e Alavijeh *et al.* (2021), criaram modelos customizados que integram fatores climáticos, sociais e econômicos. O trabalho de Alavijeh *et al.* (2021) é um exemplo robusto, utilizando o índice de segurança hídrica urbana (UWSI) para avaliar cinco dimensões e projetar tendências futuras de disponibilidade de água até 2100 com base em cenários de mudança climática.

### Análise da vulnerabilidade

Quatro artigos abordaram a falta da disponibilidade hídrica através da realização da análise da vulnerabilidade de sistemas hídricos. Assim, a análise da vulnerabilidade de sistemas hídricos emergiu como uma abordagem robusta para compreender a suscetibilidade à escassez de água. Um padrão metodológico notável é a adoção de estruturas conceituais baseadas no framework do IPCC, que se baseiam nos três pilares: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Os estudos analisados aplicam essa estrutura de maneiras distintas, demonstrando sua flexibilidade.

O trabalho de Zheng *et al.* (2016) é um exemplo direto de aplicação para o setor industrial, ao avaliar a vulnerabilidade da geração de energia termelétrica à escassez hídrica na China. Para isso, foi desenvolvido um índice de vulnerabilidade que englobou múltiplos parâmetros, incluindo a dependência das usinas em relação ao fornecimento de água, a pressão exercida pelo abastecimento local, os efeitos das mudanças climáticas e as inadequações no planejamento territorial. A pesquisa, que utilizou o modelo hidrológico VIC para simular o escoamento anual entre 2021 e 2050, demonstra como é possível quantificar a dependência de um setor industrial e as implicações das mudanças climáticas.

Em contraste, Fontaine e Steinemann (2009), no Estado de Washington (EUA), e Nguyen *et al.* (2020), no Vietnã, exploram a mesma estrutura de avaliação, mas com metodologias de coleta de dados e análise diferentes. Enquanto Fontaine e Steinemann (2009) utilizaram questionários em escala Likert e validaram os resultados com três testes estatísticos rigorosos (Fisher, ANOVA, SNK), Nguyen *et al.* (2020) empregaram sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas (GIS). Contudo, o estudo de Nguyen *et al.* (2020) se depara com a limitação da ausência de consideração da disponibilidade de água doce e das taxas de retirada, um aspecto crucial para a avaliação de risco. A abordagem foi detalhada com um total de 27 indicadores, distribuídos entre os componentes de exposição (9), sensibilidade (6) e capacidade adaptativa (12). Essa comparação ilustra como a mesma estrutura conceitual pode ser adaptada para diferentes escalas e tipos de dados, desde a percepção de usuários até dados espaciais e climáticos.

O estudo de Yang *et al.* (2022) sintetiza essas abordagens, combinando a estrutura do IPCC com simulações hidrológicas e um modelo matemático que considera fatores socioeconômicos, como nível educacional e capacidade de carga. O modelo foi especialmente projetado para avaliar a vulnerabilidade do sistema de água considerando o desenvolvimento industrial e econômico da região, resultando em uma classificação mais precisa e na identificação de seus limites. A similaridade na aplicação de questionários entre este estudo e o de Fontaine e Steinemann (2009) reforça a validade da coleta de dados de percepção para enriquecer a modelagem quantitativa.

### DPSIR

O modelo DPSIR (Driving Forces-Pressures-States-Impacts-Responses) se destaca como um framework conceitual, e não como uma metodologia rígida, oferecendo uma estrutura flexível para a criação de sistemas de indicadores. Essa flexibilidade é um de seus maiores méritos, permitindo a personalização de variáveis e a adaptação a diferentes contextos, como visto nos estudos de Babel *et al.* (2020) e Cao *et al.* (2022).

Babel *et al.* (2020) utilizaram o DPSIR para criar um Índice de Segurança Hídrica (WSI) urbano, com oito dimensões que vão do abastecimento, acessibilidade, qualidade e saneamento à produtividade de água, desastres, ambiente hídrico e governança. A inovação aqui reside na associação de indicadores com os critérios SMART (Específico, Mensurável, Atingível, Relevante, Temporal), garantindo que as métricas sejam acionáveis e alinhadas com intervenções práticas. Por sua vez, Cao *et al.* (2022) também desenvolveram um sistema de indicadores urbanos, mas com um conjunto diferente de 36 indicadores, agrupados em cinco categorias: recursos hídricos, qualidade da água, ecologia, uso da água e economia. Para a avaliação quantitativa, eles integraram um algoritmo de busca de projeção (PP), resultando no modelo DPSIR-PP. O estudo ainda empregou um modelo de previsão cinza para projetar tendências futuras com base em dados limitados, o que é um ponto de destaque.

A comparação entre os dois estudos demonstra a versatilidade do DPSIR para abordar a segurança hídrica de maneiras distintas. Enquanto o primeiro foca em indicadores mais qualitativos de gestão, o segundo busca uma abordagem mais quantitativa e preditiva. Ambos, no entanto, compartilham a capacidade de identificar as interações complexas entre o desenvolvimento socioeconômico e os recursos hídricos.

### KPI - Indicador Chave de Desempenho

O estudo de Aalirezai *et al.* (2021), realizado na região de Saskatchewan, Canadá, é o único a utilizar Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) como metodologia central para a avaliação da segurança hídrica. A principal contribuição dessa abordagem é a sua natureza pragmática e orientada para a gestão. O estudo utilizou sete KPIs específicos que relacionam disponibilidade, consumo, qualidade e risco da água, focando na medição de fatores críticos que podem ser monitorados e gerenciados ativamente.

O uso de um modelo de previsão cinza para projetar os KPIs futuros é um aspecto notável, pois eleva a aplicação dos indicadores de uma simples medição do passado para uma ferramenta preditiva. Essa técnica é particularmente útil para contextos com dados limitados e incertos, uma realidade comum na gestão de recursos hídricos. A aplicação do método, no entanto, sublinha a importância de adaptar a seleção de KPIs às características únicas de cada bacia hidrográfica e às necessidades dos tomadores de decisão locais, o que garante a relevância e a utilidade da ferramenta.

### PSO-PEE - Projection Pursuit Model Based on Particle Swarm Optimization

O estudo de Wang *et al.* (2020) apresenta uma metodologia singular ao utilizar o modelo PSO-PEE (Projection Pursuit Model based on Particle Swarm Optimization), que se baseia em algoritmos de otimização para avaliar a segurança hídrica. A principal vantagem dessa abordagem é a sua capacidade de realizar uma otimização global eficaz e inteligente para determinar os pesos dos indicadores, superando as limitações de métodos que dependem exclusivamente de julgamento de especialistas.

O modelo incorpora a teoria da evolução biológica da população para analisar quatro camadas de critérios que impactam a segurança hídrica. A aplicação em cinco países da Ásia Central (Cazaquistão, Quirguistão, Tadjiquistão, Turcomenistão e Uzbequistão) demonstra a sua utilidade em contextos complexos. A seleção de indicadores foi detalhada em 16 camadas indicadoras (10 positivas e 6 negativas), mostrando a granularidade da análise, que aborda a oferta e a demanda de recursos hídricos e processos estocásticos. A metodologia determina os níveis de segurança hídrica com base nos valores de projeção dos indicadores, oferecendo uma avaliação quantitativa robusta. No entanto, a aplicação do PSO-PEE em novas regiões exige um ajuste cuidadoso para acomodar as particularidades da bacia de interesse, garantindo a validade da otimização.

### PSER - Modelo de Pressão - Estado - Efeito – Resposta

O estudo de Zhou *et al.* (2019) utiliza o modelo PSER (Pressão-Estado-Efeito-Resposta) para a avaliação da segurança hídrica, sendo o único artigo a adotar essa abordagem. O mérito do PSER, similar ao DPSIR, reside em sua capacidade de oferecer uma visão sistêmica e causal das relações entre pressões, o estado dos sistemas hídricos, os efeitos resultantes e as respostas de gestão.

A metodologia utilizada é uma combinação poderosa de técnicas: o TOPSIS e o modelo abrangente relacional cinza. O TOPSIS é empregado para classificar as alternativas com base em múltiplos critérios, enquanto o modelo relacional cinza é fundamental para lidar com a incerteza e a incompletude de dados, uma condição comum em avaliações ambientais. A integração dessas duas ferramentas permitiu ao estudo identificar os principais fatores que influenciam a segurança hídrica em uma região cárstica de Guizhou, na China, no período de 2001 a 2015. A avaliação PSER proporcionou uma visão clara das fontes de pressão e da eficácia das medidas de resposta, mas o estudo aponta uma limitação importante: a ausência de uma análise do ciclo de recursos hídricos no sistema natural-social.

### **Conclusão**

A análise dos 26 estudos incluídos nesta revisão sistemática permitiu identificar um conjunto diversificado de metodologias consolidadas e emergentes para avaliação da segurança hídrica, risco hídrico e vulnerabilidade em diferentes contextos. Foram observadas abordagens centradas na construção de índices (como segurança hídrica, segurança hídrica rural, sustentabilidade dos recursos hídricos, estresse

hídrico, vulnerabilidade hídrica, segurança hídrica urbana), uso de indicadores hidrológicos e avaliações direcionadas a risco, estresse, níveis de segurança e vulnerabilidade à escassez de água.

Dessa forma, as metodologias utilizadas na avaliação da segurança hídrica envolvem a Análise Hierárquica de Processos (AHP) e suas variações, como FAHP, BWM, Delphi, entropia, Monte Carlo e combinações com o método TOPSIS. Tais técnicas se mostraram particularmente eficazes em contextos que exigem a consideração de múltiplos critérios – qualitativos e quantitativos – permitindo maior robustez na definição de prioridades, no suporte à tomada de decisão e na construção de cenários preditivos. Modelos como FCE, PSER, DPSIR, VIC e previsão cinza também contribuíram para análises de sustentabilidade, risco e adaptação em ambientes complexos, inclusive sob a ótica da gestão integrada dos recursos hídricos.

A combinação de métodos multicritério com outras ferramentas analíticas e geoespaciais fortaleceu a capacidade de diagnóstico e prognóstico das abordagens aplicadas. Destacam-se, por exemplo, as integrações entre FAHP e SIG, entre AHP e simulação de Monte Carlo, entre entropia e AHP, bem como os modelos híbridos baseados em lógica Fuzzy com sistemas de apoio à decisão. Tais arranjos metodológicos permitiram avanços significativos na construção de índices compostos e na análise de vulnerabilidades.

Apesar de o termo "indústria" ter sido incluído nas palavras-chave da revisão, o processo de triagem não resultou em um grande número de artigos sobre índices de segurança hídrica aplicados a esse setor. Essa constatação evidencia uma lacuna significativa na literatura científica sobre o tema e pode ser preenchida pela adaptação das metodologias encontradas na revisão, que, apesar de não serem exclusivas para a indústria, oferecem bases sólidas para o planejamento territorial, a gestão de bacias com empreendimentos industriais e a análise de risco em cadeias de suprimento.

Verificou-se, ainda, uma tendência crescente de incorporação de elementos locais e temporais nas análises, incluindo variabilidade sazonal, disponibilidade espacial de recursos, qualidade da água e projeções futuras relacionadas a mudanças climáticas, aumento da demanda por energia e transformações demográficas. Esse direcionamento metodológico converge com a necessidade de avaliações mais contextualizadas, sobretudo em regiões críticas como bacias hidrográficas sob pressão hídrica crescente.

Por fim, os resultados desta revisão oferecem subsídios teóricos e práticos relevantes para o avanço da modelagem e da gestão da segurança hídrica, com potencial para orientar escolhas metodológicas adaptadas ao setor industrial. Ao mesmo tempo, reforçam a importância de ampliar o desenvolvimento e a aplicação de ferramentas específicas voltadas a esse segmento, considerando os riscos crescentes associados à escassez de água e a urgência de soluções resilientes e sustentáveis para o uso racional dos recursos hídricos.

## Agradecimientos

Os autores agradecem à ArcelorMittal pelo apoio à pesquisa via projeto P&D, e à Universidade Federal de Juiz de Fora pelo incentivo à educação.

## Referências bibliográficas

- Aalirezaei, A., Khan, M. S. A., Kabir, G., Ali, S. M. (2021) Prediction of water security level for achieving sustainable development objectives in Saskatchewan, Canada: Implications for resource conservation in developed economies. *Journal of Cleaner Production*, **311**, 127521. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127521>
- Ahopelto, L., Veijalainen, N., Guillaume, J. H., Keskinen, M., Marttunen, M., Varis, O. (2019) Can there be water scarcity with abundance of water? Analyzing water stress during a severe drought in Finland. *Sustainability*, **11**(6), 1548. <http://doi.org/10.3390/su11061548>
- Alavijeh, N. K., Falahi, M. A., Shadmehri, M. T. A., Salehnia, N., Larsen, M. A. D., Drews, M. (2021) Perspectives of current and future urban water security in Iran. *Journal of Cleaner Production*, **321**, 129004. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129004>
- Babel, M. S., Shinde, V. R., Sharma, D., Dang, N. M. (2020) Measuring water security: A vital step for climate change adaptation. *Environmental Research*, **185**, 109400. <http://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109400>
- Cao, J., Yan, Z., Wan, J., Wang, Y., Ye, G., Long, Y., Xie, Q. (2022) Comprehensive evaluation model for urban water security: A case study in Dongguan, China. *Water*, **14**(23), 3957. <http://doi.org/10.3390/w14233957>
- Chang, D.-Y. (1996) Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, **95**, 649-655. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](http://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Chen, W., Wu, S., Lei, Y., Li, S. (2017) China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water. *Ecological Indicators*, **74**, 321-333. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.038>
- Chitsaz, N., Azarnivand, A. (2017) Water scarcity management in arid regions based on an extended multiple criteria technique. *Water Resources Management*, **31**, 233-250. <http://doi.org/10.1007/s11269-016-1521-5>
- Fayer, G. C., Pereira, J. C., Ribeiro, L. G., Ferreira, P. M., Bolotari Junior, N. (2018). Análise de riscos aplicadas aos aspectos hídricos de usinas siderúrgicas utilizando as ferramentas de Analytic Hierarchy Process (AHP) e Bayesian Belief Networks (BBN). *73º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 1976-1988.
- Fontaine, M. M., Steinemann, A. C. (2009) Assessing vulnerability to natural hazards: Impact-based method and application to drought in Washington State. *Natural Hazards Review*, **10**(1), 11-18. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2009\)10:1\(11\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2009)10:1(11))
- Gui, Z., Chen, X., He, Y. (2021) Spatiotemporal analysis of water resources system vulnerability in the Lancang River Basin, China. *Journal of Hydrology*, **601**, 126614. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126614>
- Hope, R., Hansen, K., Mutembwa, M., Schlessinger, S. (2012) *Water security, risk and society – Key issues and research priorities for international development*. Synthesis report submitted to UK Collaborative on Development Sciences by Oxford University Water Security Network.
- Liu, M., Wei, J., Wang, G., Wang, F. (2017) Water resources stress assessment and risk early warning – A case of Hebei Province, China. *Ecological Indicators*, **73**, 358-368. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.048>
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Nguyen, H. Q., Luu, C., Dang, K. B., Li, Y., Zhang, X. (2020) New approach of water quantity vulnerability assessment using satellite images and GIS-based model: An application to a case study in Vietnam. *Science of the Total Environment*, **737**, 139784. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139784>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., Elmagarmid, A. (2016) Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, **5**, 210. <http://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>

- Pandey, V. P., Babel, M. S., Shrestha, S., Kazama, F. (2011) A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins. *Ecological Indicators*, **11**(2), 480-488. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.07.003>
- Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J. P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., Li, X., Crowell, S., Wu, X., Doughty, R., Zhang, Y., Wang, X., Chen, B., Zhang, C., Song, L., Liu, F., Narteau, C., Wang, T., Niu, Z., Liu, Q., Yao, Y., Chen, J., Norouzi, H., Fernandez-Moran, R., Mialon, A., Law, B. E., Dirmeyer, P. A., Dolman, A. J., Ozdogan, M., Bible, K., McCabe, M. F., Van Der Schalie, R., Wigneron, J. P., Fan, L., Ciais, P., Brandt, M. (2019) Flexibility and intensity of global water use. *Nature Sustainability*, **2**(6), 515-523. <http://doi.org/10.1038/s41893-019-0294-5>
- Safavi, H. R., Golmohammadi, M. H., Sandoval-Solis, S. (2016) Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology*, **539**, 625-639. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.064>
- Saraiva Okello, A. M. L., Masih, I., Uhlenbrook, S., Jewitt, G. P. W., Van Der Zaag, P., Riddell, E. (2015) Drivers of spatial and temporal variability of streamflow in the Incomati River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**(2), 657-673. <http://doi.org/10.5194/hess-19-657-2015>
- Schaefer, T., Udenio, M., Quinn, S., Fransoo, J. C. (2019) Water risk assessment in supply chains. *Journal of Cleaner Production*, **208**, 636-648. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.090>
- Shafiei, M., Rahmani, M., Gharari, S., Davary, K., Abolhassani, L., Teimouri, M. S., Ghahresifard, M. (2022) Sustainability assessment of water management at river basin level: Concept, methodology and application. *Journal of Environmental Management*, **316**, 115201. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115201>
- Tu, Y., Chen, K., Wang, H., Li, Z. (2020) Regional water resources security evaluation based on a hybrid fuzzy BWM-TOPSIS method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**(14), 4987. <http://doi.org/10.3390/ijerph17144987>
- Wang, X., Chen, Y., Li, Z., Fang, G., Wang, Y. (2020) Development and utilization of water resources and assessment of water security in Central Asia. *Agricultural Water Management*, **240**, 106297. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106297>
- Wang, X., Chen, Y., Fang, G., Li, Z., Liu, Y. (2022) The growing water crisis in Central Asia and the driving forces behind it. *Journal of Cleaner Production*, **378**, 134574. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134574>
- Wijitkosum, S., Sriburi, T. (2019) Fuzzy AHP integrated with GIS analyses for drought risk assessment: A case study from upper Phetchaburi River Basin, Thailand. *Water*, **11**(5), 939. <http://doi.org/10.3390/w11050939>
- Xiao, Z., Gao, J., Su, Y. (2019) China's water risk assessment and industrial source analysis based on the localization of WWF water risk assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, **78**, 106285. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106285>
- Yang, P., Zhang, S., Xia, J., Chen, Y., Zhang, Y., Cai, W., Wang, W., Wang, H., Luo, X., Chen, X. (2022) Risk assessment of water resource shortages in the Aksu River Basin of northwest China under climate change. *Journal of Environmental Management*, **305**, 114394. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114394>
- Zhang, C., Li, J., Zhou, Z., Sun, Y. (2021) Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, **120**, 106974. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106974>
- Zheng, X., Wang, C., Cai, W., Kumm, M., Varis, O. (2016) The vulnerability of thermoelectric power generation to water scarcity in China: Current status and future scenarios for power planning and climate change. *Applied Energy*, **171**, 444-455. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.030>
- Zhou, F., Su, W., Zhang, F. (2019) Influencing indicators and quantitative assessment of water resources security in karst region based on PSER model – The case of Guizhou. *Sustainability*, **11**(20), 5671. <http://doi.org/10.3390/su11205671>

- Zhou, F., Zhang, W., Su, W., Peng, H., Zhou, S. (2021) Spatial differentiation and driving mechanism of rural water security in typical “engineering water depletion” of karst mountainous area – A lesson of Guizhou, China. *Science of the Total Environment*, **793**, 148387. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148387>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (1995) *Method 551.1: Determination of chlorination disinfection byproducts, chlorinated solvents, and halogenated pesticides/herbicides in drinking water by liquid-liquid extraction and gas chromatography with electron-capture detection*. Relatório 1.0, 61 pp.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (2009) *National primary drinking water regulation*. Relatório EPA HQ-OW-2023-0572, 23 pp.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency (2002) *Trihalometanes in drinking water: sampling, analysis, monitoring and compliance*. Relatório EPA 570/9-83-002, 53 pp.
- Valentini, M. H. K., Santos, G. B., Franz, H. S., Loebens, L., Guedes, H. A. S., Vieira, B. M., Romani, R. F. (2021) Análise estatística de correlação e de variância do monitoramento da água bruta da Estação de Tratamento de Água Terras Baixas-Pelotas/RS. *Revista Thema*, **19**(3), 600-614. Acesso em 14 de março de 2024, disponível em: <https://doi.org/10.15536/thema.V19.2021.600-614.1702>
- Wu, J., He, F., Xu, D., Wang, R., Zhang, X., Xiao, E., Wu, Z. (2011) Phosphorus removal by laboratory-scale unvegetated vertical-flow constructed wetland systems using anthracite, steel slag and related blends as substrate. *Revista Water Science and Technology*, **63**(11), 2719-2724. Acesso em 20 de janeiro de 2024, disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2011.573>
- Yang, F., Antonietti, M. (2020) Artificial humic acids: sustainable materials against climate change. *Revista Advanced Science*, **7**(1), 1902992. Acesso em 01 de fevereiro de 2024, disponível em: <https://doi.org/10.1002/advs.201902992>