PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA DE ECONOMIA E NEGÓCIOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SUSTENTABILIDADE

SABRINA LOUZADA DE AZEVEDO CASTRO

O USO DE TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS

CAMPINAS

2026

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA DE ECONOMIA E NEGÓCIOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SUSTENTABILIDADE

SABRINA LOUZADA DE AZEVEDO CASTRO

O USO DE TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS

Dissertação apresentada com o propósito de obter o título de mestre no curso de Mestrado em Sustentabilidade, junto ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sustentabilidade da Escola de Economia e Negócios da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

Coorientador: Prof. Dr. Duarcides Ferreira Mariosa

CAMPINAS

2026

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Castro, Sabrina Louzada de Azevedo

C355u O Uso de Tecnologias de Informação e Comunicação Para a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos / Sabrina Louzada de Azevedo Castro. - Campinas: PUC-Campinas, 2026.

90

Orientador: Orandi Mina Falsarella. Coorientador: Durarcides Ferreira Mariosa

Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) - , Escola de Economia e Negócios, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Gestão de Recursos Hídricos. 2. Segurança Hídrica. 3. Tecnologias da Informação e Comunicação. I. Mina Falsarella, Orandi. II. Ferreira Mariosa, Durarcides III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola de Economia e Negócios. . IV. Título.

SABRINA LOUZADA DE AZEVEDO CASTRO

O USO DE TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS.

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Sustentabilidade da PUC-Campinas, e aprovada pela Banca Examinadora.

APROVADO: **05 de outubro de 2026**

gov.br Documento assinado digitalmente
ORANDI MINA FALSARELLA
Data: 13/10/2026 10:49:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella
(Orientadora - PUC-CAMPINAS)

Prof.ª Dr.ª Bruna Angela Branchi
(PUC - CAMPINAS)

gov.br Documento assinado digitalmente
CRISTIANO CAPELLANI QUARESMA
Data: 13/10/2026 10:59:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma
(UNINOVE)

DEDICATÓRIA

O caminho até aqui não foi fácil, mas ensinou-me que sempre é possível seguir em frente quando se encontra coragem para superar os próprios limites e disposição para dar o próximo passo.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que estiveram ao meu lado e me apoiaram em cada etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo privilégio de ter uma família que nunca deixou de acreditar em mim.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) Processo número: 2024/13020-4, pelo apoio e financiamento que tornaram este trabalho possível.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade e a todos os docentes que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella, pela dedicação, incentivo constante e por acreditar neste trabalho. Sua confiança foi fundamental para que esta pesquisa chegasse até aqui.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Duarcides Ferreira Mariosa, pelas contribuições e sugestões fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha amiga Rosemeire Diniz, que, desde o primeiro dia, não soltou minha mão durante esta jornada.

RESUMO

As mudanças climáticas têm provocado eventos extremos como secas prolongadas, chuvas intensas e inundações muito acima da média. Esses fenômenos geram prejuízos incalculáveis para a população e para os governos, afetando diretamente a segurança hídrica, já que comprometem a disponibilidade de água em quantidade e qualidade. Diante desse cenário, torna-se fundamental monitorar a segurança hídrica com base em indicadores, cuja coleta, processamento e análise podem ser aprimorados pelo uso de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC). Este projeto de pesquisa de caráter interdisciplinar, desenvolvido em parceria com a Agência das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), tem como objetivo reunir e analisar informações acadêmicas sobre o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação inovadoras que possam ser utilizadas para o monitoramento da segurança hídrica. A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem exploratória e descritiva e adota procedimentos quantitativos e qualitativos que teve como desafio metodológico integrar revisão sistemática da literatura científica, pesquisa documental e consultas a especialistas. Como resultados, foram identificadas e sistematizadas Tecnologias da Informação e Comunicação inovadoras aplicáveis ao monitoramento da segurança hídrica, bem como os principais indicadores utilizados, as tecnologias atualmente empregadas por especialistas, aquelas com potencial de aplicação e as principais dificuldades relacionadas à sua implementação. A integração entre as evidências da literatura e a percepção dos especialistas possibilitou a elaboração de recomendações para subsidiar o monitoramento da segurança hídrica em bacias hidrográficas. Conclui-se que as TICs apresentam maior potencial quando organizadas de forma integrada. O monitoramento automatizado da segurança hídrica depende de uma arquitetura capaz de articular as tecnologias que, nessa perspectiva, podem transformar dados dispersos em informações úteis, favorecendo diagnósticos mais rápidos, previsões mais consistentes e decisões mais fundamentadas e fornecendo um suporte mais eficiente à tomada de decisão na gestão sustentável dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Gestão de Recursos Hídricos; Segurança Hídrica; Tecnologias da Informação e Comunicação; Indicadores.

ABSTRACT

Climate change has triggered extreme events such as prolonged droughts, heavy rainfall, and flooding far beyond average levels. These phenomena cause incalculable losses for communities and governments, directly affecting water security by compromising water availability in terms of both quantity and quality. Given this scenario, indicator-based monitoring of water security becomes essential, and the collection, processing, and analysis of indicator data can be enhanced through the use of Information and Communication Technologies (ICTs). This interdisciplinary research project, developed in partnership with the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí River Basins Agency (PCJ), aims to gather and analyze scholarly information on innovative Information and Communication Technologies that can be used to monitor water security. The research is applied in nature, adopts an exploratory and descriptive approach, and uses quantitative and qualitative methods. Its methodological challenge was to integrate a systematic review of the scientific literature, documentary research, and consultations with experts. The study identified and systematically organized innovative Information and Communication Technologies applicable to water security monitoring, along with the main indicators used, the technologies currently employed by experts, those with potential for application, and the main challenges associated with their implementation. Integrating evidence from the literature with experts' perspectives enabled the development of recommendations to support water security monitoring in river basins. The study concludes that ICTs offer greater potential when implemented in an integrated manner. Automated water security monitoring depends on an architecture capable of integrating these technologies, which can then transform fragmented data into useful information, enabling faster assessments, more reliable forecasts, and better-informed decisions, while providing more effective support for decision-making in sustainable water resources management.

Keywords: Water Resources Management; Water Security; Information and Communication Technologies; Indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Dimensões do ISH 22

Figura 2 — Previsões do Grau de Segurança Hídrica para 2035 23

Figura 3 — Arquitetura do sistema UrbanWQEWIS 31

Figura 4 — Fluxograma Metodológico da Análise Bibliométrica 38

Figura 5 — Equações booleanas utilizadas para busca de dados nas bases da Scopus e Web of Science 39

Figura 6 — Fluxograma de seleção de artigos - Método PRISMA 43

Figura 7 — Gráfico de formação acadêmica 53

Figura 8 — Tempo de Atuação 54

Figura 9 — Gráfico de tipo de Instituição 55

Figura 10 — Proposta de Sistema de monitoramento hídrico das Bacias PCJ com uso de TICs inovadoras 67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Indicadores e índices para avaliação da segurança hídrica: exemplos na literatura 25

Quadro 2 — Palavras-chave selecionadas sobre TIC na gestão de recursos hídricos: agrupamentos, conexões e ocorrências 41

Quadro 3 — TIC e suas aplicações identificadas na revisão sistemática da literatura 47

Quadro 4 – TIC e sistemas de informação utilizados na gestão de recursos hídricos, segundo os especialistas 55

Quadro 5 — Indicadores utilizados na gestão de recursos hídricos, segundo os especialistas 59

Quadro 6 — Potencialidades das TIC para o monitoramento e a gestão da segurança hídrica, segundo os especialistas 61

Quadro 7 — Dificuldades de implantação e uso das TIC na gestão da segurança hídrica, segundo os especialistas 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMCE — Análise Multicritério Espacial

ANA — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BI — *Business Intelligence*

BIM — *Building Information Modeling*

Chl-a — clorofila-a

CIIAGRO — Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas

CNRH — Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CS-BP — *Cuckoo Search–Back Propagation*

CTPA — Câmara Técnica de Planejamento e Articulação

DAEE — Departamento de Águas e Energia Elétrica

DEA — Análise Envoltória de Dados

DM — *Data Mining*

EPPO — Estudos, Planos, Projetos e Obras

ESG — *Environmental, Social and Governance*

FAPESP — Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FM — gerenciamento de instalações

GPRS — *General Packet Radio Service*

IA — Inteligência Artificial

IAC — Instituto Agronômico

ICT / ICTs — *Information and Communication Technologies*

IoT — *Internet of Things*

IPCC — Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ISH — Índice de Segurança Hídrica

IWRM — gestão integrada dos recursos hídricos

MIDR — Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional

ML — *Machine Learning*

OCDE — Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ODS — Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU — Organização das Nações Unidas

OWA — *Ordered Weighted Averaging*

PCJ — Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí

PEMBH — Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas

PER — Pressão-Estado-Resposta

PERH — Planos Estaduais de Recursos Hídricos

PNRH — Plano Nacional de Recursos Hídricos

PNSH — Plano Nacional de Segurança Hídrica

PRH — Planos de Recursos Hídricos

PRISMA — *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*

PSH — Plano de Segurança Hídrica

SAD — Sistemas de Apoio à Decisão

SAISP — Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo

SNSH — Secretaria Nacional de Segurança Hídrica

SAW — *Simple Additive Weighting*

SETEG — Sociodemográfico, Econômico, Tecnológico, Ecológico e Governança

SIG — Sistema de Informação Geográfica

SIMQUA — Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas

SINGREH — Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SMS — *Short Message Service*

SPA — *Set Pair Analysis*

TCLE — Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

TIC — Tecnologias da Informação e Comunicação

TN — Nitrogênio total

TP — Fósforo total

UNESCO — Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UTA — Unidades Territoriais de Análise

WSI — *Water Security Index*

WSS — Serviços de Água e Saneamento

SUMÁRIO

1. Introdução **14**
1.1 Contextualização do problema 14
1.2 Objetivo geral e objetivos específicos 17
1.3 Justificativa 18
1.4 Estrutura do trabalho 19
2. Fundamentação teórica **20**
2.1. Gestão de recursos hídricos e segurança hídrica 20
2.2. Indicadores 26
2.3 Tecnologias da informação e comunicação inovadoras 31
2.3.1 IoT (Internet of Things) 31
2.3.2 Sensoriamento remoto (Remote Sensing) 33
2.3.3 Big Data 33
2.3.4. Business Intelligence 34
2.3.5 Inteligência Artificial 34
2.3.6 Data Mining 36
2.3.7 Machine Vision 36
2.3.8 Realidade Virtual e Realidade Aumentada 37
2.3.9 Sistemas de apoio à decisão 37
3. Metodologia da pesquisa **38**
3.1 Abordagem metodológica 38
3.2 Coleta e seleção de dados 39
3.3 Tratamento e análise dos dados 41
3.4 Análise das palavras-chave 42
3.5 Análise de conteúdo dos artigos relevantes 44
3.6 Acompanhamento da Aplicação do Roteiro de Entrevistas Semiestruturadas 45
3.7 Descrição de como os resultados da pesquisa serão apresentados 47
4. Resultados **49**
4.1 TIC selecionadas a partir da revisão sistemática da literatura 49
4.2 TIC inovadoras e possíveis indicadores que vêm sendo utilizados na visão dos especialistas 55
4.3 TIC com potenciais de utilização e com dificuldade de implantação na visão dos especialistas 62
4.4 Sistematização e proposta de recomendações de TICs para monitoramento da segurança hídrica 68
Fonte: Elaborada pelo autor (2026) 69
5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros **72**
Referências **75**
ANEXO 1 85
Roteiro de entrevistas semiestruturado **85**

1. Introdução

1.1 Contextualização do problema

Conforme Young et al. (2015), a pressão sobre os recursos hídricos intensifica-se pela convergência entre as mudanças climáticas e fatores antropogênicos, como o crescimento populacional, a urbanização acelerada, a expansão da infraestrutura e a poluição. Esse quadro gera alterações críticas nos regimes hidrológicos, impactando padrões de precipitação, umidade do solo, geleiras e reservas subterrâneas, além de ampliar a frequência e a severidade de eventos extremos, como secas e inundações.

Os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), especialmente o Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas de 2007, evidenciam a influência humana no aquecimento global, apontando aumento significativo da concentração de gás carbônico desde a Revolução Industrial, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento. As projeções deste relatório indicam elevação da temperatura média global entre 1,8ºC e 4ºC até 2100, com impactos severos como derretimento de geleiras, elevação do nível do mar e intensificação de eventos climáticos extremos.

Blank (2015) complementa que o Brasil figura entre os maiores emissores de gases de efeito estufa, sendo o desmatamento das florestas tropicais responsável por aproximadamente 62% dessas emissões. Além disso, o IPCC enfatiza que mudanças nos estilos de vida e nos padrões de consumo da população constituem dimensões fundamentais para conter o aquecimento global. As projeções indicam aumento de até 4 °C nas regiões interiores e 3 °C nas áreas costeiras, acompanhado da redução das precipitações no hemisfério sul. Como medidas de mitigação, o relatório propõe a redução das emissões entre 50% e 85% até 2050, o incentivo às fontes alternativas de energia, a criação de mecanismos de créditos de carbono e a implementação de políticas de taxação sobre as emissões.

As mudanças climáticas afetam diretamente o ciclo hidrológico, alterando os padrões de precipitação, a disponibilidade de água e a frequência de eventos extremos (Marengo, 2008). Nesse contexto, a avaliação da segurança hídrica deve incorporar os riscos climáticos e seus efeitos sobre a quantidade, a qualidade e o acesso aos recursos hídricos (IPCC, 2022).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a segurança hídrica refere-se à garantia de disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas para atender às necessidades humanas, sustentar atividades econômicas e preservar os ecossistemas aquáticos. Essa definição incorpora ainda a consideração de um nível aceitável de risco associado a secas e inundações, bem como suas quatro dimensões estruturantes, que servem de referência para o planejamento da gestão da oferta e do uso da água em escala nacional (BRASIL, 2023).

Os Planos de Bacias Hidrográficas, conforme previsto na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), têm como finalidade fundamentar e orientar a implementação das políticas públicas voltadas para os recursos hídricos, além de estabelecer diretrizes para o gerenciamento integrado e sustentável desses recursos no âmbito das respectivas bacias hidrográficas (BRASIL, 1997).

É no contexto das bacias hidrográficas que se evidenciam os processos de escassez e degradação da água, seja pelo uso inadequado ou pela devolução desse recurso aos cursos e reservatórios sem o devido tratamento (Detoni; Dondoni, 2008). Ademais, diante da pressão demográfica e dos efeitos das mudanças climáticas, torna-se imprescindível a adoção de práticas sustentáveis para assegurar o equilíbrio da disponibilidade hídrica no presente e garantir sua manutenção para o consumo futuro (Sugahara et al., 2022).

Nesse espaço territorial, manifestam-se as diferentes fases do ciclo de vida da água: geração por meio dos ciclos hidrológicos naturais, retenção e armazenamento, captação e tratamento, distribuição para consumo e, posteriormente, o tratamento da água utilizada para fins de reuso. Em cada uma dessas etapas, devem ser coletadas informações que, expressas em indicadores, retratem aspectos como consumo, demanda, qualidade e disponibilidade, elementos fundamentais para a avaliação da segurança hídrica (Falsarella; Silva; Mariosa, 2022).

A gestão sustentável da água em uma bacia hidrográfica revela-se, portanto, altamente complexa, pois exige dados e informações sobre a disponibilidade hídrica e o consumo, em um cenário em que variações quantitativas e qualitativas ocorrem de forma contínua (Morais; Fadul; Cerqueira, 2018). Esse processo pode ser facilitado pela interpretação dos dados coletados, processados e analisados, posteriormente disponibilizados sob a forma de indicadores. Uma das principais funções desses instrumentos é converter dados brutos em

informações de fácil compreensão, transformando-os em modelos simplificados da realidade (Kemerich; Ritter; Borba, 2014). Assim, um indicador deve representar o objeto de medição de maneira mais clara e significativa do que o dado isolado, conferindo ao gestor maior capacidade de interpretação e tomada de decisão (Malheiros; Philippi Jr., 2012).

Nesta perspectiva, enfrentar os principais desafios relacionados à segurança hídrica em bacias hidrográficas, isto é, alcançar o equilíbrio entre a disponibilidade de água de qualidade e o volume consumido por determinada população em um período específico, requer o uso de indicadores capazes de subsidiar processos decisórios mais eficazes e consistentes (Pozzebon et al., 2022). Todavia, para que tais indicadores sejam construídos, é necessário coletar informações de forma sistemática e autônoma, processá-las e analisá-las de modo que possam ser devidamente valoradas. Essa coleta deve ocorrer no espaço territorial das bacias hidrográficas, abrangendo múltiplas cidades com diferentes perfis de consumo urbanos, rurais, comerciais, industriais e de serviços, todos dependentes desse recurso essencial (Comitês, 2021).

Com vistas a avaliar a eficácia dos Planos de Bacia e acompanhar a evolução quantitativa e qualitativa das águas, os Relatórios de Situação dos Recursos Hídricos constituem instrumentos de gestão baseados em um conjunto de indicadores. Esses relatórios fornecem informações sobre densidade demográfica, consumo de água, produção de esgoto, áreas contaminadas, parâmetros de quantidade e qualidade dos recursos hídricos, conflitos pelo uso da água, índices de cobertura da rede coletora de esgoto e condições de disposição final de resíduos sólidos domiciliares, entre outros aspectos (Comitês, 2021). Para além da elaboração anual desses relatórios, o acesso cotidiano a parâmetros associados à quantidade e qualidade dos corpos hídricos é de extrema relevância para a tomada de decisão diária na gestão da água (Barbosa; Hanai; Romera e Silva, 2016).

Nesse contexto, a investigação desenvolvida buscou identificar e avaliar Tecnologias da Informação e Comunicação aplicáveis ao monitoramento da segurança hídrica. O foco recai sobre tecnologias emergentes capazes de otimizar a coleta e o tratamento de dados, abrangendo desde ferramentas de coleta de dados como IoT e Sensoriamento Remoto, até métodos avançados de análise e suporte à decisão, tais como *Big Data*, *Business Intelligence* (BI), *Data Mining,* Inteligência Artificial (IA), *Machine Learning* (ML), *Deep Learning, Machine Vision,* Realidade Virtual, Realidade Aumentada e Sistemas de Apoio à Decisão.

Assim, apesar de existirem muitos trabalhos científicos que apresentam TIC que auxiliam no monitoramento da segurança hídrica, é importante avaliar junto aos especialistas que atuam na área de gestão de recursos hídricos, o que pode ser acrescentado para melhorar esse processo. Nesse caso, foram utilizados os resultados obtidos em pesquisa com especialistas realizada pelo Projeto FAPESP de Políticas Públicas denominado Bacias hidrográficas inteligentes: tecnologias inovadoras para o monitoramento da segurança hídrica das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí no Estado de São Paulo, nº 2023/10091-5, que apontou as principais tecnologias inovadoras e indicadores aplicadas à gestão de recursos hídricos, especialmente a segurança hídrica.

A questão central que orienta este estudo é: como as TIC inovadoras podem otimizar a coleta e análise de dados para contribuir com o monitoramento da segurança hídrica em bacias hidrográficas?

1.2 Objetivo geral e objetivos específicos

Assim, o objetivo principal deste trabalho é analisar o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação inovadoras que possam ser utilizadas para o monitoramento da segurança hídrica

Para esse projeto de pesquisa os objetivos específicos são:

1. Mapear e analisar as TIC inovadoras utilizados no contexto da segurança hídrica aplicando-se a técnica de revisão sistemática de literatura em bases acadêmicas;
2. Identificar, a partir de um roteiro de entrevistas semiestruturadas que foi aplicado junto a especialistas que atuam na área de gestão de recursos hídricos, quais TIC inovadoras e possíveis indicadores já estão sendo utilizados;
3. Apresentar as convergências e divergências entre as TIC obtidas na revisão sistemática da literatura e as descritas pelos especialistas
4. Sistematizar e propor recomendações sobre as Tecnologias de Informação e Comunicação com potencial de utilização na tarefa de monitoramento automatizado da segurança hídrica.

No trabalho, entende-se por tecnologias inovadoras as TIC que podem ser utilizadas para coleta de dados, análises e predições que, em seu uso conjunto e integrado, podem auxiliar o processo decisório a partir do monitoramento da segurança hídrica.

1.3 Justificativa

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de identificar e avaliar Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) e tecnologias emergentes como *Internet of Things* (IoT), Big Data, *Business Intelligence* (BI), Inteligência Artificial, *Machine Vision*, Realidade Virtual, Realidade Aumentada e outras com potencial para aprimorar o monitoramento e a gestão da segurança hídrica. Nesse sentido, o estudo busca reunir e sistematizar informações documentais, acadêmicas e técnicas que fundamentam a aplicação dessas soluções.

Garantir a segurança hídrica em bacias hidrográficas exige o equilíbrio entre a disponibilidade de água de qualidade e o volume consumido por determinada população em um período específico. Para tanto, torna-se indispensável o monitoramento de indicadores robustos, capazes de orientar decisões mais eficazes e estratégicas. A obtenção desses indicadores depende da coleta, processamento e análise de informações diretamente no território da bacia, o que, no caso das Bacias PCJ, envolve múltiplos municípios com diferentes perfis de consumo e setores econômicos fortemente dependentes da água.

A escassez e a degradação da água nas bacias hidrográficas decorrem tanto do uso inadequado quanto da devolução de efluentes sem tratamento adequado, agravadas pela pressão demográfica e pelos efeitos das mudanças climáticas. Garantir o equilíbrio entre a disponibilidade hídrica atual e as necessidades futuras requer a implementação de ações sustentáveis e contínuas. É nesse espaço que se concentram todas as fases do ciclo da água, geração, retenção, armazenamento, captação, tratamento, distribuição e reuso, etapas nas quais a coleta de informações é essencial para compor indicadores que expressem consumo, demanda e qualidade da água, elementos centrais da segurança hídrica.

A gestão hídrica, entretanto, demanda dados simultâneos sobre disponibilidade e consumo, acompanhando variações quantitativas e qualitativas em tempo real. O uso de indicadores facilita esse processo ao transformar dados brutos em informações capazes de representar a realidade de forma simplificada e significativa, auxiliando na tomada de decisão e no planejamento estratégico.

1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1, apresentam-se a contextualização do problema, os objetivos da pesquisa e a justificativa do estudo.

O Capítulo 2 descreve a fundamentação teórica, na qual são discutidos os principais conceitos relacionados à gestão de recursos hídricos, à segurança hídrica e às tecnologias inovadoras.

No Capítulo 3, descreve-se a metodologia utilizada para a elaboração da pesquisa, incluindo os estudos realizados, os procedimentos adotados, os métodos de tratamento e análise, a coleta de dados e as ferramentas empregadas para a interpretação dos resultados obtidos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados alcançados, destacando as tecnologias e os indicadores identificados como potenciais instrumentos para o monitoramento, a segurança e a aplicabilidade das TICs na gestão sustentável dos recursos hídricos.

No Capítulo 5, são expostas as conclusões do estudo, acompanhadas de sugestões para a continuidade da pesquisa.

Por fim, as Referências utilizadas, consolidando a base documental e acadêmica que sustenta o trabalho.

2. Fundamentação teórica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica da pesquisa, construída por meio de pesquisa bibliográfica organizada em três eixos: gestão de recursos hídricos e segurança hídrica; indicadores; e tecnologias e abordagens digitais aplicáveis ao monitoramento e à gestão dos recursos hídricos.

2.1. Gestão de recursos hídricos e segurança hídrica

A gestão de recursos hídricos constitui um conjunto articulado de ações voltadas ao planejamento, normatização, controle e uso sustentável da água, sendo considerada elemento essencial para assegurar a confiabilidade no abastecimento de setores estratégicos, como o urbano, o agrícola e o energético. Conforme observa Marques (2019), esse processo abrange desde a formulação de diretrizes até a organização de sistemas administrativos, exigindo ciclos contínuos de avaliação e adaptação para enfrentar cenários futuros marcados pela incerteza.

Ainda segundo o autor, a ausência de uma gestão eficaz repercute diretamente sobre a população, o meio ambiente e a economia, manifestando-se em eventos como racionamentos, conflitos entre usuários, poluição de mananciais e perdas na produção agrícola. O aprimoramento da gestão, portanto, revela-se indispensável. No entanto, no contexto brasileiro, persistem desafios relacionados à integração dos instrumentos legais, à sustentabilidade financeira e à capacitação técnica das instituições responsáveis.

A Lei nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelece a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos (PRH) como estratégias de longo prazo fundamentais para o gerenciamento e execução dessa política (Brasil, 1997). Entre esses planos, destacam-se os Planos de Bacias Hidrográficas, elaborados pelos Comitês de Bacias Hidrográficas, conforme assinala Pizella (2015).

Essa política também instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, fundamentado em princípios estruturantes: a concepção da água como bem de domínio público; o reconhecimento de sua natureza limitada e de seu valor econômico; e a priorização, em situações de escassez, do consumo humano e da dessedentação de animais. Além disso, a gestão deve assegurar o uso múltiplo das águas e considerar a bacia hidrográfica como unidade territorial básica. Outro princípio relevante é a descentralização da gestão, que deve contar com a participação ativa do poder público, dos usuários e das comunidades (Brasil, 1997).

Os Planos de Recursos Hídricos, como o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), os Planos Estaduais de Recursos Hídricos (PERH) e os Planos de Bacias Hidrográficas, configuram instrumentos previstos na legislação e são fundamentais para a gestão eficaz. Esses planos estabelecem ações voltadas ao alcance de objetivos e metas específicas, cujo progresso é monitorado por meio de indicadores previamente definidos.

Complementarmente, Trindade e Scheibe (2019) destacam que muitos Comitês de Bacias Hidrográficas ainda enfrentam obstáculos significativos para exercer plenamente suas funções, em razão da insuficiência de apoio técnico, financeiro e administrativo. Nesse contexto, a revisão periódica dos planos torna-se imprescindível não apenas para ajustar estratégias, mas também para fortalecer a capacidade institucional desses comitês na promoção de uma gestão descentralizada e efetiva. Além disso, tal revisão deve projetar objetivos e metas realistas e adaptáveis às condições dinâmicas, reforçando a necessidade de processos integrativos que permitam tanto uma avaliação crítica quanto a síntese das evidências disponíveis, orientando a gestão sustentável dos recursos hídricos.

O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) constitui a estrutura responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. É composto por órgãos federais e estaduais, comitês de bacia e agências, articulando ações voltadas ao uso e à preservação da água. O Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), por sua vez, é elaborado com ampla participação social e consultas públicas, sob coordenação do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), por meio da Secretaria Nacional de Segurança Hídrica, em articulação com a Câmara Técnica de Planejamento e Articulação (CTPA) e com apoio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), definindo prioridades para o ciclo subsequente de gestão (Brasil, 2025).

Segundo a ANA (Brasil, 2022), o PNRH 2022–2040 constitui instrumento orientador da gestão hídrica nacional, estruturado em três volumes: Diagnóstico e Prognóstico, Plano de Ação e Anexo Normativo. O primeiro volume, fundamentado no Relatório de Conjuntura 2021, analisa a situação atual e projeta cenários futuros. O segundo volume define programas, subprogramas, diretrizes, ações e metas até 2040. Já o Anexo Normativo propõe marcos regulatórios a serem submetidos ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) ou ao legislativo.

A coordenação do processo de elaboração do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) cabe à Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH), com apoio técnico da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e articulação da Câmara Técnica de Planejamento e Articulação (CTPA) do CNRH. Alinhado às diretrizes da Resolução CNRH nº 145/2012, o plano consolida a chamada Agenda da Água no país, fortalecendo o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e buscando assegurar a segurança hídrica e o uso sustentável da água em múltiplas dimensões.

A segurança hídrica, conforme definição adotada pela Organização das Nações Unidas (ONU) e incorporada às diretrizes brasileiras, refere-se à garantia de água em quantidade e qualidade suficientes para atender às necessidades humanas, sustentar o desenvolvimento das atividades econômicas e preservar os ecossistemas aquáticos. Essa segurança deve considerar, ainda, um nível aceitável de risco associado a eventos extremos, como secas e inundações, sendo estruturada em quatro dimensões fundamentais: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência (Brasil, 2023).

Segundo a ONU Brasil (2022), "as águas subterrâneas representam 99% de toda a água doce líquida da Terra e, atualmente, fornecem metade do volume captado para uso doméstico pela população global e cerca de 25% de toda a água utilizada para irrigação." Dessa forma, a maior parte da água disponível no planeta é de origem subterrânea, sendo apontada pela UNESCO como alternativa estratégica para enfrentar a crise hídrica global.

De acordo com a ANA (2019), a segurança hídrica decorre da disponibilidade de água em abundância para o atendimento populacional, considerando um nível de risco mensurado a partir dos períodos de estiagem e de cheias. Nesse sentido, a segurança hídrica configura-se como um conjunto de estratégias voltadas a garantir a disponibilidade de água em qualidade e quantidade adequadas para suprir as necessidades humanas. Trata-se de um conceito transversal, aplicado em todas as áreas de desenvolvimento, e que se revela essencial para a administração sustentável dos riscos associados ao uso da água, constituindo elemento central para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil.

> Para alcançar a segurança hídrica, precisamos proteger os sistemas hídricos vulneráveis, mitigar os impactos dos riscos relacionados à água, como enchentes e secas, proteger o acesso às funções e serviços hídricos e gerenciar os recursos hídricos de maneira integrada e equitativo (ONU Brasil, 2022)

O monitoramento da segurança hídrica no Brasil é realizado por meio de uma abordagem sistêmica e contínua, integrando dados técnicos, socioeconômicos e ambientais para avaliar os níveis de risco e a efetividade das intervenções em curso. Segundo a ANA (2025), esse acompanhamento ocorre por meio de boletins anuais publicados no âmbito do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), fundamentados em indicadores como o Índice de Segurança Hídrica (ISH), em análises qualitativas e quantitativas realizadas em Unidades Territoriais de Análise (UTAs), e na avaliação de Estudos, Planos, Projetos e Obras (EPPOs). Essa metodologia permite mapear déficits hídricos, priorizar investimentos estratégicos e construir cenários futuros capazes de subsidiar a tomada de decisões no campo da gestão hídrica.

O Índice de Segurança Hídrica (ISH), integrante do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), constitui instrumento de avaliação do cenário hídrico nacional, permitindo identificar, em escala territorial, as áreas de maior risco. Segundo o PNSH (Brasil, 2025), nas regiões delimitadas pelas Unidades Territoriais de Análise (UTAs) foram conduzidas análises integradas com o objetivo de avaliar e propor soluções estratégicas capazes de atender aos requisitos estabelecidos pelo plano.

Foram identificadas 42 UTAs com problemas críticos de segurança hídrica, demandando estudos específicos para o aprimoramento do cálculo do ISH. Esse aperfeiçoamento envolve a incorporação dos déficits hídricos relacionados às dimensões humana e econômica, além de análises sobre o aproveitamento dos recursos hídricos em regiões caracterizadas por baixo nível de segurança (Brasil, 2023).

O ISH, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), estrutura-se em quatro dimensões fundamentais: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência, apresentados na Figura 1. Essa abordagem busca elucidar, de forma abrangente, as questões relacionadas à segurança hídrica, incorporando o conceito de risco aos usos da água e projetando cenários até o ano de 2035.

Figura 1 — Dimensões do ISH



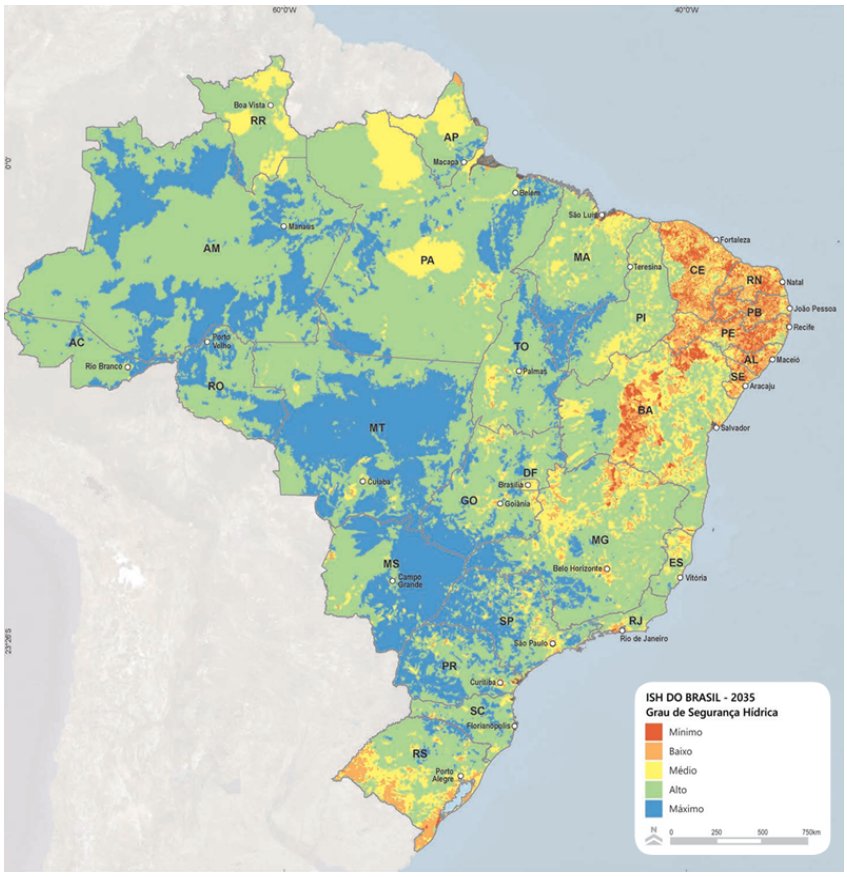
Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019).

Dimensão Humana considera a garantia do abastecimento urbano em todo o território nacional, identificando as áreas com menores índices de segurança hídrica. A Dimensão Econômica analisa os impactos da escassez sobre os setores agropecuário e industrial. A Dimensão Ecossistêmica evidencia a vulnerabilidade dos mananciais frente à poluição e a outras pressões ambientais. Por fim, a Dimensão de Resiliência avalia a capacidade de renovação dos estoques hídricos naturais e artificiais a partir da precipitação.

Na Figura 2, observam-se as delimitações regionais que orientam as estratégias de intervenção propostas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) instituiu o Índice de Segurança Hídrica (ISH) como ferramenta de avaliação integrada da situação hídrica do país, considerando essas quatro dimensões. O ISH foi calculado para os anos de 2017 e 2035, ambos baseados na infraestrutura hídrica existente, diferenciando-se pela inclusão das projeções de demandas setoriais no cenário futuro.

Os resultados indicam que, em 2035, a região Nordeste tende a concentrar as áreas com menor segurança hídrica, enquanto regiões com maior disponibilidade natural de água e menor pressão por uso apresentam os níveis mais elevados de segurança (Brasil, 2025).

Figura 2 — Previsões do Grau de Segurança Hídrica para 2035



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019).

Os indicadores constituem ferramentas que fornecem dados sobre determinado recorte analítico, sintetizando informações para a elaboração de índices. Conforme apresentado por Mitchell (1996), sua principal característica é a capacidade de condensar resultados em parâmetros comparáveis, permitindo a formulação de índices robustos.

Segundo Campos e Melo (2008), os indicadores organizam e monitoram atividades, avaliando se estas são capazes de cumprir metas previamente estabelecidas. Além disso, permitem identificar falhas, propor melhorias e fornecer dados relevantes para o gerenciamento e a tomada de decisão.

Para Siche et al. (2007), há uma confusão recorrente entre os conceitos de índice e indicador, frequentemente empregados como sinônimos. Contudo, os indicadores correspondem a ferramentas que possibilitam a obtenção de informações a partir de dados isolados ou combinados, funcionando como pré-tratamento dos dados originais. Já o índice é o

valor resultante de um conjunto de cálculos que utiliza os indicadores como variáveis. Assim, enquanto os indicadores atuam como parâmetros preliminares de análise, os índices consolidam essas informações em instrumentos de previsão e tomada de decisão.

O Índice de Segurança Hídrica (ISH) foi construído com base em estudos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e de outras instituições. Para sua formulação, estruturou-se o inventário de Estudos, Planos, Projetos e Obras (EPPOs), abrangendo iniciativas em diferentes estágios de concepção, planejamento e implantação. A partir desse indicador, foram definidas Unidades Territoriais de Análise (UTAs) que concentram os maiores níveis de risco nas dimensões humana e econômica. Nessas UTAs, a metodologia integrou dados de risco e de infraestrutura para selecionar intervenções alinhadas aos critérios do Programa Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), adotando processo semelhante no controle de cheias (ANA, 2025).

Em síntese, a segurança hídrica, entendida como a garantia de oferta de água em quantidade e qualidade adequadas sob risco controlado de secas e cheias (ANA, 2025), depende da integração entre diagnóstico espacial, planejamento de intervenções e avaliação sistemática por indicadores. Os mapas temáticos elaborados pela ANA permitem hierarquizar regiões e selecionar ações do Plano de Segurança Hídrica (PSH) conforme grau de vulnerabilidade, escopo e custo. Os indicadores, ao condensar informações em índices comparáveis (Mitchell, 1996; Campos e Melo, 2008), fornecem referência objetiva para a alocação de recursos, o monitoramento de resultados e a revisão de metas.

2.2. Indicadores

Pereira e Rodriguez (2022) ressaltam que a garantia da segurança hídrica no Brasil depende da ampliação do acesso à água e ao saneamento, do fortalecimento das instituições responsáveis e do aprimoramento dos mecanismos de monitoramento, especialmente por meio de indicadores de biodiversidade, qualidade da água, poluição difusa e consumo setorial.

Segundo Gomes e Malheiros (2012), os indicadores de sustentabilidade podem ser agrupados conforme o número de dimensões contempladas. Há indicadores voltados a um único aspecto do desenvolvimento, como os ambientais, e outros que integram diferentes dimensões, como o uso de energia per capita, que envolve fatores econômicos e sociais. Os autores destacam que os indicadores ambientais, por comporem a base dos indicadores de

sustentabilidade, são fundamentais para compreender as condições e transformações ambientais, auxiliando na formulação de políticas e práticas sustentáveis.

O índice, por sua vez, é entendido como um valor agregado resultante de cálculos que utilizam indicadores como variáveis componentes, funcionando como medida sintética. Nesse sentido, os indicadores refletem condições específicas do sistema analisado, enquanto os índices consolidam diferentes informações em um resultado numérico capaz de subsidiar decisões e previsões (Siche et al., 2007).

Diversas instituições nacionais e internacionais têm desenvolvido propostas de indicadores voltados à gestão hídrica. A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), por exemplo, apresenta o modelo Pressão-Estado-Resposta (PER), aplicado às captações de água e ao tratamento de efluentes, amplamente utilizado em avaliações ambientais. No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) adota indicadores de governança e segurança hídrica no âmbito do Pacto Nacional pela Gestão das Águas, visando monitorar, apoiar decisões e mapear necessidades de recursos e capacitação. Estudos nacionais complementares (Sugahara et al., 2022) reforçam a relevância desses instrumentos para diagnósticos e tomadas de decisão em segurança hídrica.

O Quadro 1 apresenta exemplos de indicadores e índices aplicados à gestão de recursos hídricos.

Quadro 1 — Indicadores e índices para avaliação da segurança hídrica: exemplos na literatura

Indicador / índice	Descrição	citação
Indicadores de segurança hídrica baseado no modelo DPSIR	Desenvolve um sistema de avaliação da segurança hídrica baseado no modelo Força Motriz–Pressão–Estado–Impacto–Resposta (DPSIR). Utiliza o método de ponderação por entropia e a análise de pares de conjuntos (Set Pair Analysis — SPA), por meio do grau de conexão de cinco elementos, para classificar os níveis de segurança hídrica. Aplica um modelo de previsão cinza para estimar tendências futuras da segurança hídrica no noroeste da China.	(Li, *et al.*, 2024)
Indicadores compostos de pressão, estado e	Propõe um modelo fuzzy baseado na Análise Envoltória de Dados pelo método do Benefício da Dúvida (BoD-DEA), utilizado para	(De Castro-Pardo; Fernández Martínez; Pérez Zabaleta, 2022)

resposta da segurança hídrica	construir três indicadores compostos associados às dimensões Pressão, Estado e Resposta (PSR). Nove indicadores são agregados para avaliar a segurança hídrica em dez países europeus, considerando cenários pessimista, otimista e neutro. O modelo permite determinar pesos por meio de otimização e comparar o desempenho relativo dos países.	
Indicadores de risco hídrico superficial e subterrâneo	Desenvolve uma estrutura interdisciplinar de avaliação de riscos hídricos que integra indicadores quantitativos e qualitativos relacionados ao estresse hídrico superficial e subterrâneo, à qualidade da água, às condições regulatórias e aos conflitos entre usuários. A metodologia foi aplicada a 38 sub-bacias em Ontário, Canadá, classificando os riscos para subsidiar decisões e práticas de gestão sustentável dos recursos hídricos.	(Sandhu, *et al.*, 2023)
Índice de risco hídrico e estresse hídrico	A Ferramenta de Risco Hídrico H08 utiliza o modelo H08 de código aberto e adere a um rigoroso protocolo internacional de simulação para garantir a transparência dos resultados. O H08 é composto por seis submodelos: hidrologia da superfície terrestre, roteamento fluvial, crescimento de culturas, operação de reservatórios, captação de água e fluxo ambiental. O modelo H08 original foi recentemente atualizado para refletir o uso da água com precisão, incluindo retirada de água, consumo, fluxo de retorno e perda de transferência.	(Boulange, *et al.*, 2023)
Índice de Escassez de Água	O índice global de segurança hídrica (GWSI) é calculado pela agregação dos indicadores utilizando métodos de Análise Multicritério Espacial (AMCE). Consideramos os métodos de ponderação aditiva simples (SAW) e de média ponderada ordenada (OWA)	(Gain; Giupponi; Wada, 2016)
Índice de segurança hídrica urbana	Analisa a segurança hídrica urbana em seus cinco domínios SETEG sendo: S - Sociodemográfico, E - Econômico, T - Tecnológico, E - Ecológico e G - Governança.	(Romero-Lankao; Gnatz, 2016)
Índice de segurança hídrica urbana	Desenvolve um índice composto de segurança hídrica (Water Security Index — WSI), utilizando cinco variáveis distribuídas em dois componentes: biofísico, composto por disponibilidade de água, risco climático e vitalidade dos ecossistemas; e socioeconômico, composto por acessibilidade	(Nkiaka, 2022)

	à água e gestão integrada dos recursos hídricos (GIRH). O índice é aplicado em escala nacional para avaliar a segurança hídrica e investigar seus determinantes socioeconômicos em países de regiões em desenvolvimento.	
Índice de segurança hídrica urbana	Apresenta a ferramenta *Water Security Assessment Tool* (WATSAT), estruturada em três níveis de avaliação: dimensões, indicadores e variáveis. A metodologia compreende cinco dimensões e doze indicadores, integrados na construção do Índice de Segurança Hídrica (WSI). As dimensões abrangem abastecimento de água e saneamento, produtividade da água, desastres relacionados à água, ambiente hídrico e governança da água, permitindo uma avaliação multidimensional da segurança hídrica urbana.	(Babel; Chapagain; Shinde, 2023)
Índice de governança da água	Desenvolve um índice composto de segurança hídrica utilizando a Análise Envoltória de Dados (DEA), por meio da abordagem Benefício da Dúvida e Análise Multicritério (BoD-MCA). Agrega nove indicadores distribuídos em quatro dimensões: sustentabilidade dos meios de subsistência; saúde e bem-estar humano; estado do ambiente hídrico; e estabilidade, funções e responsabilidade da sociedade. O modelo foi aplicado a 15 países europeus para comparar seus níveis relativos de segurança hídrica.	(De Castro-Pardo; Fernández Martínez; Pérez Zabaleta, 2022)
Índice de segurança hídrica urbana e Governança da água	Desenvolve um índice composto baseado exclusivamente nas metas e nos indicadores do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), com a finalidade de avaliar os riscos hídricos de maneira integrada. Utiliza sete indicadores associados a cinco metas do ODS 6, organizados em quatro dimensões: acessibilidade à água, qualidade da água, disponibilidade hídrica e governança da água. A metodologia foi aplicada a 232 países e territórios.	(Cai; Zhao; Varis, 2021)
Indicadores de qualidade da água	Desenvolve um modelo de previsão diária da qualidade da água baseado em uma rede neural de retropropagação otimizada pelo algoritmo *Cuckoo Search* (CS-BP). Utiliza nove indicadores de qualidade da água como variáveis a serem previstas: condutividade, clorofila, oxigênio dissolvido, matéria	(Shao, *et al.*, 2018)

	orgânica dissolvida, pH, índice de permanganato, turbidez, nitrogênio total e temperatura da água. O modelo contribui para o monitoramento e a previsão das condições de qualidade hídrica, sem construir um índice sintético de qualidade da água.	
Indicador de oferta e demanda de água e segurança hídrica	Avalia os impactos de cenários de mudanças climáticas, uso do solo e disponibilidade de água para irrigação sobre indicadores de segurança hídrica em uma bacia mediterrânea. Utiliza o modelo hidrológico e de erosão SPHY-MMF para quantificar indicadores como estresse hídrico das plantas, vazões de cheia, erosão das encostas e produção de sedimentos. O estresse hídrico vegetal é estimado em função da disponibilidade de umidade no solo e das condições de irrigação, permitindo avaliar os efeitos de diferentes estratégias de adaptação sobre a segurança hídrica.	(Eekhout, *et al.*, 2024)
Indicadores de desempenho do sistema hídrico urbano	Utiliza oito indicadores para avaliar o abastecimento de água, o resfriamento urbano e a drenagem pluvial, por meio de modelagem de cenários. Analisa as interações entre esses componentes e os efeitos da infraestrutura verde e das fontes alternativas de água no desempenho dos sistemas hídricos urbanos.	(Swinbourne; Kenway; O'Brien, 2024)
Indicadores de segurança hídrica urbana e índice de Theil	Apresenta uma abordagem de avaliação multiescalar da segurança hídrica urbana, utilizando 49 indicadores distribuídos em quatro dimensões. Aplicada à cidade de Campinas (SP), emprega o índice de Theil para mensurar desigualdades espaciais e identificar áreas prioritárias para intervenções voltadas à melhoria da segurança hídrica.	(Marcal, *et al.*, 2024)
Índice de vulnerabilidade hidrológica da vazão	Propõe um indicador adimensional de sensibilidade e vulnerabilidade (k^x), calculado a partir da amplitude de variação entre vazões máximas e mínimas em relação à vazão média. Permite avaliar a vulnerabilidade dos recursos hídricos às variações hidrológicas e subsidiar decisões relacionadas à segurança e à confiabilidade dos sistemas de captação de água.	(Margeta, 2024)

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

2.3 Tecnologias da informação e comunicação inovadoras

O acesso contínuo a informações atualizadas sobre os parâmetros que afetam a

quantidade e a qualidade dos corpos hídricos é crucial para a tomada de decisões na gestão da água. Nesse contexto, as Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) desempenham papel estratégico ao mitigar problemas relacionados à segurança hídrica. Essas tecnologias fornecem dados e informações que sustentam processos decisórios mais eficientes e fundamentados, fortalecendo a gestão integrada dos recursos hídricos.

As TIC possibilitam o monitoramento contínuo das ações implementadas nos planos de bacias hidrográficas, especialmente por meio dos indicadores de segurança hídrica. A coleta em tempo real de grandes volumes de dados e o aprimoramento das análises permitem maior precisão no cálculo dos indicadores, ampliando a capacidade de resposta frente a cenários de risco.

Entre as TIC que podem auxiliar de forma inovadora na gestão sustentável dos recursos hídricos e na promoção da segurança hídrica, destacam-se sistemas de sensoriamento remoto, plataformas de big data, ferramentas de modelagem hidrológica, aplicações de inteligência artificial e soluções baseadas em internet das coisas (IoT). Essas tecnologias permitem integrar dados ambientais, socioeconômicos e climáticos, oferecendo suporte robusto para diagnósticos, planejamento e tomada de decisão em diferentes escalas territoriais.

2.3.1 IoT (*Internet of Things*)

O termo *Internet of Things* (IoT) refere-se a um sistema de sensores responsável pela conexão e transmissão de dados entre dispositivos e a internet, estabelecendo uma rede que integra pessoas e objetos. Trata-se da convergência de tecnologias e dispositivos que, por meio de uma arquitetura comum, possibilitam colaboração mútua (Chen et al., 2011).

Segundo Fazion Filho (2016), a IoT representa uma nova etapa da evolução da internet, na qual não apenas computadores, mas também objetos do cotidiano passam a estar conectados em rede. Esse avanço aprofunda a integração entre protocolos de comunicação e tecnologias eletrônicas, permitindo aplicações como telemetria, coleta de dados em múltiplos ambientes, interação entre pessoas e objetos e fortalecimento da conexão entre IoT e Big Data.

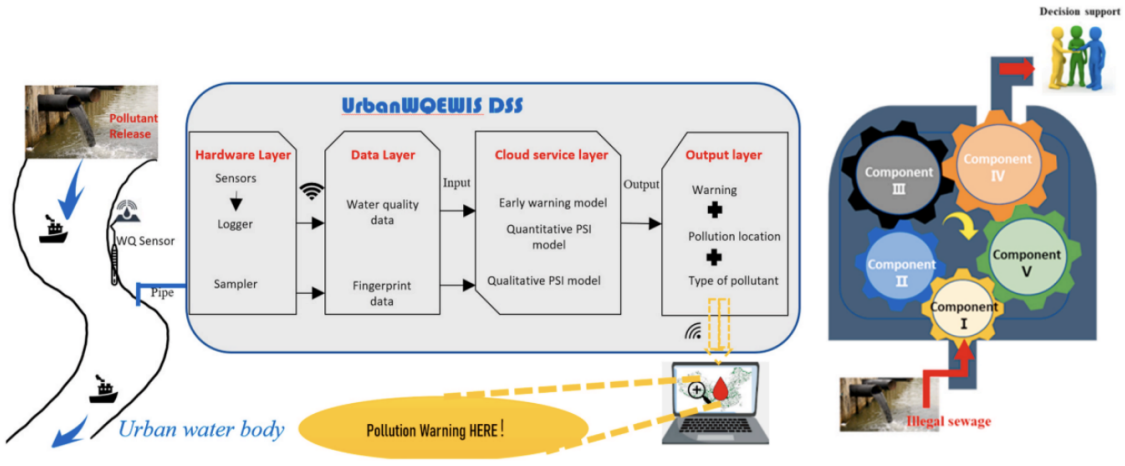
De acordo com Jiang et al. (2023), a IoT pode auxiliar na supervisão da qualidade da água urbana ao integrar sensores, equipamentos de transmissão de dados, modelos computacionais e sistemas de alerta. Essa integração viabiliza a coleta em tempo real de informações por meio de sensores estrategicamente instalados em redes de drenagem e corpos hídricos, contribuindo para o monitoramento contínuo, a emissão de alertas e a identificação de

fontes de poluição.

O estudo utilizou o sistema UrbanWQEWIS (*Urban Water Quality Early Warning and Emergency Disposal Information System*), ilustrado na Figura 3, cujo funcionamento demonstrou eficácia na supervisão da qualidade da água, confirmando a viabilidade e o potencial da aplicação.

Inicialmente, sensores e equipamentos instalados nos corpos hídricos coletam dados de qualidade da água, que são transmitidos para uma camada de armazenamento e processamento. Em seguida, esses dados são analisados por modelos quantitativos e qualitativos hospedados em nuvem, permitindo identificar alterações nos parâmetros monitorados, emitir alertas precoces e localizar possíveis fontes de poluição. Essa arquitetura evidencia como a IoT pode apoiar o monitoramento contínuo da qualidade da água e fornecer informações rápidas e precisas para subsidiar a tomada de decisão pelos gestores.

Figura 3 — Arquitetura do sistema UrbanWQEWIS



Fonte: Jiang et al. (2023, p. 4).

2.3.2 Sensoriamento remoto (*Remote Sensing*)

Segundo Negri e Mendes (2020), o sensoriamento remoto é definido como a aquisição ou predição de informações sobre determinados objetos sem a necessidade de contato físico direto. Do ponto de vista técnico e da observação da Terra, constitui um ramo da geofísica dedicado à análise e interpretação de registros da radiação eletromagnética refletida ou emitida por um alvo, captada por sensores instalados em plataformas orbitais ou aéreas.

De acordo com Meneses e Almeida (2012), em uma abordagem científica, o sensoriamento remoto visa captar imagens da superfície terrestre, possibilitando medições quantitativas das respostas geradas pela interação da radiação eletromagnética com os materiais que a compõem.

Ao permitir o monitoramento de corpos d'água por meio de sensores ópticos, térmicos e de micro-ondas, conforme Karthikeyan, Chawla e Mishra (2020), o sensoriamento remoto possibilita avaliar tanto a qualidade quanto a quantidade da água, além de identificar eventos extremos hidroclimáticos. Dessa forma, fornece dados estratégicos para a gestão dos recursos hídricos, especialmente em áreas onde as medições em campo são limitadas ou inexistentes.

2.3.3 Big Data

Diretamente ligada a IoT, o fenômeno Big Data, segundo Fazion Filho (2016), teve sua expressão associada ao fenômeno do *big bang*, devido à abundância de dados gerados e coletados.

Para Saldanha, Barcellos e Pedroso (2021), Big Data representa componente crucial do campo da ciência de dados, envolvendo estratégias para extração, transformação e carga de dados, modelagem, construção e avaliação de algoritmos descritivos e preditivos, visualização de grandes volumes de dados e implantação de modelos em ambientes de produção para a tomada de decisão.

Procurando exemplificar, o Big Data pode ser utilizado para processar, organizar e analisar grandes volumes de dados relacionados aos recursos hídricos, provenientes de sensores, satélites, modelos climáticos e sistemas ambientais, conforme explicam Xu, Berres, Liu, Allen-Dumas e Sanyal (2022). Essas informações auxiliam na compreensão de fenômenos complexos, como enchentes, secas e qualidade da água, permitindo previsões mais precisas e melhores decisões sobre a gestão ambiental. Os autores afirmam que o Big Data, associado às técnicas de visualização e análise visual, transforma dados complexos em informações claras e colaborativas, facilitando assim, o trabalho de pesquisadores, gestores e órgãos públicos no planejamento e no monitoramento dos recursos hídricos.

2.3.4. *Business Intelligence*

Business Intelligence (BI) é um conceito aplicado aos dados disponíveis nas organizações, explorados por ferramentas que geram relatórios e produzem novos conhecimentos, servindo de suporte à tomada de decisão (Santos e Ramos, 2006).

Segundo Hostmann, Rayner e Herschel (2009, p.13), “BI é um termo abrangente que engloba pessoas, processos e aplicações/ferramentas para organizar informações, possibilitar o acesso a elas e analisá-las, visando aprimorar as decisões e gerenciar o desempenho”.

2.3.5 Inteligência Artificial

A Inteligência Artificial (IA) é composta por modelos, técnicas e tecnologias que auxiliam na busca por novos conhecimentos, por meio da representação de conhecimento, utilização de mecanismos de decisão, percepção, planejamento, processamento de linguagem natural, tratamento de incertezas e aprendizado de máquina, com o objetivo de resolver problemas (Sichman, 2021).

De acordo com Trindade e Oliveira (2024) a IA compõe uma área da ciência da computação cuja finalidade está voltada ao desenvolvimento de algoritmos e modelos inteligentes capazes de executar tarefas associadas à mente humana. Por esse motivo, são capazes de aprender e evoluir com base nos dados que possuem.

Associado ao conceito de IA, emergem outras terminologias que expandem sua aplicação, como:

- ***Machine Learning***: As técnicas de *Machine Learning* (ML) aprendem automaticamente a partir de grandes volumes de dados. Os algoritmos de ML geram hipóteses a partir dos dados (Ludermir, 2021), sendo aplicados para identificar padrões a partir de um conjunto de variáveis com o objetivo de prever resultados específicos (Paixão, 2022).

  Segundo Jamei et al. (2023). Apresentaram um estudo cujos algoritmos conseguiram identificar padrões complexos entre variáveis físico-químicas da água, permitindo estimativas mais rápidas e precisas da condutividade elétrica e bicarbonato onde as técnicas de machine learning integrada a seleção automática de variáveis e redes neurais artificiais melhoram significativamente o desempenho preditivo, tornando o monitoramento dos recursos hídricos mais eficiente e confiável.

- ***Neural Networks***: As Redes Neurais são modelos computacionais que, como descrito por Ferneda (2006), simulam o comportamento das células cerebrais e buscam melhorar, gradualmente, o sistema de aprendizagem a partir de padrões que podem ser apresentados por um agente externo, configurando os processos de aprendizado supervisionado e não supervisionado.

  As Redes Neurais artificiais foram utilizadas para estimar a condutividade elétrica e a concentração de íons bicarbonato em águas superficiais. Segundo Jamei et al.(2023), destacam que essa abordagem no estudo realizado, o modelo desenvolvido apresentou precisão na previsão dos parâmetros de qualidade da água, superando métodos convencionais de análise onde o uso de redes neurais permite interpretar relações complexas entre variáveis, contribuindo para sistemas de monitoramento hídrico mais rápidos, eficientes e com menor custo operacional.

- ***Deep Learning***: O *Deep Learning* tem avançado muito na resolução de problemas que antes eram desafiadores para a comunidade de inteligência artificial, demonstrando eficácia na descoberta de estruturas complexas em grandes bancos de imagens através de um algoritmo de *backpropagation*, que ajusta os parâmetros internos do modelo para aprimorar seu desempenho a cada ciclo de aprendizagem (Souza et al, 2020).

  Segundo Guo et al. (2021), os modelos de deep learning conseguem identificar relações

complexas entre os dados de sensoriamento remoto e os parâmetros de qualidade da água, como clorofila-a, fósforo total e nitrogênio total. O estudo desenvolvido demonstrou que o modelo de deep learning apresentou desempenho superior em comparação com os métodos tradicionais e outros algoritmos de machine learning, permitindo análises longas e superiores sobre a evolução da qualidade da água desde 1984. Além disso, Guo et al. (2021) destacam que essa tecnologia contribui para o monitoramento em larga escala, ajudando programas de preservação e gestão dos recursos hídricos.

2.3.6 *Data Mining*

A Mineração de Dados ou *Data Mining* (DM) é descrita por Galvão e Marin (2009) como uma das técnicas mais eficazes para o processo de extração de conhecimento em meio a grandes volumes de informação de forma rápida e segura permitindo a descoberta de padrões ocultos, relações entre variáveis e regras de predição que podem apoiar instituições em tomadas de decisão mais rápidas e seguras em prazos mais curtos.

Para Cardoso e Machado (2008), DM é o processo de extração de conhecimento de bancos de dados, criando medidas para interpretação e compatibilidade dos dados gerados, o que facilita a descoberta de lacunas e proporciona maior agilidade na busca por informações e na tomada de decisão.

Conforme Barcellos e Souza (2022) explicam, essa técnica permite relacionar parâmetros medidos automaticamente em campo, como pH, temperatura, oxigênio dissolvido e turbidez, com variáveis analisadas em laboratório, possibilitando estimar diversos indicadores sem análises constantes. Um estudo realizado aplicou essa metodologia em 35 estações de monitoramento distribuídas em 27 bacias hidrográficas brasileiras, utilizando dados coletados entre 1971 e 2021. Os resultados mostraram que o uso de data mining conseguiu estimar cerca de 56% dos parâmetros laboratoriais, reduzindo custos e ampliando a cobertura espacial e temporal do monitoramento hídrico. Além disso, os autores destacam que a mineração de dados representa uma ferramenta promissora para apoiar a gestão ambiental, especialmente em países em desenvolvimento com limitações financeiras e estruturais.

2.3.7 *Machine Vision*

Machine Vision é um processo que modela a visão humana e a réplica por meio de software e hardware, permitindo que máquinas identifiquem objetos (Sausen, 2020).

Machine Vision de acordo com Zohdy, et al., (2019) integra câmeras, sensores e algoritmos de processamento capazes de capturar, interpretar e analisar imagens ou fluxos de vídeo para automatizar tarefas antes dependentes da visão humana. Essa tecnologia permite inspeção, monitoramento e controle de qualidade em tempo real, otimizando processos industriais e científicos.

2.3.8 Realidade Virtual e Realidade Aumentada

A Realidade Virtual busca representar a realidade física por meio de várias dimensões, permitindo que as pessoas interajam como se estivessem imersas no ambiente (Botega; Cruvinel, 2009).

De acordo com Netto et al (1998), várias definições são aceitas a respeito da Realidade Virtual devido a sua interdisciplinaridade e constante evolução da área. A Realidade Virtual pode ser vista como uma interface avançada entre usuário e computador, homem-máquina, capaz de simular um ambiente real e interativo podendo defini-lo como um ambiente sintético tridimensional gerado por computador, utilizando canais multissensoriais.

A Realidade Aumentada consiste em aplicações de software que processam em tempo real, combinando elementos virtuais com o ambiente real, e utilizam esses elementos virtuais concebidos em várias dimensões (Botega; Cruvinel, 2009).

Para Lopes et al. (2019) trata-se de um sistema capaz de complementar o mundo real adicionando a ele objetos, imagens que enriquecem a experiência do usuário através de meios tecnológicos como tablets e smartphones possibilitando benefícios a diversas áreas do conhecimento.

2.3.9 Sistemas de apoio à decisão

Os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD), como indicado por Clericuzi, Almeida e Costa (2006), auxiliam no aumento da rapidez e eficácia na resolução de problemas, otimizando o desempenho na coleta de dados e permitindo a realização de análises *ad hoc* que geram novos conhecimentos e fornecem suporte ao processo decisório.

Pinheiro et al. (2024) O SAD identifica e analisa aspectos que podem influenciar seu valor a partir de coleta e alimentação de dados e são capazes de disponibilizarem resultados em múltiplos formatos apoiando os gestores em todo o ciclo de vida da informação após as etapas de planejamento, coleta e análise até a disseminação do conhecimento.

3. Metodologia da pesquisa

3.1 Abordagem metodológica

Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, com objetivos exploratórios e descritivos e abordagem quantitativa e qualitativa. Quanto aos procedimentos técnicos, foram realizadas uma revisão sistemática da literatura e a aplicação de um roteiro de entrevistas semiestruturadas a especialistas, atuam na área de gestão de recursos hídricos. As entrevistas com especialistas tiveram aprovação do Comitê de Ética da Pontifícia Universidade Católica de Campinas com processo na plataforma Brasil número 87065825.2.0000.5481.

A pesquisa aplicada de acordo com Prodanov e Freitas (2013), tem como objetivo a geração de conhecimentos para uso prático, em resposta a problemas específicos envolvendo questões de uma determinada localidade ou grupo.

A pesquisa exploratória segundo Gil (2002), tem como função propiciar maior familiaridade com o problema, de maneira a explicitar ou construir hipóteses. Sendo assim, é possível dizer que seu principal objetivo é aprimorar ideias ou realizar a descoberta de instituições, permitindo, com flexibilidade, a consideração dos diversos atributos de um determinado objeto de estudo, seja por meio do levantamento bibliográfico, entrevistas a pessoas que vivenciaram o problema e análise de exemplos.

A pesquisa descritiva, também definida por Gil (2002), é aquela que descreve fenômenos ou características de um grupo, e que pode, ainda, estabelecer conexões entre suas variáveis. São exemplos apontados pelo autor: o levantamento de dados relativos à idade, sexo, nível de instrução, índice de criminalidade, orientação político-partidária, crenças, opiniões e outros fatores quantificáveis de uma determinada população.

A pesquisa qualitativa para Godoy (1995), se configura como a busca pela compreensão das características, estruturas e/ ou modelos que influenciam fragmentos de informação. Desta forma, é necessário que o analista entenda o sentido da comunicação, como se fosse seu receptor alvo, mas que também se afaste desse, procurando perspectivas distintas a fim de encontrar significados outros.

A pesquisa quantitativa apontada por Rodrigues, Oliveira e Santos (2021) aponta que ela atua sobre um problema de caráter social ou humano, fundamentando-se sobre alguma teoria falseável por meio do estudo de variáveis e números estatísticos. Sendo assim, objetiva

quantificar perfis populacionais, preferências, comportamentos de indivíduos, perfis de populações e outros, trazendo, de forma impessoal, um sentido de dimensão de intensidade entre as partes.

3.2 Coleta e seleção de dados

A técnica empregada para a identificação dos textos relevantes foi a revisão sistemática. Essa abordagem qualitativa sistematiza elementos fundamentais de diversos campos de estudo e é decisiva para investigar a literatura relacionada aos fatores que influenciam a busca por aplicações inovadoras de TIC, que podem ser eficazmente implementadas na gestão sustentável dos recursos hídricos, oferecendo várias contribuições significativas (Vanti, 2002).

Definida como uma abordagem estatística e quantitativa, a bibliometria se concentra em gerar indicadores sobre a produção e disseminação do conhecimento científico (Quevedo-Silva et al., 2016). Essa técnica possibilita a quantificação do conhecimento científico por meio da análise dos padrões de publicações, examinando aspectos como autoria e comportamentos de pesquisa em áreas específicas (Oliveira et al., 2010), além de explorar as dinâmicas de publicação e dos autores envolvidos (Fidelis et al., 2009).

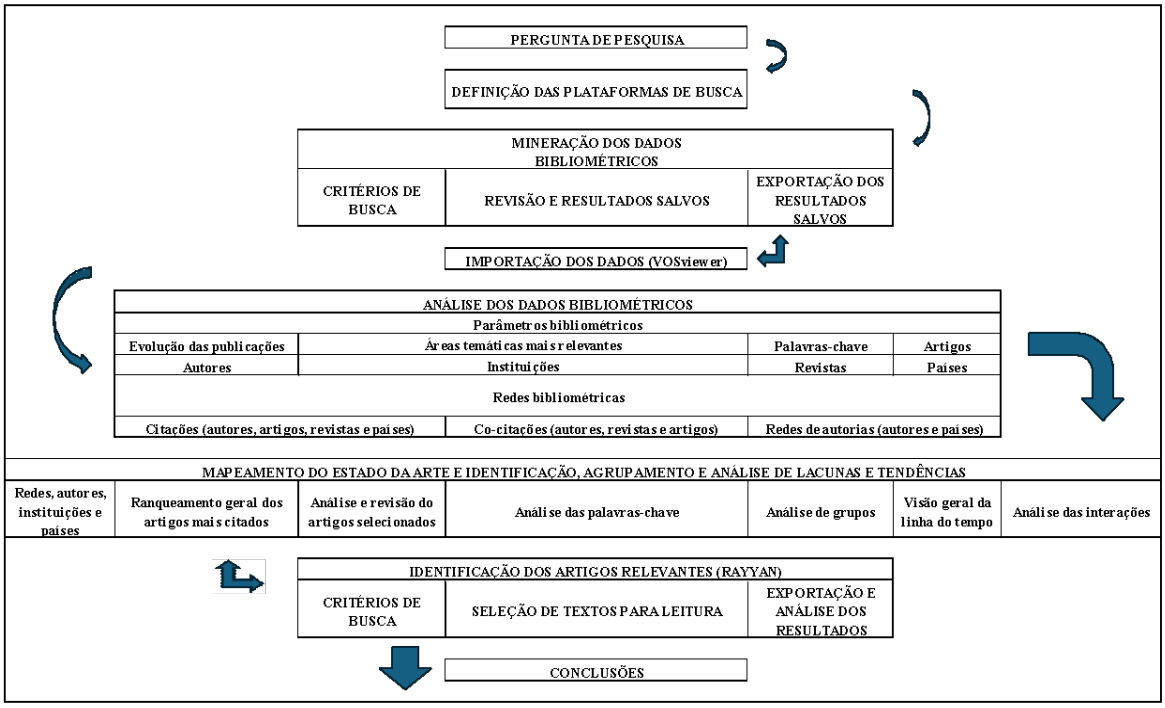
As contribuições teóricas das leis de Lotka, Bradford, Zipf e Price são fundamentos essenciais para a bibliometria (Price, 1976). Lotka apresentou a lei do inverso, que se aplica à avaliação da produtividade dos autores (Urbizagastegui, 2008). A lei de Zipf analisa a frequência das palavras em textos extensos (Doumas e Papanicolaou, 2020), enquanto Price se concentrou nas dinâmicas da atividade científica.

A análise bibliométrica aplicada neste estudo visa detectar tendências de pesquisa e temas emergentes na literatura sobre TIC inovadoras e a gestão sustentável de recursos hídricos. Essa metodologia analisa a evolução de temas e tendências ao longo do tempo, auxiliando na compreensão de mudanças na pesquisa e na identificação de pontos de inflexão e temas emergentes (Waltman; Van Eck, 2013). A análise de palavras-chave em artigos, por exemplo, permite identificar padrões de concorrência, destacando os principais temas e tópicos de pesquisa relacionados aos desafios da gestão sustentável dos recursos hídricos (Chen, 2006).

A análise das citações em artigos científicos é crucial para entender a influência de obras e autores específicos na área. Ela é fundamental para que os pesquisadores identifiquem contribuições relevantes e referências essenciais para o avanço do conhecimento. A

metodologia mapeia a rede de conhecimento, ajudando a reconhecer quais autorias e estudos exercem maior influência e revelando lacunas que ainda demandam investigação (Kousha e Thelwall, 2007).

Neste estudo, aplicou-se a análise bibliométrica com o propósito de verificar e quantificar a produção de artigos acadêmicos que abordam temáticas e conteúdos acerca de como as aplicações inovadoras de TIC podem ser implementadas eficazmente na gestão de recursos hídricos e na garantia da segurança hídrica. Além do embasamento teórico, a pesquisa incluiu o tratamento numérico e a análise estatística de dados, utilizando o software VOSviewer, que possibilitou, posteriormente, uma investigação qualitativa mais aprofundada



(Van Eck e Waltman, 2010), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 — Fluxograma Metodológico da Análise Bibliométrica

Fonte: Mariosa et al. (2026, p. 6)

A segunda parte da metodologia envolveu a análise qualitativa dos estudos selecionados para avaliar suas contribuições para as questões de pesquisa propostas. O uso do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), especificamente desenvolvida para a elaboração de revisões sistemáticas (Galvão et al., 2015), facilitou uma avaliação minuciosa das pesquisas existentes, permitindo uma categorização eficaz dos estudos focados nas interações entre TIC e a gestão de recursos hídricos, avaliando seus impactos por meio da análise das palavras-chave identificadas.

Foram considerados elegíveis para esta pesquisa os estudos que abordam tecnologias inovadoras relacionados à segurança hídrica. A seleção das fontes baseou-se em artigos científicos publicados entre os anos de 2020 e 2024 em língua inglesa e espanhola. A busca foi realizada nas bases de dados da Web of Science e Scopus, utilizando expressões booleanas com descritores-chave relevantes e suas variações semânticas, conforme Figura 5:

Figura 5 — Equações booleanas utilizadas para busca de dados nas bases da Scopus e Web of Science

Equaçã 01 - Critérios de busca na base de dados da Web of Science
ALL = (("Information and Communication Technologies" OR "ICT" OR "Digital Technologies" OR "Telecommunications" OR "Artificial Intelligence" OR "remote sensing" OR "internet of things" OR "IoT" OR "Business intelligence" OR "smart sensors" OR "big data" OR "augmented reality" OR "virtual reality" OR "cloud computing" OR "blockchain" OR "edge computing" OR "autonomous robotics") AND ("Water Security" OR "Hydrological Security" OR "Water Resilience") AND ("Water Management" OR "Water Resource Management" OR "Water Conservation" OR "Water Policy" OR "Hydrology"))
Equaçã 02 - Critérios de busca na base de dados da SCOPUS
all = (("Information and Communication Technologies" OR "ICT" OR "Digital Technologies" OR "Telecommunications" OR "Artificial Intelligence" OR "remote sensing" OR "internet of things" OR "IoT" OR "Business intelligence" OR "smart sensors" OR "big data" OR "augmented reality" OR "virtual reality" OR "cloud computing" OR "blockchain" OR "edge computing" OR "autonomous robotics") AND ("Water Security" OR "Hydrological Security" OR "Water Resilience") AND ("Water Management" OR "Water Resource Management" OR "Water Conservation" OR "Water Policy" OR "Hydrology")) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Spanish")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final") OR LIMIT-TO (PUBSTAGE , "aip")))

Fonte: Mariosa et al. (2025, p. 5).

As informações extraídas dos artigos selecionados incluíram dados sobre autores, títulos, resumos e periódicos, e foram organizadas na plataforma de gestão de referências bibliográficas Zotero.

3.3 Tratamento e análise dos dados

A busca dos artigos foi realizada de forma independente por quatro pesquisadores e analisadas com o auxílio dos softwares VOSViewer e Rayyan.

A primeira análise, de natureza quantitativa, consistiu na identificação das ocorrências dos principais termos ou palavras-chave. Para isso, os dados tratados na plataforma Zotero foram importados para o Software VOSviewer, utilizando o formato RIS.

A segunda análise, de caráter qualitativo, envolveu a exportação dos artigos previamente selecionados e organizados na plataforma Zotero para o Rayyan (Ouzzani et al., 2016), uma ferramenta projetada para auxiliar em revisões sistemáticas. Essa plataforma permitiu a seleção de artigos com base nas palavras-chave escolhidas para inclusão, restringindo a análise à população e aos desfechos (*outcomes*) dos artigos avaliados, de acordo com os interesses da pesquisa. Após a leitura e análise do material, apenas os artigos pertinentes aos limites da pesquisa foram considerados, uma vez que abordavam a presença e uso das TIC relacionadas à segurança e gestão hídrica.

Na pesquisa realizada na base de dados da *Web of Science*, foram identificados 112 artigos de forma independente por 04 pesquisadores; enquanto na base de dados Scopus, encontraram-se 4.651 artigos. Todos os artigos foram processados usando o Zotero e a plataforma Rayyan, disponível em https://new.rayyan.ai/reviews/1037979/overview. Do total de 4.763 artigos coletados, 22 foram eliminados por serem duplicados, restando 4.741 para a análise preliminar.

3.4 Análise das palavras-chave

A análise de palavras-chave realizada no software VOSviewer considerou inicialmente um conjunto de 2.800 palavras distintas, extraídas dos 4.741 artigos coletados. Utilizando um critério de seleção baseado na associação semântica das palavras-chave com os conceitos gerais ligados às Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), foi compilada uma lista de 28 termos relevantes pelos autores especializados na área de TIC, conforme detalhado no quadro 2.

Quadro 2 — Palavras-chave selecionadas sobre TIC na gestão de recursos hídricos: agrupamentos, conexões e ocorrências

PALAVRA_CHAVE	CLUSTER	PESO (CONEXÃO)	PESO (FORÇA TOTAL DA CONEXÃO)	PESO (OCORRÊNCIA)
data mining	1	212	258	17
image analysis	1	189	255	13
image processing	1	306	423	21
innovative trends	1	96	117	6
remote sensing	1	379	676	24
big data	2	211	271	17
data acquisition	2	295	391	25
data analysis	2	335	420	12
decision support system	2	459	779	38
digital technologies	2	133	173	12
digital transformation	2	74	89	7
information and communication technology	2	98	120	6
internet of things	2	223	347	28
iot	2	87	119	12
system dynamics	2	201	304	23
virtual reality	2	162	214	6
geographic information system	4	485	859	28
real time systems	4	103	132	9
cloud computing	5	227	356	17
artificial intelligence	6	956	2403	140
artificial neural network	6	766	1843	85
computer simulation	6	559	905	47
deep neural network	6	125	145	6
fuzzy neural networks	6	152	222	11
fuzzy systems	6	189	287	12
intelligent systems	6	154	189	8
machine learning	6	1578	6748	336
neural network	6	96	113	8

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Conforme pode ser observado por meio do quadro 2, a seleção das palavras-chave reflete a centralidade e a relevância de certos conceitos dentro do corpus analisado, que abrange um amplo espectro das Tecnologias da Informação e Comunicação aplicadas à gestão de recursos hídricos. O quadro destaca a predominância de temas como *'machine learning'*, com um peso de ocorrência significativamente alto (336), indicando não apenas a frequência com que esse termo aparece, mas também sua importância na discussão atual sobre tecnologias avançadas em gestão de recursos hídricos.

Outro aspecto relevante é a distribuição de palavras-chave por *clusters*, ou categorias temáticas. Assim, como exemplo, os termos dentro do *cluster 6*, como *'artificial intelligence'*,

'neural networks', e *'deep learning'*, que apresentam pesos de conexão elevados (966, 756, e 125 respectivamente), ilustram um foco intenso na aplicação de técnicas avançadas de IA na análise e modelagem em gestão hídrica. Este cluster, notadamente, trata de conceitos cruciais para o desenvolvimento de soluções inovadoras em tecnologias preditivas e automatizadas.

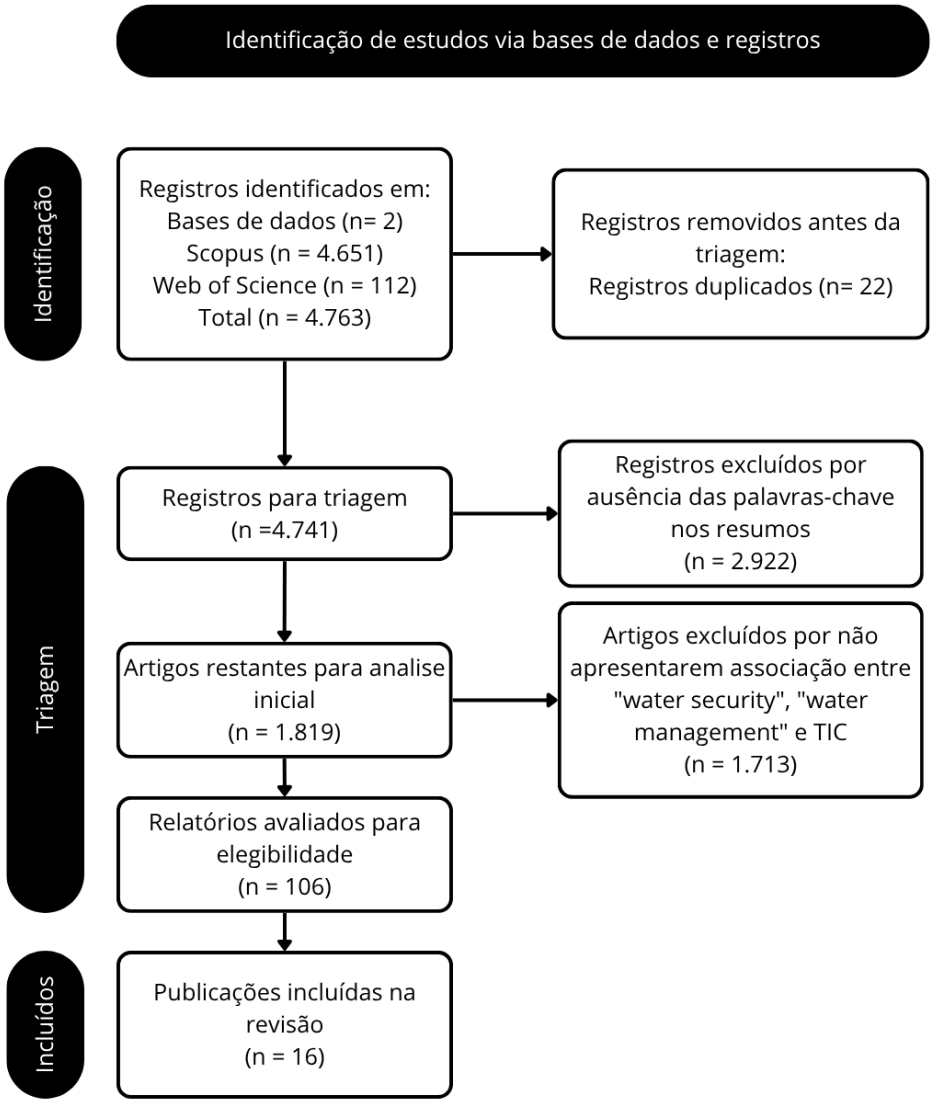
A presença de termos como *'geographic information system*' no *cluster 4* com um peso de conexão de 485, demonstra a importância da geolocalização e análise espacial, fundamentais para a implementação eficaz de gestão de recursos hídricos em uma escala mais ampla e detalhada. Além disso, o termo *'cloud computing'* no mesmo cluster com um peso de conexão de 227, reflete a crescente integração de plataformas baseadas em nuvem para o processamento e armazenamento de grandes volumes de dados hídricos.

Preliminarmente, a análise dessas palavras-chave não apenas identifica as tecnologias predominantes e emergentes mas também destaca as tendências de pesquisa e as áreas potenciais para futuras investigações, a exemplo de termos como *'fuzzy systems'* e *'intelligent systems'* com pesos de ocorrência de 12 e 18, respectivamente.

3.5 Análise de conteúdo dos artigos relevantes

Na plataforma Rayyan, (disponível em https://new.rayyan.ai/reviews/1037979/overview), 4.741 foram selecionados, portanto, para análise inicial. De forma colaborativa, os autores descartaram 2.922 artigos cujos resumos não continham as palavras-chave selecionadas, conforme indicado na figura 6. Dos 1.819 artigos restantes, 1.713 foram eliminados por não apresentarem as palavras-chave "*water security*", "*water management*" e as TIC em associação. Ao final desse processo de triagem, 106 artigos foram considerados potencialmente relevantes e submetidos à análise para determinar sua elegibilidade, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 — Fluxograma de seleção de artigos - Método PRISMA



Fonte: Adaptado de Mariosa et al. (2025, p. 7).

Após a leitura completa e análise detalhada dos artigos por especialistas em TIC que fazem parte do projeto, 16 publicações que abordavam efetivamente as principais tecnologias inovadoras aplicadas à segurança hídrica foram selecionadas, as quais serão descritas detalhadamente nos resultados.

3.6 Acompanhamento da Aplicação do Roteiro de Entrevistas Semiestruturadas

Para a realização da pesquisa junto aos especialistas foram adotados procedimentos quantitativos e qualitativos com o objetivo de entender a percepção que possuem sobre as

tecnologias inovadoras identificadas na revisão sistemática da literatura, bem como verificar seu uso na gestão de recursos hídricos. A investigação abordou especificamente às Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) aplicadas ao contexto de monitoramento hídrico.

Perante isso, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com especialistas atuantes na área de gestão de recursos hídricos, utilizando como instrumento de coleta de dados um roteiro de entrevista previamente elaborado (Anexo 1).

As entrevistas visaram explorar percepções, experiências e práticas dos participantes. A aplicação do roteiro de entrevista também permitiu identificar quais tecnologias estão sendo atualmente utilizadas por empresas da região, bem como conhecer as TICs mais difundidas e percebidas como mais relevantes para o monitoramento hídrico.

As informações obtidas foram analisadas de forma que permitissem avaliar o potencial das TICs no contexto do monitoramento hídrico.

A seleção dos participantes foi realizada considerando sua relevância para o estudo e sua representatividade dentro do campo investigado. O critério de escolha fundamenta-se na experiência dos participantes, no vínculo institucional e na contribuição potencial para a análise proposta.

O agendamento das entrevistas foi realizado conforme a disponibilidade dos participantes por meio de contato prévio por membros da equipe de pesquisa. Essa etapa teve como objetivo garantir a adequação de horários e condições favoráveis à realização das entrevistas, respeitando a agenda e preferências de cada entrevistado.

Após a confirmação das datas, foi enviado aos participantes os Termos de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), e o Termo De Consentimento Para Tratamento De Dados Pessoais. Os termos contêm informações sobre os objetivos da pesquisa, procedimentos adotados, garantia de sigilo e liberdade de desistência.

As entrevistas foram realizadas, prioritariamente, de forma virtual, por meio da plataforma Microsoft Teams, sendo gravadas e posteriormente transcritas, de modo a preservar a fidelidade do discurso original no período de abril de 2025 a março de 2026. Em situações nas quais não foi possível a realização da entrevista síncrona, os participantes puderam responder ao questionário em formato on-line. Considerando as diferenças entre os dois

procedimentos de coleta, especialmente quanto ao nível de detalhamento, espontaneidade e possibilidade de aprofundamento das respostas, os materiais obtidos não foram tratados como equivalentes, mas como fontes complementares de dados. Para fins de análise, essa distinção foi considerada na organização do corpus textual.

O pré-tratamento das transcrições envolveu a revisão textual, correção de eventuais ruídos de fala, padronização de termos ou siglas e retirada de repetições ou interrupções, sem comprometer o conteúdo da entrevista. Em seguida, foram identificados e selecionados trechos que respondiam de maneira direta às questões do questionário de pesquisa.

Realizou-se então a anonimização dos dados assegurando a remoção de informações pessoais e qualquer elemento que pudesse identificar os participantes garantindo a confidencialidade e o cumprimento das normas éticas da pesquisa.

3.7 Descrição de como os resultados da pesquisa serão apresentados

A etapa final da pesquisa consistiu na consolidação e sistematização das informações obtidas ao longo das etapas metodológicas, integrando as evidências provenientes da revisão sistemática da literatura, da pesquisa documental e das entrevistas semiestruturadas realizadas com especialistas atuantes na área de gestão de recursos hídricos.

Em consonância com o objetivo da pesquisa, o relatório final reuniu e organizou informações acadêmicas e técnicas relacionadas ao uso de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) inovadoras aplicáveis ao monitoramento da segurança hídrica. Inicialmente, foram sistematizadas as principais TIC identificadas na revisão sistemática da literatura, considerando suas características, aplicações e potencial de contribuição para a coleta, o processamento, a análise de dados e a geração de indicadores voltados à gestão sustentável dos recursos hídricos.

Posteriormente, as evidências obtidas na literatura foram confrontadas com as informações provenientes das entrevistas, permitindo analisar as tecnologias atualmente empregadas pelos especialistas, identificar as TIC com potencial de aplicação ao monitoramento da segurança hídrica e levantar os principais desafios e limitações relacionados à sua implementação no contexto da gestão de bacias hidrográficas.

A integração dos resultados possibilitou contemplar as Tecnologias da Informação e Comunicação identificadas, suas aplicações, os indicadores associados ao monitoramento da

segurança hídrica, bem como as potencialidades e limitações observadas para sua utilização. Essa sistematização permitiu estabelecer uma relação entre as evidências científicas e a experiência prática dos especialistas, fornecendo subsídios para a proposição de recomendações voltadas ao aprimoramento do monitoramento da segurança hídrica.

Os resultados decorrentes dessa sistematização são apresentados no Capítulo 4.

4. Resultados

Neste capítulo são apresentadas as TIC inovadoras utilizadas no contexto da segurança hídrica, identificadas a partir da revisão sistemática da literatura. Em seguida, com base em um roteiro de entrevistas semiestruturadas aplicado junto a especialistas atuantes na área de gestão de recursos hídricos, são expostas as TIC inovadoras e os possíveis indicadores que já se encontram em uso.

Posteriormente, realiza-se a comparação entre as TIC identificadas na literatura e as práticas relatadas pelos especialistas, com o propósito de verificar quais tecnologias estão efetivamente sendo aplicadas e quais apresentam potencial de utilização para o monitoramento da segurança hídrica em bacias hidrográficas.

Finalmente, são propostas recomendações sobre TIC e indicadores com potencial de aplicação na tarefa de monitoramento automatizado da segurança hídrica, consolidando diretrizes para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

4.1 TIC selecionadas a partir da revisão sistemática da literatura

Com o objetivo de reunir informações acadêmicas com TIC inovadoras em uso ou com potencial de aplicação na tarefa de monitoramento automatizado da segurança hídrica, são apresentadas as contribuições de cada um dos artigos selecionados, conforme descrito no Quadro 3.

Quadro 3 — TIC e suas aplicações identificadas na revisão sistemática da literatura

Tecnologias	Aplicações	Objetivo	Citação

Sensoriamento remoto, IA (*Machine Learning*)	Qualidade da água	Determinar a concentração de componentes opticamente ativos na camada superior do corpo d'água para estimar a qualidade de água, a partir de técnicas baseadas no espectro de cores da água. Integração com algoritmos de aprendizado de máquina para aprimorar o modelo.	(Raghul e Porchelvan, 2024)
IoT, Big Data	Qualidade da água	Monitorar a qualidade da água, a salinidade do solo, o regime de águas superficiais e monitoramento das condições climáticas com vários sensores em tempo real.	(Reljić et. al 2023)
SAD, IoT	Qualidade da água	Aprimorar a gestão da qualidade da água em ambientes urbanos oferecendo funções de alerta precoce e identificação de fontes de poluição.	(Jiang et al, 2023)
Sensoriamento remoto, IA	Qualidade de água	Estimar a distribuição espacial de sólidos suspensos e a relação nitrogênio-fósforo como parâmetros de qualidade da água.	(Matsui et al, 2022)

Sensoriamento remoto, IA (*Machine Learning*)	Qualidade de água	Integrar dados de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina para detectar anomalias de turbidez no reservatório de Três Marias, Brasil. O modelo foi capaz de identificar com precisão regiões com alta turbidez, útil para grandes reservatórios e regiões de difícil acesso.	(Souza et al, 2023)
IA (*Deep Learning*), Sensoriamento remoto	Qualidade de água	Desenvolver e validar modelos de *Deep Learning* utilizando dados de reflectância do sensoriamento remoto (Rrs), juntamente com medições sincronizadas da qualidade da água, para estimar a concentração de Clorofila-a (Chl-a), fósforo total (TP) e nitrogênio total (TN).	(Guo et al, 2021)
IA, IoT	Qualidade de água	Apresentar o uso de IA e sensores para prever o risco bacteriano em sistemas de distribuição de água urbana, com base em parâmetros de qualidade da água.	(Lu et al, 2023)
Sensoriamento remoto, IA (Redes neurais profundas)	Águas subterrâneas	Prever o potencial de águas subterrâneas a partir de um método baseado em sensoriamento remoto, redes neurais profundas e nos algoritmos de otimização.	(Nguyen et al, 2024)

IA	Águas subterrâneas	Explorar grandes conjuntos de dados para entender mecanismos de recarga de águas subterrâneas em escala global e melhorar a precisão das estimativas.	(Jung; Saynisch-Wagner e Schulz, 2024)
IA	Águas subterrâneas	Mapear o potencial de águas subterrâneas em cenários de variabilidade climática.	(Sarkar et al, 2024)
Sensoriamento Remoto, IA (*Machine Learning*)	Águas subterrâneas	Modelar e mapear a variabilidade espacial dos recursos de águas subterrâneas, junto com as dinâmicas de controle dos aquíferos em áreas urbanas e periurbanas.	(Saha et al, 2024)
IoT, IA	Águas superficiais	Apresentar a integração de rede de sensores *IoT* e inteligência artificial, para melhorar a eficiência da utilização de recursos hídricos.	(Benhmad et al, 2024)
Sensoriamento remoto, IA	Águas superficiais	Propor um novo *framework* para detecção de barreiras fluviais, capaz de identificar diferentes tipos de infraestruturas em rios a partir de imagens de satélite.	(Sun, et al, 2024)
Sensoriamento remoto, IA (*Machine Learning*)	Monitoramento da Bacia Hidrográfica	Mapear a suscetibilidade à seca no Iraque, utilizando dados do GRACE/GRACE-FO, GLDAS e algoritmos de aprendizado de máquina.	(Al-Abadi et al, 2024)

IA (*Machine Learning*)	Monitoramento da Bacia Hidrográfica	O estudo avaliou a relação entre erosão em ravinas e fatores ambientais, utilizando três modelos híbridos de aprendizado de máquina (FR-RF, FR-SVM e FR-NB) para mapear a suscetibilidade à erosão.	(Hitouri et al. (2022))
IoT, SAD	Detecção de vazamentos	Apresentar uma metodologia para automatizar a gestão sustentável da água em edificações integrando o modelo BIM (*Building Information Modeling*), dispositivos *IoT* (Internet das Coisas) e ferramentas de gerenciamento de instalações (FM).	(Batista et al. (2024)

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

O Quadro 3 apresenta uma síntese consistente e atual das principais Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) inovadoras aplicadas à segurança hídrica, evidenciando a forte integração entre Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), Sensoriamento Remoto e Sistemas de Apoio à Decisão (SAD). A análise permite identificar tendências tecnológicas, áreas prioritárias de aplicação e contribuições das TIC para a gestão sustentável da água.

A IA emerge como tecnologia central, frequentemente combinada com outras ferramentas, especialmente o sensoriamento remoto e a IoT. Esse cenário demonstra que os sistemas hídricos estão evoluindo de modelos tradicionais de monitoramento para abordagens preditivas e inteligentes, capazes de antecipar riscos e otimizar a gestão.

Os principais usos da IA identificados foram:

- Predição da qualidade da água;
- Detecção de anomalias e turbidez;
- Modelagem de águas subterrâneas;
- Previsão de níveis de rios e precipitação;

- Mapeamento de suscetibilidade à seca e erosão;
- Detecção de barreiras fluviais.

Além disso, nota-se a evolução metodológica da IA:

- Machine Learning para classificação e previsão;
- Deep Learning para análise espectral e reconhecimento de padrões complexos;
- Redes neurais profundas e algoritmos híbridos para modelagem espacial.

Isso evidencia uma tendência de crescente sofisticação analítica no setor hídrico. Já o sensoriamento remoto aparece como uma das tecnologias mais recorrentes do quadro 3, principalmente associado ao monitoramento da qualidade da água e das águas subterrâneas. As aplicações incluem:

- Estimativa de clorofila, fósforo e nitrogênio;
- Identificação de turbidez;
- Mapeamento espacial de aquíferos;
- Monitoramento de secas;
- Detecção de infraestruturas fluviais.

Essa predominância revela duas vantagens importantes como: cobertura espacial ampla e capacidade de monitorar regiões de difícil acesso. Outro aspecto relevante é a integração dos dados espectrais com IA permitindo maior precisão analítica e automação na interpretação das imagens de satélite.

A IoT surge como tecnologia essencial para monitoramento contínuo, coleta de dados em tempo real e gestão automatizada de sistemas hídricos. A principal contribuição da IoT para a segurança hídrica é transformar sistemas reativos em sistemas preventivos, permitindo:

- Sistemas de alertas precoces;
- Respostas rápidas;
- Redução de perdas;
- Otimização do uso da água.

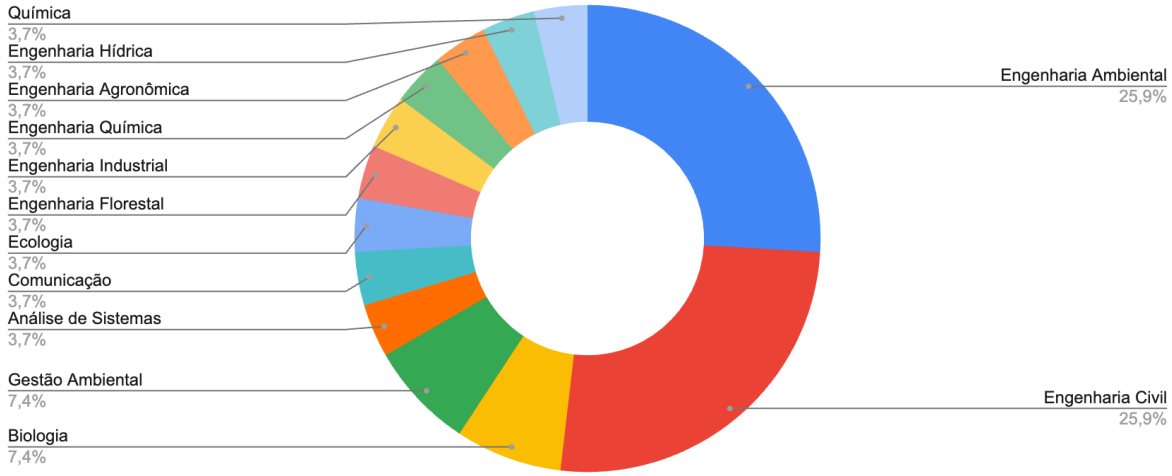
A qualidade da água é a categoria mais recorrente, indicando que esse permanece como um dos grandes desafios globais da gestão hídrica.

4.2 TIC inovadoras e possíveis indicadores que vêm sendo utilizados na visão dos especialistas

Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio das 33 entrevistas realizadas com especialistas vinculados a instituições públicas e privadas que atuam direta ou indiretamente na gestão de recursos hídricos.

O perfil dos entrevistados pode ser observado na figura 7.

Figura 7 — Gráfico de formação acadêmica



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A distribuição apresentada na Figura 7 permite identificar o perfil de formação acadêmica dos entrevistados. Entre as áreas mais representativas, destaca-se a Engenharia Ambiental, com 25,9%, seguida pela Engenharia Civil, ambas compondo os grupos majoritários. Em sequência, aparecem Gestão Ambiental e Biologia, cada uma com 7,4%. Somadas, essas áreas correspondem a mais de 65% da formação acadêmica dos participantes.

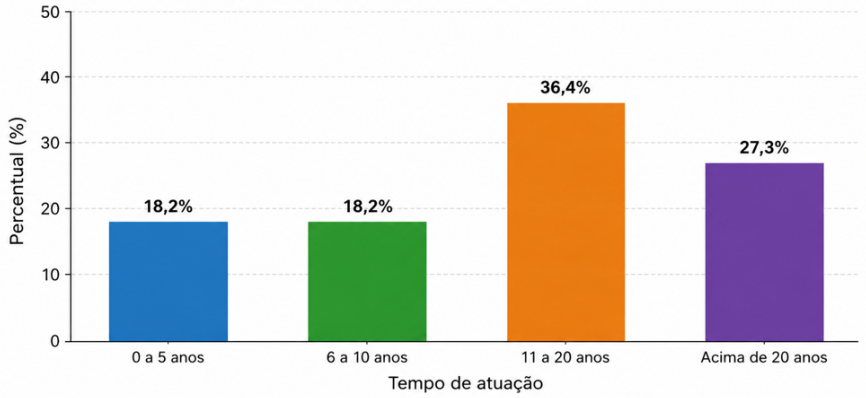
Os 35% restantes abrangem formações em campos como Análise de Sistemas, Comunicação, Ecologia, entre outros. Embora representem menor proporção (3,7% cada), essas áreas contribuem significativamente para ampliar a interdisciplinaridade da pesquisa, incorporando perspectivas das ciências naturais, sociais, organizacionais e comunicacionais. Essa diversidade fortalece a análise, permitindo uma compreensão mais abrangente e integrada da segurança hídrica.

Assim, os dados indicam que o grupo pesquisado não se restringe a um único campo de conhecimento, uma vez que os participantes atuam em atividades relacionadas à gestão, ao

monitoramento e ao planejamento dos recursos hídricos, tanto em instituições públicas quanto privadas.

A análise do tempo de atuação, apresentada na Figura 8, evidencia a predominância de profissionais com trajetória consolidada na área. O grupo com 11 a 20 anos de experiência corresponde a 36,4% dos entrevistados, seguido pelo grupo com mais de 20 anos de atuação, que representa 27,3%. Essa distribuição demonstra que a pesquisa contou majoritariamente com especialistas experientes, cuja prática acumulada contribui para enriquecer a análise sobre a aplicabilidade das TICs na gestão sustentável da segurança hídrica.

Figura 8 — Tempo de Atuação



Tempo de atuação na área de recursos hídricos	0 a 5 anos	6 a 10 anos	11 a 20 anos	Acima de 20 anos
Participantes (n)	6	6	12	9
Percentual (%)	18,2%	18,2%	36,4%	27,3%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Observa-se também a participação de profissionais em estágios mais recentes da carreira, nas categorias de 0 a 5 anos e 6 a 10 anos de experiência, ambas com a mesma proporção de 18,2%. Dessa forma, os dados revelam um grupo composto majoritariamente por especialistas experientes, mas que também incorpora profissionais em início de trajetória, o que contribui para a renovação e diversidade de perspectivas na área.

A Figura 9 evidencia o tipo de instituição em que os participantes exercem suas atividades profissionais. Os dados mostram que 55% atuam em instituições públicas, enquanto 45% estão vinculados ao setor privado. Embora haja uma predominância do setor público, a diferença entre os dois grupos é relativamente equilibrada, indicando que a pesquisa contempla visões complementares de ambos os contextos institucionais.

Figura 9 — Gráfico de tipo de Instituição



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os dados coletados por meio das entrevistas permitiram identificar quais Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) e Sistemas de Informação estão sendo aplicados em diferentes contextos institucionais, operacionais, técnicos e de pesquisa, conforme sintetizado no Quadro 4.

Quadro 4 – TIC e sistemas de informação utilizados na gestão de recursos hídricos, segundo os especialistas

Tecnologias e sistemas de informação	Aplicações
IoT e IA	Detecção de vazamento em redes de distribuição.
Realidade virtual	Base digital em 3D para visualização de tubulações subterrâneas e controle de perdas
Redes Telemétricas / Estações de monitoramento remoto	Identificação de parâmetros de qualidade e quantidade da água; medição e avaliação de perdas
Sistemas de Suporte à Decisão	Gestão integrada de bacias hidrográficas

Sistema de Serviço Geral de Pacotes por Rádio (GPRS)/ Alerta SMS (*Short Message Service* - Serviço de Mensagens Curtas)	Sensores conectados à internet enviam dados e alertas automáticos sobre níveis de rios e qualidade da água
Sistema de suporte à decisão *Aquanet*	Modelo de rede de fluxo para alocação de água e gestão de recursos hídricos
Sensoriamento Remoto	Medição, imagens aéreas e redefinição da malha hídrica municipal
Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas (SIMQUA)	Disponibilização de dados de qualidade da água à população
Drones	Monitoramento de reservatórios e comparação de imagens antes e depois
Sistema Rede Automática	Monitoramento contínuo das águas.
Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP)	O monitoramento hidrológico do SAISP é realizado pela Rede Telemétrica de Hidrologia do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e pelo Radar Meteorológico de São Paulo. Seus principais produtos incluem mapas de chuva observados na área do Radar de Ponte Nova, leituras das redes telemétricas do Alto Tietê, Cubatão, Registro e Piracicaba, além de mapas de previsão de inundações na cidade de São Paulo.
Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO)	Os dados meteorológicos são obtidos por meio de estações automáticas e mecânicas vinculadas à Secretaria de Agricultura e Abastecimento, coordenadas e operadas pelo Instituto Agronômico (IAC)/CIIAGRO, com apoio do Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas (PEMBH) e de entidades parceiras públicas e privadas, em âmbito estadual e federal.
Cadastro de Redes e Distribuição	Software para otimização, alocação e pontos de intervenção no controle de perdas

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O Quadro 4 evidencia que as Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) identificadas nas entrevistas estão fortemente associadas à transformação digital, indicando que

o monitoramento da segurança hídrica não depende de uma tecnologia isolada, mas sim da integração de múltiplas soluções. Observa-se a predominância de aplicações voltadas ao monitoramento em tempo real, o que reforça a necessidade de coleta de dados contínua também em tempo real

Assim, o quadro demonstra que os especialistas não apenas utilizam essas tecnologias, mas também reconhecem sua importância estratégica, especialmente quando aplicadas à redução de perdas, à transparência dos dados, ao controle operacional e à prevenção de riscos hídricos.

A comparação entre os Quadros 3 e 4 evidencia uma significativa convergência em torno de tecnologias voltadas ao monitoramento, à análise de dados e ao suporte à tomada de decisão na gestão de recursos hídricos. Entretanto, também revela diferenças importantes relacionadas ao grau de maturidade tecnológica e ao foco de aplicação das soluções.

As principais convergências observadas referem-se ao uso de Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Sensoriamento Remoto e Sistemas de Apoio à Decisão (SAD).

A IoT aparece em ambos os quadros como tecnologia fundamental para a obtenção de dados em tempo real. Na literatura científica, é utilizada para monitoramento da qualidade da água, condições climáticas, níveis de rios, águas superficiais e detecção de vazamentos. De forma semelhante, os especialistas destacam seu emprego em sistemas de monitoramento remoto, alertas hidrológicos e detecção de perdas em redes de abastecimento.

A Inteligência Artificial também é recorrente nas duas abordagens. Nos estudos científicos, a IA é aplicada na previsão de qualidade da água, modelagem de aquíferos, monitoramento de bacias hidrográficas, detecção de anomalias e previsão hidrológica. Entre os especialistas, a IA aparece principalmente associada à detecção de vazamentos e à automação de sistemas de monitoramento, demonstrando sua utilização prática em problemas operacionais da gestão hídrica.

O Sensoriamento Remoto constitui outra convergência importante. Na literatura, seu uso está associado à avaliação da qualidade da água, monitoramento de bacias, identificação de barreiras fluviais e mapeamento de aquíferos. Os especialistas também reconhecem sua relevância para o monitoramento territorial, obtenção de imagens aéreas e atualização da malha hídrica.

Os Sistemas de Apoio à Decisão aparecem em ambas as fontes como instrumentos para

auxiliar a gestão integrada dos recursos hídricos. Na literatura, são empregados principalmente para monitoramento da qualidade da água e identificação de fontes de poluição. Já os especialistas destacam aplicações consolidadas, como o sistema Aquanet e ferramentas de gestão de bacias hidrográficas.

As divergências observadas indicam diferentes perspectivas entre o ambiente acadêmico e a prática institucional.

A literatura científica apresenta maior destaque para tecnologias emergentes e avançadas, como Machine Learning, Deep Learning, Big Data, redes neurais profundas, integração de múltiplas fontes de dados e modelos preditivos complexos. Essas aplicações concentram-se em problemas como previsão de secas, modelagem de águas subterrâneas, análise de erosão, monitoramento de turbidez e avaliação de parâmetros ambientais em larga escala. Tais abordagens refletem a busca científica por inovação, automação e geração de conhecimento preditivo.

Por outro lado, os especialistas enfatizam sistemas efetivamente implementados e em operação, como SAISP, SIMQUA, CIIAGRO, Rede Automática de Monitoramento, sistemas de telemetria, GPRS/SMS e cadastros de redes de distribuição. Essas tecnologias possuem forte orientação operacional e atendem demandas cotidianas de monitoramento, alerta, controle de perdas e disponibilização de informações para gestores e usuários.

Outra divergência relevante é a presença de Realidade Virtual e Drones no Quadro 4, tecnologias que não aparecem entre as principais soluções identificadas na literatura revisada. Isso sugere que algumas ferramentas já incorporadas às rotinas de gestão ainda possuem produção científica relativamente limitada no contexto específico da segurança hídrica.

Em sentido contrário, o Quadro 3 apresenta aplicações relacionadas à gestão de águas subterrâneas, mapeamento de potencial aquífero, modelagem climática, avaliação de secas e análise preditiva baseada em Big Data, temas que não foram mencionados pelos especialistas. Essa diferença pode indicar que tais aplicações ainda possuem baixa adoção prática ou se encontram em estágio de experimentação e desenvolvimento.

De maneira geral, os resultados demonstram que existe forte alinhamento entre literatura e prática quanto à importância da digitalização do monitoramento hídrico por meio de IoT, IA, Sensoriamento Remoto e Sistemas de Apoio à Decisão. Contudo, a literatura científica apresenta uma visão mais prospectiva, focada em tecnologias emergentes e

capacidades preditivas, enquanto os especialistas priorizam soluções consolidadas e operacionalmente viáveis para monitoramento, alerta e gestão cotidiana dos recursos hídricos.

Essa diferença sugere uma lacuna entre o avanço científico e sua efetiva incorporação pelas organizações gestoras, indicando oportunidades para ampliar a transferência de conhecimento e acelerar a adoção de tecnologias avançadas de análise preditiva, Big Data e inteligência artificial na gestão da segurança hídrica.

Na sequência, o Quadro 5 apresenta os principais indicadores coletados por meio das entrevistas, permitindo compreender como os dados são transformados em informações estratégicas para apoiar a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Quadro 5 — Indicadores utilizados na gestão de recursos hídricos, segundo os especialistas

Indicador	Descrição
Indicador de Qualidade de Água	Avalia a qualidade da água destinada ao abastecimento público, após tratamento
Consumo de água pelo Setor Agrícola	Mensura o volume de água doce utilizado ao longo da cadeia produtiva agrícola
Consumo Industrial	Avalia desempenho, eficiência e evolução das atividades produtivas em determinado setor
Consumo Per Capita	Mensura o consumo médio individual de uma população em período específico
Disponibilidade de Água Subterrânea	Quantifica o volume de água subterrânea disponível em aquíferos
Disponibilidade Hídrica	Corresponde à vazão mínima considerada no balanço hídrico
ISH (Índice de Segurança Hídrica) - Volume Disponível de Recursos Hídricos Para Consumo	Mensura a disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade adequadas ao consumo humano
Acesso à Água Potável	Percentual da população com acesso à água potável
Indicador de Saneamento Básico	Percentual da população com acesso ao saneamento
Índice de Qualidade Ambiental	Sintetiza a qualidade ambiental para subsidiar decisões de gestão, saneamento e saúde pública

Índice de Vida Aquática	Mede parâmetros químicos associados à presença de vida aquática ou a uma condição do corpo d'água.
Indicador de Erosão do Solo	Avalia a vulnerabilidade do terreno à erosão
Indicador de Dados de Seca	Acompanha a severidade das secas com base em dados climáticos e hidrometeorológicos e impactos de curto e longo prazo.
Áreas Contaminadas	Quantifica áreas com substâncias químicas no solo ou nas águas subterrâneas acima dos limites legais, indicando potenciais riscos à saúde.
Índice de Estado Trófico	Classifica os corpos d'água segundo o grau de trofia, avaliando o enriquecimento por nutrientes e seus efeitos sobre a proliferação de algas e macrófitas aquáticas.
Indicador de Cobertura Vegetal	Mensura plantios e recuperação subsidiando o mapeamento, a avaliação dos ecossistemas e a formulação de políticas de proteção e conservação da biodiversidade.
Indicador de Vazão	Avalia a disponibilidade hídrica em função da relação entre consumo urbano e oferta
ESG - *Environmental, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governança)	Refere-se à incorporação de práticas ambientais, sociais e de governança em organizações públicas e privadas.

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O Quadro 5 revela um conjunto relevante de indicadores levantados por meio das entrevistas, contemplando dimensões quantitativas, qualitativas, ambientais, sociais e institucionais. Essa diversidade demonstra que a segurança hídrica é compreendida de forma integrada, envolvendo tanto a disponibilidade e o uso da água quanto os impactos ambientais e sociais associados.

Entre os indicadores apresentados, destacam-se aqueles diretamente relacionados à disponibilidade e uso da água, considerados essenciais para avaliar a relação entre oferta e demanda. Esses indicadores permitem identificar pressões sobre os recursos hídricos e subsidiar estratégias de planejamento e gestão.

Também se observa a presença de indicadores voltados à qualidade ambiental e à condição dos corpos hídricos, evidenciando que os especialistas compreendem a segurança

hídrica em sua dimensão mais ampla, incluindo os impactos decorrentes do uso e da ocupação do solo. Essa abordagem reforça a necessidade de políticas públicas e práticas de gestão que considerem simultaneamente os aspectos ecológicos, sociais e institucionais.

4.3 TIC com potenciais de utilização e com dificuldade de implantação na visão dos especialistas

O Quadro 6 apresenta um conjunto de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) consideradas promissoras para o monitoramento e a gestão da segurança hídrica. Essas soluções refletem o avanço da transformação digital aplicada ao setor, evidenciando a transição de modelos tradicionais de acompanhamento para abordagens inteligentes, integradas e preditivas.

Quadro 6 — Potencialidades das TIC para o monitoramento e a gestão da segurança hídrica, segundo os especialistas

Tecnologia	Descrição	Motivo apontado pelos entrevistados
Inteligência Artificial (IA)	Evita falhas humanas. (Após o treinamento)	“Falando numa escala muito menor, que é uma escala de monitoramento hidrológico em tempo real. Por exemplo, então é fora a questão da análise do dado, uma coisa é essa montanha de dados, a outra é a análise. “ “A figura humana erra muito em entender padrões. “
		“A IA aprende com a observação, e essa observação é aquela que a gente não consegue perceber com os olhos.”
		“Se você treina a máquina de maneira correta, é óbvio que, inicialmente ela vai coletar coisa errada, vai coletar dado errado. Até você treiná-la a chegar no ponto certo que vai coletar exatamente o que você quer.”

Telemetria	Tomada de decisão.	“É, sem dúvida, de suma importância tê-las em mão justamente para um controle mais eficiente, para uma tomada de decisão melhor.”
Alerta SMS (*Short Message Service* - Serviço de Mensagens Curtas)	Acesso à informação.	“Em países mais envolvidos, têm a questão de furação e tudo mais, alertas melhores. Em São Paulo precisamente temos melhorado, a defesa civil tem melhorado bastante nesse aspecto.”
Dashboard	Tomada de decisão.	“Uma abordagem que identificamos e adotamos e não temos perspectiva e nem possibilidade de voltar atrás. É algo que veio para ficar e vamos aplicar em outros cenários, outras rotinas, porque é bem didático.”
Monitoramento de Vazão	Tomada de decisão.	“Alocar ele com o que acontece no monitor de seca, olhando a região, consigo prever o que vai acontecer no futuro com uma imagem de satélite. Se pegar essas informações e fazer com que elas conversem, consigo planejar o futuro.”
Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas (SIMQUA)	Acesso à informação.	“É considerado uma inovação relevante. Antes, os dados eram enviados apenas por e-mail e sob solicitação, mas agora estão disponíveis de forma aberta e acessível ao público via internet.”
Sensoriamento Remoto	Rapidez de informação; Acesso à informação; tomada de decisão; Evita falhas humanas.	“Quanto mais dados georreferenciados e mais informações tivermos, melhor”

		“Esse sensor, conectado com a internet, tendo um sistema GPRS manda informações para os gestores do sistema, alerta via SMS sobre o nível do rio ou a qualidade da água ao atingir um determinado parâmetro sedado para que possamos tomar uma atitude mais rapidamente.”
		“Monitoramento da qualidade através de satélite. Ele consegue identificar pela coloração da água, se você tem um nível de algas ou de qualidade.”
Sistemas de Suporte à Decisão.	Evita falhas humanas; tomadas de decisão e acesso à informação.	“O sistema atende os diversos tipos e níveis técnicos que tem, às vezes você tem um sistema que ele não precisa ter uma pessoa com mestrado ou com doutorado para absorver o produto de uma modelagem. Então, a gente desenvolve a modelagem, traz robustez e ele utiliza essa modelagem da mesma maneira que o computador. Então, uma vez esse modelo esteja cuidado, escriturado, esse modelo é confiável.”

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

As tecnologias mencionadas pelos especialistas evidenciam uma clara tendência de modernização da gestão hídrica, com ênfase na automação de processos, na integração de dados, na qualificação da tomada de decisão e na ampliação do acesso à informação.

Entre elas, a Inteligência Artificial (IA) desponta como uma das ferramentas de maior potencial, sobretudo pela capacidade de processar grandes volumes de dados e identificar padrões complexos que frequentemente escapam à análise humana. No contexto do monitoramento hidrológico em tempo real, a IA contribui para o reconhecimento de anomalias, a antecipação de tendências e o apoio a decisões rápidas e precisas.

Contudo, os especialistas ressaltam que sua eficiência depende diretamente do

treinamento adequado dos modelos, uma vez que a tecnologia precisa ser alimentada por dados confiáveis para gerar resultados consistentes. Assim, a IA não substitui a atuação técnica humana, mas a complementa, ampliando a capacidade analítica e garantindo maior segurança e robustez nas informações coletadas.

O Quadro 7 evidencia que as principais dificuldades de aplicação das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) na gestão da segurança hídrica concentram-se em aspectos estruturais e operacionais que comprometem sua plena efetividade. Entre os desafios mais recorrentes, destacam-se:

Dificuldades operacionais, relacionadas à implementação e integração das tecnologias nos sistemas já existentes; Limitações financeiras, que restringem investimentos em infraestrutura digital e manutenção contínua; Problemas de confiabilidade da informação, decorrentes da qualidade e consistência dos dados coletados; Ausência de conhecimento técnico específico, que dificulta a capacitação de equipes e a utilização avançada das ferramentas e desafios de manutenção tecnológica, especialmente em contextos institucionais com recursos limitados e baixa atualização tecnológica.

Quadro 7 — Dificuldades de implantação e uso das TIC na gestão da segurança hídrica, segundo os especialistas

Tecnologia	Motivo descrito por especialistas
Sistemas de suporte à decisão	Dificuldade de operação.
Calibração de radar	Dificuldade de operação.
Telemetria	Confiabilidade da informação. (caso algum sensor apresente defeito).
Sistema de Informação de recursos hídricos	Financeiro. (Não conseguimos implementar).
Monitoramento de resíduos sólidos flutuantes nos cursos da água	Falta de conhecimento ou de tecnologia que seja capaz de apresentar os resultados esperados. (Como fazer esse monitoramento? para de fato acompanharmos isso).
Geoprocessamento	Financeiro.

	(Essas aplicações podem ser possibilidades, porém distantes da nossa rotina).
Sensoriamento remoto	Financeiro. (Essas aplicações podem ser possibilidades, porém distantes da nossa rotina).
IoT e IA	Há desafios operacionais e financeiros na manutenção da rede automática. (depende de constante acompanhamento, mesmo sendo automatizada. Além disso, a implementação de IA ainda não ocorreu, provavelmente por falta de infraestrutura técnica ou recursos humanos capacitados para isso.)
Inteligência Artificial (IA)	Dificuldade operacional. (Não consigo ver a máquina trabalhando sozinha, nesse caso. Acho que a máquina vai ajudar, mas não vai trabalhar sozinha. Ela precisa de análise, de um entendimento humano.).
Sistema de informação geográfica (SIG)	Dificuldade na operação e implementação. (vejo bastante dificuldade em implementar e ter perpetuidade. Então, eu acho que essa é a parte que mais tem uma lacuna para eles se manterem e serem usados continuamente.).
Sistemas de Monitoramento de Microbacias	Dificuldade operacional e tecnológica específica. (É difícil ter pessoal para fazer essa micro coleta. Se não consigo nem trabalhar as macros, os grandes corpos hídricos, porque o volume já é grande, e não está sendo trabalhado como gostaríamos, imagina começar a introduzir as micros bacias. se eu pudesse ramificar esse monitoramento automático, pegaria, por exemplo, derrames, problemas de toxicidade, esgoto clandestino, indústrias, já identificava a causa e origem, com mais rapidez e eficiência, se conseguíssemos permeabilizar e capilarizar esse monitoramento automático).

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O Quadro 7 demonstra que as dificuldades de implantação das TIC na gestão da segurança hídrica podem ser agrupadas em quatro grandes categorias:

- Operacionais → barreiras técnicas de uso, integração e continuidade.
- Financeiras → restrições orçamentárias que inviabilizam a adoção sistemática.
- Confiabilidade da informação → falhas em sensores e inconsistência nos dados coletados.
- Falta de conhecimento técnico → ausência de capacitação e de tecnologias adequadas para monitoramentos específicos.

A dificuldade operacional aparece como um dos motivos mais recorrentes. Mesmo quando a tecnologia está disponível, sua aplicação pode ser limitada pela complexidade de uso e pela escassez de profissionais preparados para operá-la de forma contínua e eficiente.

Outro fator relevante é a limitação financeira, que evidencia a dependência de investimentos em infraestrutura, equipamentos, softwares, manutenção e equipes técnicas. Essa restrição orçamentária compromete a incorporação das TIC em escala mais ampla e sistemática.

Portanto, os entraves à aplicação das TIC não se limitam à aquisição de tecnologias, mas envolvem também aspectos de operação, financiamento, manutenção e capacitação técnica, elementos indispensáveis para que essas ferramentas possam ser utilizadas com frequência e consistência na gestão da segurança hídrica.

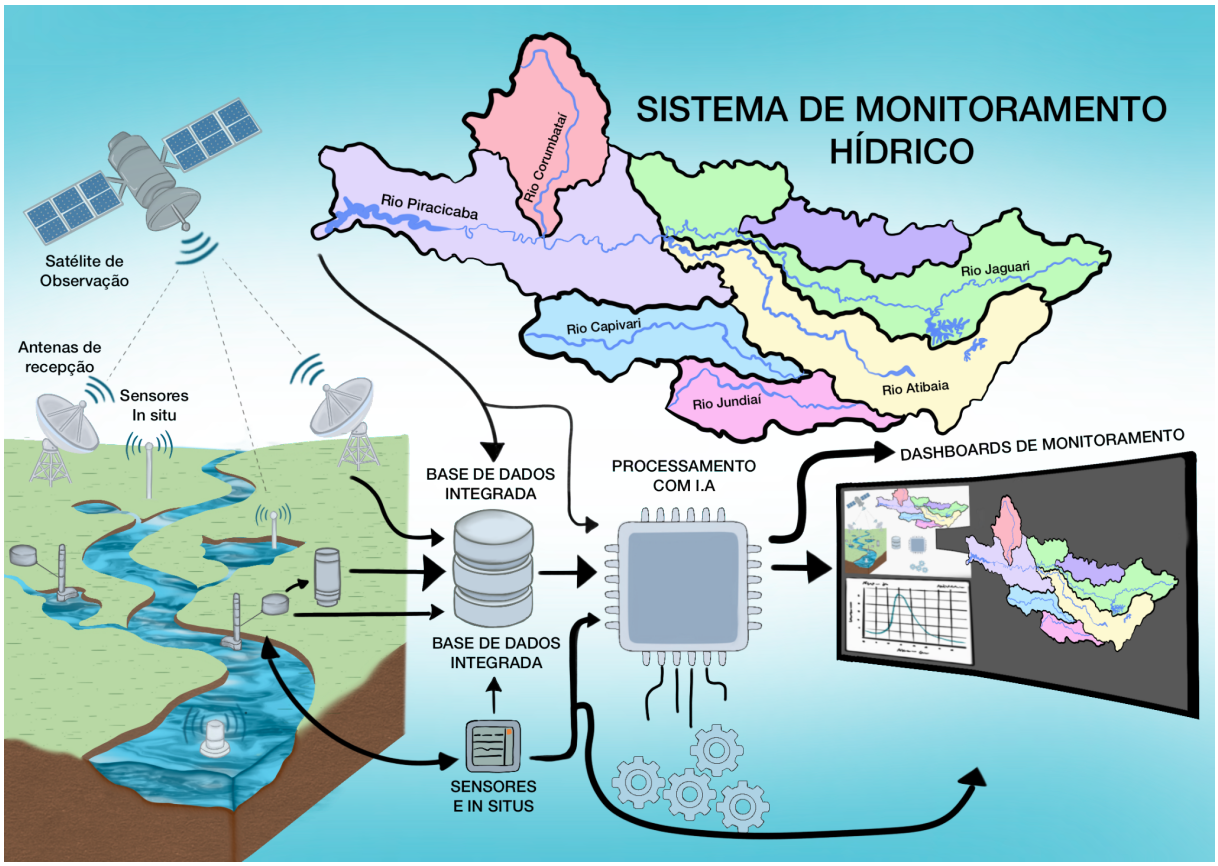
4.4 Sistematização e proposta de recomendações de TICs para monitoramento da segurança hídrica

A sistematização dos resultados apresentados neste capítulo evidencia que o monitoramento automatizado da segurança hídrica demanda a articulação entre diferentes Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), indicadores hidrológicos, ambientais e operacionais, além de condições institucionais adequadas para sua implantação e manutenção.

A análise da revisão sistemática da literatura, associada às contribuições obtidas por meio das entrevistas com especialistas, indica que tecnologias como Inteligência Artificial, Internet das Coisas (IoT), Sensoriamento Remoto, Telemetria, Redes Automáticas, Sistemas de Apoio à Decisão, Sistemas de Alerta e Bases de Dados Integradas apresentam elevado potencial de aplicação no acompanhamento da quantidade, qualidade, disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos.

A Figura 10 apresenta uma proposta conceitual a partir das entrevistas e análise da literatura que representa um sistema integrado de monitoramento hídrico que pode ser aplicado às Bacias PCJ, envolvendo a utilização dessas tecnologias em uma arquitetura digital capaz de consolidar dados, gerar análises preditivas e apoiar a tomada de decisão em diferentes escalas de gestão.

Figura 10 — Proposta de Sistema de monitoramento hídrico das Bacias PCJ com uso de TICs inovadoras



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A figura indica o fluxo de dados desde a coleta em campo (in situ) e por sensoriamento remoto até sua transmissão para uma base centralizada, onde as informações podem ser armazenadas, processadas e analisadas. Em seguida, os dados podem ser direcionados para sistemas inteligentes capazes de apoiar a identificação de padrões, a previsão de riscos e a geração de alertas. Os resultados também podem ser apresentados em painéis de visualização (dashboard) em Salas de Situação que sintetizam informações sobre nível dos rios, vazão, previsão de chuva, qualidade da água, alertas e estatísticas de uso geral. Dessa forma, a figura sintetiza a integração entre coleta automatizada, comunicação, análise inteligente e apoio à

tomada de decisão, demonstrando o potencial das TICs para o monitoramento automatizado da segurança hídrica nas Bacias PCJ.

Com base nessa sistematização, recomenda-se, inicialmente, a priorização de uma rede integrada de monitoramento que contemple simultaneamente indicadores de quantidade e qualidade da água. Entre os indicadores quantitativos, destacam-se disponibilidade hídrica, vazão, nível dos rios, precipitação, volume disponível para consumo, consumo agrícola, consumo industrial, consumo per capita e disponibilidade de águas subterrâneas. Esses indicadores são fundamentais para avaliar a relação entre oferta e demanda, identificar pressões sobre os recursos hídricos e orientar estratégias de planejamento em situações de escassez ou aumento do consumo.

No que se refere à qualidade da água, recomenda-se a incorporação de indicadores como Índice de Qualidade da Água, turbidez, sólidos suspensos, clorofila-a, fósforo total, nitrogênio total, Índice de Estado Trófico, Índice de Vida Aquática e identificação de áreas contaminadas. A associação desses indicadores com sensores automáticos, análises laboratoriais, sensoriamento remoto e modelos baseados em IA pode contribuir para a detecção de alterações na qualidade dos corpos hídricos, identificação de possíveis fontes de poluição, monitoramento de florações de algas, controle de lançamentos irregulares e avaliação de riscos ao abastecimento público.

Também se recomenda o uso de indicadores voltados à análise de vulnerabilidades ambientais e riscos hidrológicos, tais como seca, inundações, erosão do solo, cobertura vegetal, eventos extremos e condições de microbacias. A integração entre dados hidrometeorológicos, imagens de satélite, telemetria, geoprocessamento e modelos preditivos pode favorecer a antecipação de cenários críticos e a adoção de medidas preventivas. Essa recomendação é relevante porque os resultados das entrevistas demonstram que os especialistas atribuem importância à rapidez da informação, ao acesso aos dados e ao suporte técnico para tomada de decisão.

No campo operacional, recomenda-se a ampliação do uso de IoT, telemetria, redes automáticas, sistemas de alerta e dashboards para acompanhamento de perdas, vazamentos, variações bruscas de vazão, alterações nos parâmetros de qualidade da água e riscos de inundação. Sistemas de alerta por SMS, plataformas digitais e painéis de controle podem ampliar a capacidade de resposta dos gestores públicos, operadores de sistemas de

abastecimento e órgãos de defesa civil, especialmente quando determinados parâmetros ultrapassarem limites previamente definidos.

Entretanto, a implantação dessas tecnologias deve considerar as limitações identificadas pelos especialistas. Entre os principais entraves estão as restrições financeiras, as dificuldades operacionais, a necessidade de capacitação técnica, a manutenção dos equipamentos, a confiabilidade dos sensores, a continuidade institucional e a integração entre diferentes sistemas. Portanto, recomenda-se que a adoção das TICs ocorra de forma gradual, planejada e acompanhada por protocolos de validação dos dados, rotinas de manutenção preventiva, capacitação permanente das equipes técnicas e definição de responsabilidades institucionais.

Assim, a proposta de recomendações para o monitoramento automatizado da segurança hídrica deve considerar três dimensões principais: tecnológica, institucional e operacional. A dimensão tecnológica envolve a integração entre sensores, satélites, telemetria, IoT, IA, bases de dados, dashboards e Sistemas de Apoio à Decisão. A dimensão institucional demanda cooperação entre órgãos gestores, comitês de bacias, instituições públicas, setor privado e centros de pesquisa buscando a integração das informações e o processo de gestão. A dimensão operacional requer infraestrutura adequada, financiamento contínuo, equipes capacitadas e manutenção dos equipamentos.

Dessa forma, sua aplicação pode contribuir para uma gestão mais preventiva, transparente e eficiente dos recursos hídricos, desde que acompanhada por governança adequada, capacitação técnica, interoperabilidade dos sistemas e continuidade institucional.

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A presente dissertação teve como objetivo reunir e analisar informações acadêmicas e técnicas sobre o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação inovadoras aplicáveis ao monitoramento da segurança hídrica. A pesquisa partiu da compreensão de que a segurança hídrica constitui um desafio central para a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em um contexto marcado pela intensificação das mudanças climáticas, pelo aumento da demanda por água, pela degradação ambiental e pela ocorrência mais frequente de eventos extremos, como secas, enchentes e inundações.

A pergunta norteadora da pesquisa: como as TICs inovadoras podem otimizar a coleta e a análise de dados para compor indicadores de segurança hídrica em bacias hidrográficas, foi respondida a partir de duas frentes complementares: a revisão sistemática da literatura e a análise das entrevistas realizadas com especialistas que atuam na gestão de recursos hídricos.

A combinação desses procedimentos permitiu identificar tanto as tecnologias discutidas no campo acadêmico quanto aquelas utilizadas ou percebidas como promissoras por profissionais vinculados a instituições públicas e privadas.

Os resultados da revisão sistemática indicaram que as TICs vêm assumindo papel cada vez mais relevante no monitoramento hídrico, sobretudo quando associadas à coleta automatizada de dados, ao processamento de grandes volumes de informação e ao apoio à tomada de decisão. Entre as tecnologias identificadas, destacaram-se a Inteligência Artificial, o Machine Learning, o Deep Learning, a Internet das Coisas, o sensoriamento remoto, o Big Data e os Sistemas de Apoio à Decisão. Essas tecnologias demonstraram potencial para aplicações relacionadas ao monitoramento da qualidade da água, previsão de vazões, identificação de anomalias, acompanhamento de secas, detecção de vazamentos, avaliação de águas subterrâneas, mapeamento de áreas vulneráveis e emissão de alertas.

As entrevistas com especialistas confirmaram parte significativa das tendências observadas na literatura. Verificou-se que, na prática institucional, as TICs vêm sendo utilizadas em atividades como monitoramento em tempo real, controle de perdas, disponibilização pública de dados, gestão de bacias, sistemas de alerta, uso de redes telemétricas, sensoriamento remoto, sistemas de suporte à decisão e monitoramento de reservatórios. Esse resultado demonstra que a gestão hídrica vem incorporando gradualmente ferramentas digitais, ainda que de modo desigual entre instituições, territórios e áreas de

atuação.

No que se refere aos indicadores, a pesquisa evidenciou que o monitoramento da segurança hídrica exige a articulação entre indicadores quantitativos, qualitativos, ambientais, sociais e institucionais. Entre os indicadores identificados, destacaram-se disponibilidade hídrica, vazão, consumo agrícola, consumo industrial, consumo per capita, disponibilidade de águas subterrâneas, acesso à água potável, saneamento básico, Índice de Qualidade da Água, Índice de Estado Trófico, Índice de Vida Aquática, indicadores de seca, cobertura vegetal, erosão do solo e quantidade de áreas contaminadas. Essa diversidade reforça que a segurança hídrica não pode ser avaliada apenas pela disponibilidade física de água, mas deve considerar também qualidade, acesso, vulnerabilidade ambiental, riscos climáticos e capacidade de resposta institucional.

A análise realizada permite concluir que as TICs apresentam maior potencial quando organizadas de forma integrada. O monitoramento automatizado da segurança hídrica depende de uma arquitetura capaz de articular as tecnologias que, nessa perspectiva, podem transformar dados dispersos em informações úteis, favorecendo diagnósticos mais rápidos, previsões mais consistentes e decisões mais fundamentadas.

A Figura 10, proposta no capítulo anterior, sintetiza essa lógica de integração ao representar um sistema de monitoramento hídrico que pode ser aplicado às Bacias PCJ. A proposta visual evidencia que a contribuição das TICs está justamente na conexão entre coleta, transmissão, processamento, análise e visualização de dados, aproximando o monitoramento técnico da tomada de decisão.

Conclui-se, portanto, que as TICs podem otimizar o monitoramento da segurança hídrica ao ampliar a rapidez, a precisão, a continuidade e a capacidade analítica dos sistemas de gestão. A Internet das Coisas e a telemetria contribuem para a coleta automatizada e contínua; o sensoriamento remoto amplia a escala espacial de observação; a Inteligência Artificial e o Machine Learning favorecem a identificação de padrões e a previsão de cenários; o Big Data permite o tratamento de grandes volumes de dados; os dashboards facilitam a visualização das informações; e os Sistemas de Apoio à Decisão auxiliam gestores na interpretação dos dados e na definição de medidas preventivas ou corretivas.

Entretanto, a pesquisa também demonstrou que a adoção dessas tecnologias envolve desafios relevantes. Os especialistas apontaram dificuldades associadas a limitações

financeiras, ausência de capacitação técnica, complexidade operacional, manutenção, confiabilidade, integração entre sistemas e continuidade institucional. Assim, a implementação das TICs não depende apenas da disponibilidade tecnológica, mas também de governança, financiamento, equipes qualificadas e planejamento de longo prazo.

Dessa forma, a principal contribuição desta dissertação consiste na sistematização das TICs e dos indicadores com potencial de aplicação ao monitoramento automatizado da segurança hídrica, articulando evidências da literatura científica e percepções de especialistas. O trabalho contribui para a gestão sustentável dos recursos hídricos ao indicar caminhos para a modernização dos sistemas de monitoramento, com ênfase na integração de dados, na automação, na transparência, na prevenção de riscos e no apoio à tomada de decisão.

Como recomendação para trabalhos futuros, poderiam ser implementadas algumas dessas tecnologias apontadas no trabalho com a finalidade de avaliar o potencial efetivo da sua utilização e o que de fato contribui para aprimorar o processo decisório.

Outra recomendação, considerando o avanço significativo das TIC onde novas aplicações surgem a toda hora, o trabalho de avaliar constantemente a literatura científica e consultar os especialistas não se esgota neste trabalho, mas deve ser uma atividade contínua.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Construção do PNSH.* 2025. Disponível em: https://pnsh.ana.gov.br/construcao

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA)**.** *ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores.* Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/ods6/ods6.pdf.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH).* Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://pnsh.ana.gov.br/seguranca

AL-ABADI, A. M.; *et al.*. *Drought susceptibility mapping in Iraq using GRACE/GRACE-FO, GLDAS, and machine learning algorithms.* ***Physics and Chemistry of the Earth, Iraque***, v. 134, 11 mar. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103583

BABEL, M. S.; CHAPAGAIN, K.; SHINDE, V. *How to measure urban water security? An introduction to the Water Security Assessment Tool (WATSAT).* ***APN Science Bulletin***, v. 13, n. 1, maio 2023. DOI: https://doi.org/10.30852/sb.2023.2166

BARBOSA, F. D.; HANAI, F. Y.; ROMERA E SILVA, P. A. Participação, representação e representatividade no processo de tomada de decisão em comitês de bacia hidrográfica. **Sustentabilidade em Debate**, v. 7, n. 3, p. 34-46, 30 dez. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312544958_Participacao_representacao_e_representatividade_no_processo_de_tomada_de_decisao_em_Comites_de_Bacia_Hidrografica

BARCELLOS, Demian da Silveira; SOUZA, Fábio Teodoro de. Optimization of water quality monitoring programs by data mining. *Water Research*, v. 221, art. 118805, 2022. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135422007588.

BATISTA, Luciana Teixeira; FRANCO, José Ricardo Queiroz; FAKURY, Ricardo Hall; PORTO, Marcelo Franco; ALVES, Lucas Vinicius Ribeiro; KOHLMANN, Gabriel Santos. *BIM-IoT-FM integration: strategy for implementation of sustainable water management in buildings*. Smart and Sustainable Built Environment, v. 13, n. 5, p. 1096–1116, 2024. DOI: 10.1108/SASBE-11-2022-0250. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/371754366_BIM-IoT-FM_integration_strategy_for_implementation_of_sustainable_water_management_in_buildings.

BENHMAD, T.; RHAIMI, C. B.; ALOMARI, S.; ALJUHANI, L.. *Design and Implementation of an Integrated IoT and Artificial Intelligence System for Smart Irrigation Management.* ***Int. J. Advance Soft Compu. Appl***, Jordânia, v. 16, n. 1, mar. 2024. DOI: 10.15849/IJASCA.240330.12. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/379829011.

BLANK, D. M. P.. *O Contexto Das Mudanças Climáticas E As Suas Vítimas.* Mercator (Fortaleza), v. 14, n. 2, p. 157–172, maio 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/j/mercator/a/SgzwvyFQvzynyM8ZhdtRzjr/abstract/?lang=pt

BOTEGA, L. C.; CRUVINEL, P. E. Realidade virtual: histórico, conceitos e dispositivos. *In:* COSTA, R. M.; RIBEIRO, M. W. S. (*orgs*.). **Aplicações de realidade virtual e aumentada: livro do pré-simpósio.** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2009. p. 1–146. (*Symposium on Virtual and Augmented Reality – SVR*, 11., 2009, Porto Alegre). Disponível em: http://www.de.ufpb.br/~labteve/publi/2009_svrps.pdf.

BOULANGE, J.; YOSHIDA, T.; NISHINA, K.; OKADA, M.; HANASAKI, N. *Delivering the latest global water resource simulation results to the public*. ***Climate Services*****,** v. 30, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100386.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Segurança hídrica. Perguntas frequentes. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/seguranca-hidrica/seguranca-hidrica.

BRASIL. Plano Nacional de Segurança Hídrica. **Documento-base.** Brasília: Programa de Parcerias de Investimentos – PPI, 2023. Disponível em: https://www.ppi.gov.br/wp-content/uploads/2023/04/pnsh.pdf

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040. Diagnóstico e Prognóstico, Plano de Ação e Anexo Normativo.** Gov.br, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planos-de-recursos-hidricos/plano-nacional-de-recursos-hidricos-pnrh.

BRASIL**. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). Resolução nº 145, de 4 de maio de 2012. Aprova o Regulamento do Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES para o exercício de 2012 e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 10 maio 2012. Disponível em: https://www.ana.gov.br/arquivos/resolucoes/2012/145-2012.pdf.

CAI, J.; ZHAO, D.; VARIS, O.. *Match words with deeds: Curbing water risk with the Sustainable Development Goal 6 index.* ***Journal of Cleaner Production***, v. 318, 10 out. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128509.

CAMPOS, L. M. DE S.; MELO, D. A. DE .. Indicadores de desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): uma pesquisa teórica. **Production**, v. 18, n. 3, p. 540–555, set. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-65132008000300010.

CARDOSO, O. N. P.; MACHADO, R. T. M.. Gestão do conhecimento usando data mining: estudo de caso na Universidade Federal de Lavras. **Revista de Administração Pública**, v. 42, n. 3, p. 495–528, maio 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0034-76122008000300004.

De CASTRO-PARDO, M.; FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, P.; PÉREZ ZABALETA, A.. *An initial assessment of water security in Europe using a DEA approach*. ***Sustainable Technology and Entrepreneurship****,* v. 1, n. 1, jan./abr. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100002.

De CASTRO-PARDO, M.; FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, P.; PÉREZ ZABALETA, *A. A new composite indicator to assess and monitor performance and drawbacks of the implementation of Aichi Biodiversity Targets.* ***Ecological Economics***, v. 201, e107553, jul. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107553.

CHEN, C. *CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature.* ***Journal of the American Society for Information Science and Technology***, v. 57, n. 3, p. 359–377, fev. 2006. DOI: https://doi.org/10.1002/asi.20317.

CHEN, Z.; XIA, F.; HUANG, T.; BU, F. *A localization method for the Internet of Things.* ***The Journal of Supercomputing***, v. 63, n. 3, p. 657-674, dez. 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s11227-011-0693-2.

CLERICUZI, A. Z.; ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S.. Aspectos relevantes dos SAD nas organizações: um estudo exploratório. ***Production***, v. 16, n. 1, p. 8–23, jan. 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-65132006000100002.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. **Relatório-síntese: Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.** 2021. Disponível em: https://www.comitespcj.org.br/wp-content/uploads/2025/03/Plano-das-Bacias-Relatorio-Sintese.pdf.

DETONI, T. L.; DONDONI, P. C. A Escassez Da Água: Um Olhar Global Sobre A Sustentabilidade E A Consciência Acadêmica. **Revista Ciências Administrativas**, v. 14, n. 2, 2008. Disponível em: https://ojs.unifor.br/rca/article/view/20.

DOUMAS, A. V.; PAPANICOLAOU, V. G. *The logarithmic Zipf law in a general urn problem. ESAIM:* ***Probability and Statistics***, v. 24, p. 275–293, 2020. DOI: https://doi.org/10.1051/ps/2020011.

EEKHOUT, J. P. C.; DELSMAN, I.; BAARTMAN, J. E. M.; VAN EUPEN, M.; VAN HAREN, C.; CONTRERAS, S.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.; DE VENTE, J. *How future changes in irrigation water supply and demand affect water security in a Mediterranean catchment. Agricultural Water Management*, v. 297, 31 maio 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108818.

FALSARELLA, O. M.; SILVA, M. L. R.; MARIOSA, D. F. *The decision process in water resources management: the contribution of the Internet of Things (IoT) and Big Data.* ***Journal on Innovation and Sustainability – RISUS*****,** v. 13, n. 2, p. 45-58, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.23925/2179-3565.2022v13i2p45-58.

FAZION FILHO, M. Internet das Coisas *(Internet of Things).* **Tubarão: Unisul Virtual**, 2016. ISBN 9788550601113. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mauro-Fazion-Filho/publication/319881659_Internet_das_Coisas_Internet_of_Things/links/59c038d5458515e9cfd54ff9/Internet-das-Coisas-Internet-of-Things.pdf.

FERNEDA, E. Redes neurais e sua aplicação em sistemas de recuperação de informação. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 25–30, jan./abr. 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-19652006000100003.

FIDELIS, Joubert Roberto Ferreira; *et al*. Bibliometria, cientometria, infometria: conceitos e aplicações. **Tendências da Pesquisa Brasileira em Ciência da Informação**, *[S. l.]*, v. 2, n. 1, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.59289/ha723n14.

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

GALVÃO, N. D.; MARIN, H. DE F.. Técnica de mineração de dados: uma revisão da literatura. **Acta Paulista de Enfermagem,** v. 22, n. 5, p. 686–690, set. 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-21002009000500014.

GALVÃO, T. F.; PANSANI, T. DE S. A.; HARRAD, D.. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 24, n. 2, p. 335–342, abr. 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ress/a/TL99XM6YPx3Z4rxn5WmCNCF/?lang=pt.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. ISBN 85-224-3169-8. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf.

GODOY, Arilda Schmidt. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. **RAE - Revista de Administração de Empresas** , *[S. l.]*, v. 35, n. 3, p. 20–29, 1995. Disponível em: https://periodicos.fgv.br/rae/article/view/38200.

GOMES, P. R.; MALHEIROS, T. F. Proposta de análise de indicadores ambientais para apoio na discussão da sustentabilidade. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, *[S. l.]*, v. 8, n. 2, 2012. Disponível em: https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/671.

GUO, H. *et al*. *Performance of deep learning in mapping water quality of Lake Simcoe with long-term Landsat archive.* ***ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing***, China, v. 183, p. 451-469, 26 nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.11.023

HITOURI, S. *et al*. *Hybrid Machine Learning Approach for Gully Erosion Mapping Susceptibility at a Watershed Scale.* ***International Journal of Geo-Information***, v. 11, n. 7, 14 jul. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi11070401

HOSTMANN, B.; RAYNER, N.; HERSCHEL, G**.** *Gartner's Business Intelligence, Analytics and Performance Management Framework.* Stamford: **Gartner**, 2009. Disponível em: https://www.gartner.com/imagesrv/summits/docs/apac/business-intelligence/BI-Analytics-PM-Framework-166512.pdf

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the Sixth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by H.-O. Pörtner et al. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2022. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009325844

JAMEI, M; ALI, M; KARIMI, B; KARBASI, M; FAROOQUE, A. A.; YASEEN, Z. M. *Surface water electrical conductivity and bicarbonate ion determination using a smart hybridization of optimal Boruta package with Elman recurrent neural network.* **Process Safety and Environmental Protection**, v. 174, p. 115-134, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.062. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023002665.

JIANG, J. *et al*.. A*n integrated supervision framework to safeguard the urban river water quality supported by ICT and models.* ***Journal of Environmental Management***, China, v. 331, abr. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117245.

JUNG, H.; SAYNISCH-WAGNER, J.; SCHULZ, S.. *Can Explainable AI Offer a New Perspective for Groundwater Recharge Estimation? — Global-Scale Modeling Using Neural Network.* ***Water Resources Research***, Alemanha, v. 60, n. 4, 18 abr. 2024. DOI: https://doi.org/10.1029/2023WR03636

KARTHIKEYAN, L.; CHAWLA, Ila; MISHRA, Ashok K. A review of remote sensing applications in agriculture for food security: crop growth and yield, irrigation, and crop losses. *Journal of Hydrology*, v. 586, art. 124905, jul. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124905

KEMERICH, P. D. da C.; RITTER, L. G.; BORBA, W. F. de. Indicadores de sustentabilidade ambiental: métodos e aplicações. **Revista Monografias Ambientais**, *[S. l.]*, v. 13, n. 4, p. 3718–3722, 2014. DOI: 10.5902/2236130814411. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/14411.

KOUSHA, K.; THELWALL, M. *Google Scholar citations and Google Web/URL citations: a multi-discipline exploratory analysis.* ***Journal of the American Society for Information Science and Technology***, v. 58, n. 7, p. 1055–1065, maio 2007. DOI: https://doi.org/10.1002/asi.20584.

LI, J.; HE, W.; JIANG, E.; YUAN, L.; QU, B.; DEGEFU, D. M.; RAMSEY, T. S. *Evaluation and prediction of water security levels in Northwest China based on the DPSIR model.* ***Ecological Indicators***, v. 163, jun. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112045

LOPES, L. M. D. *et al*.. Inovações Educacionais Com O Uso Da Realidade Aumentada: Uma Revisão Sistemática. **Educação em Revista**, v. 35, p. e197403, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-4698197403

LU, H. *et al*. *Securing drinking water supply in smart cities: an early warning system based on online sensor network and machine learning. AQUA Water Infrastructure,* ***Ecosystems and Society***, China, v. 72, n. 5, p. 721-738, 13 abr. 2023. DOI: doi.org/10.2166/aqua.2023.007

LUDERMIR, T. B.. Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina: estado atual e tendências. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 101, p. 85–94, jan. 2021 DOI:

https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35101.007

MALHEIROS, T. F.; PHILIPPI JR., A. *Indicadores de sustentabilidade e gestão ambiental.* Barueri: Manole, 2012. 800 p. ISBN 978-85-204-2664-7.

MARCAL, J.; SHEN, J.; ANTIZAR-LADISLAO, B.; BUTLER, D.; HOFMAN, J.. *Urban water security assessment: investigating inequalities using a multi-scale approach.* AQUA – Infraestrutura Hídrica, **Ecossistemas e Sociedade**, v. 73, n. 3, p. 569–583, 2024. DOI: https://doi.org/10.2166/aqua.2024.307.

MARENGO, José A. Água e mudanças climáticas. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008. DOI: 10.1590/S0103-40142008000200006. Disponivel em: https://www.researchgate.net/publication/250983973_Agua_e_mudancas_climaticas

MARGETA, J.. *Engineering approach to assessing the vulnerability of water abstraction.* ***Applied Sciences***, v. 14, n. 5, fev. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/app14051879

MARIOSA, D. F.; FALSARELLA, O. M.; ANDRADE, R. D. P.; SOUZA, G. Y. A.; MALHEIROS, T. F.; GARCIA, R. D. B.. Impacts of emerging contaminants on human health and water security: an interdisciplinary analysis with a focus on the PCJ Basins. *Revista de Geopolítica*, São José dos Pinhais, v. 17, n. 3, p. 1–19, 2026. DOI: https://doi.org/10.56238/revgeov17n3-014.

MARIOSA, Duarcides Ferreira; FALSARELLA, Orandi Mina; CASTRO, Sabrina Louzada de Azevedo; CONTI, Diego de Melo; QUARESMA, Cristiano Capellani; BRITO, Brígida Rocha. *ICTs for water security: emerging trends and applications in watershed management*. [S. l.]: Preprints.org, 2025. Preprint, versão 1, publicado em 2 set. 2025. DOI: https://doi.org/10.20944/preprints202509.0121.v1.

MARQUES, G. F. O que é gestão dos recursos hídricos? *GESPLA – Grupo de Estudos em Planejamento*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 29 maio 2019. Disponível em: https://www.ufrgs.br/gespla/2019/05/29/o-que-e-gestao-rec-hidricos/

MATSUI, K. *et al*. *Estimating water quality through neural networks using Terra ASTER data, water depth, and temperature of Lake Hachiroko, Japan.* ***Environmental Modelling and Software***, Japão, v. 159, nov. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105584

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (orgs.). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.* Brasília: Universidade de Brasília, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332292728_INTRODUCAO_AO_PROCESSAMENTO_DE_IMAGENS_DE_SENSORIAMENTO_REMOTO

MITCHELL, G. *Problems and fundamentals of sustainable development indicators.* ***Sustainable Development***, v. 4, n. 1, p. 1–11, mar. 1996. DOI: https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1719(199603)4:1 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/227651004_Problems_and_Fundamentals_of_Sustainable_Development_Indicators

MORAIS, J. L. M.; FADUL, É.; CERQUEIRA, L. S. Limites e desafios na gestão de recursos hídricos por comitês de bacias hidrográficas: um estudo nos estados do Nordeste do Brasil. **REAd. Revista Eletrônica de Administração**, Porto Alegre, v. 24, n. 1, p. 238-264, abr.

2018. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-2311.187.67528

NEGRI, R. G.; MENDES, T. S. G. Sensoriamento remoto, processamento de imagens e estudos ambientais. In: **VILANOVA, M. R. N.; SHIINO, M. Y.** (org.). *Fronteiras da engenharia e ciências ambientais: perspectivas multidisciplinares* [recurso eletrônico]. São Paulo: Editora Unesp, 2020. p. 219-243. DOI: https://doi.org/10.7476/9786557140093.0010. ISBN 978-65-5714-009-3.

NETTO, A. V. *et al*. Realidade virtual e suas aplicações na área de manufatura, treinamento, simulação e desenvolvimento de produto. **Gestão & Produção**, v. 5, n. 2, p. 104–116, ago. 1998. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-530X1998000200002

NGUYEN, H. D. *et al*. *Application of hybrid model-based machine learning for groundwater potential prediction in the north central of Vietnam.* ***Earth Science Informatics,*** Vietnam, v. 17, p. 1569-1589, 12 jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12145-023-01209-y

NKIAKA, E.. Exploring the socioeconomic determinants of water security in developing regions. ***Water Policy***, v. 24, n. 4, p. 608-625, abr. 2022. DOI: https://doi.org/10.2166/wp.2022.149.

OLIVEIRA, L. R. *et al*. **Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção** V. 10 n. 04, Evolução Do Conceito De Sustentabilidade: Um Ensaio Bibliométrico, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/j/prod/a/rm7ny98HNftrnRMJpFLddGm/?format=pdf&lang=pt

ONU Brasil. Relatório da UNESCO destaca águas subterrâneas como solução para crise hídrica. *UN.br – Centro de Imprensa*, 22 mar. 2022. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/175523-relatorio-da-unesco-destaca-águas-subterrâneas-como-solução-para-crise-hídrica

OUZZANI, Mourad; HAMMADY, Hossam; FEDOROWICZ, Zbys; ELMAGARMID, Ahmed. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, v. 5, art. 210, 2016. DOI: 10.1186/s13643-016-0384-4. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/s13643-016-0384-4.

PAIXÃO, G. M. DE M. *et al.* Machine Learning na Medicina: Revisão e Aplicabilidade. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 118, n. 1, p. 95–102, jan. 2022. DOI: https://doi.org/10.36660/abc.20200596

PEREIRA, V. R.; RODRIGUEZ, D. A. Vulnerabilidades da segurança hídrica no Brasil frente às mudanças climáticas. **Derbyana**, São Paulo, v. 43, e777, 2022. DOI: https://doi.org/10.14295/derb.v43.777

PINHEIRO, M. V. C. *et al*. Sistemas De Apoio À Decisão E Gestão De Recursos Hídricos: Proposta De Um Modelo Conceitual. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 29, p. e42254, 2024.

PIZELLA, D. G.. A relação entre Planos Diretores Municipais e Planos de Bacias Hidrográficas na gestão hídrica. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 635–645, jul. 2015.

POZZEBON, G. R. *et al.*. Proposta de um novo método para a definição de indicadores de

segurança hídrica no abastecimento público. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 947–956, set. 2022.

PRICE, D. J. de Solla. **O desenvolvimento da ciência: análise histórica, filosófica, sociológica e econômica.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2. ed. Novo Hamburgo: Associação Pró-Ensino Superior em Novo Hamburgo – ASPEUR; Universidade Feevale, 2013.

QUEVEDO-SILVA, F.; SANTOS, E. B. A.; BRANDRÃO, M. M.; VILS, L. Estudo bibliométrico: orientações sobre sua aplicação. *ReMark* – **Revista Brasileira de Marketing**, v. 15, n. 2, p. 246–262, jun. 2016. DOI: https://doi.org/10.5585/remark.v15i2.3274.

RAGHUL, M.; PORCHELVAN, P.. *A Critical Review of Remote Sensing Methods for Inland Water Quality Monitoring: Progress, Limitations, and Future Perspectives.* ***Water Air Soil Pollut****,* v. 235, n. 159, 15 Fev. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-024-06957-1

RELJIĆ, M. *et al*. *Advanced Continuous Monitoring System—Tools for Water Resource Management and Decision Support System in Salt Affected Delta.* ***Agriculture***, v. 13, n. 369, 3 Fev. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13020369

RODRIGUES, T. D. F. F.; OLIVEIRA, G. S. de; SANTOS, J. A. dos. As pesquisas qualitativas e quantitativas na educação. ***Revista Prisma****,* Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 154–174, 2021.

ROMERO-LANKAO, P.; GNATZ, D. M. *Conceptualizing urban water security in an urbanizing world.* ***Current Opinion in Environmental Sustainability***, v. 21, p. 45-51, ago. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.002.

SAHA, R. *et al*. *Urban aquifer health assessment and its management for sustainable water supply: an innovative approach using machine learning techniques.* ***Groundwater for Sustainable Development,*** India, v. 25, 23 fev. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101130.

SALDANHA, R. DE F.; BARCELLOS, C.; PEDROSO, M. DE M.. Ciência de dados e big data: o que isso significa para estudos populacionais e da saúde?. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 29, n. spe, p. 51–58, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1414-462X202199010305

SANDHU, G.; WEBER, O.; WOOD, M. O.; RUS, H. A.; THISTLETHWAITE, J. *An interdisciplinary water risk assessment framework for sustainable water management in Ontario, Canada.* ***Water Resources Research***, v. 59, n. 5, e2022WR032959, 8 maio 2023. DOI: https://doi.org/10.1029/2022WR032959

SANTOS, M. Y.; RAMOS, I. *Business intelligence: tecnologias da informação na gestão de conhecimento.* Lisboa: FCA Editora de Informática, 2006. p. 2-10. ISBN 972-722-405-9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277105760_Business_Intelligence_tecnologias_da_informacao_na_gestao_de_conhecimento

SARKAR, S. K.; ALSHEHRI, F.; SHAHFAHAD; RAHMAN, A.; PRADHAN, B.; SHAHAB, M.. *Mapping groundwater potentiality by using hybrid machine learning models under the scenario of climate variability: a national level study of Bangladesh. Environment,* ***Development and Sustainability,*** Bangladesh, 29 mar. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-024-04687-2.

SAUSEN, D.; MARQUES, L. P.; COSTA, G. A.; MELO, M. C.; AZEVEDO, L. B. Agrotecnologias disruptivas. *RECoDAF* – **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 6, n. 2, 2020. Disponível em: https://owl.tupa.unesp.br/recodaf/index.php/recodaf/article/view/126

SHAO, D.; NONG, X.; TAN, X.; CHEN, S.; XU, B.; HU, N.. *Daily water quality forecast of the South-To-North Water Diversion Project of China based on the Cuckoo Search–Back Propagation Neural Network.* **Water**, v. 10, n. 10, p. 1471, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/w10101471.

SICHE, R. *et al*. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, v. 10, n. 2, p. 137–148, jul. 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S1414-753X2007000200009

SICHMAN, J. S. Inteligência artificial e sociedade: avanços e riscos. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 35, n. 101, p. 37–50, abr. 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-4014.2021.35101.004.

SOUZA, A. P.; OLIVEIRA, B. A.; MAUREN L. ANDRADE, M. L.; STARLING, M. C. V. M.; PEREIRA, A.H.; MAILLARD, P.; NOGUEIRA, K.; SANTOS, J. A.; AMORIM, C. C.. *Integrating remote sensing and machine learning to detect turbidity anomalies in hydroelectric reservoirs.* ***Science of the Total Environment,*** Brasil, v. 902, ago. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165964

SOUZA, E. P. de; GOMES, C. M.; BARROSO, D. H.; MIRANDA, V. L. de; GURGEL-GONÇALVES, R. Aplicações do *deep learning* para diagnóstico de doenças e identificação de insetos vetores: *aplicaciones del deep learning en salud.* **Saúde em Debate,** [*S. l.*], v. 43, n. esp. 2 nov., p. 147–154, 2020. Disponível em: https://revista.saudeemdebate.org.br/sed/article/view/2495

SUGAHARA, Cibele Roberta; BRANCHI, Bruna Angela; FERREIRA, Denise Helena Lombardo; MENDES, Jakeline Pertile. Indicadores de sustentabilidade para a segurança hídrica. *Humanidades & Inovação*, Palmas, v. 9, n. 27, p. 374–388, 2022. Disponível em: https://revista.unitins.br/index.php/humanidadeseinovacao/article/view/6282

SUN, J.; DING, C.; LUCAS, M. C.; TAO, J.; CHENG, H.; CHEN, J.; LI, M.; DING, L.; JI, X.; WANG, Y.; HE, D.. *Convolutional Neural Networks Facilitate River Barrier Detection and Evidence Severe Habitat Fragmentation in the Mekong River Biodiversity Hotspot.* ***Water Resources Research,*** China, v. 60, n. 1, 25 jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1029/2022WR034375

SWINBOURNE, C.; KENWAY, S.; O'BRIEN, K. R.. *Urban greenery and alternative water sources critically interconnect water supply, cooling, and drainage in urban precincts.* ***Urban Climate***, v. 53, jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101812.

TRINDADE, A. S. C. E. da; OLIVEIRA, H. P. C. de. Inteligência artificial (IA) generativa e competência em informação: habilidades informacionais necessárias ao uso de ferramentas de IA generativa em demandas informacionais de natureza acadêmica-científica. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 29, e47485, 2024.

TRINDADE, L. D. L.; SCHEIBE, L. F. *Water management: constraints to and contributions of Brazilian watershed management committees.* **Ambiente & Sociedade**, v. 22, e02672, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20160267r2vu2019L2AO.

URBIZAGASTEGUI, R. A produtividade dos autores sobre a Lei de Lotka. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 87–102, maio/ago. 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ci/a/ZcTgjwJThG4qBnrKwXLHdYP/?format=pdf&lang=pt

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. *Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping.* ***Scientometrics****,* v. 84, p. 523–538, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3.

VANTI, N. A. P. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 369–379, 2002. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-19652002000200016

WALTMAN, L.; VAN ECK, N. J. *A systematic empirical comparison of different approaches for normalizing citation impact indicators.* ***Journal of Informetrics***, v. 7, n. 4, p. 833–849, out. 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joi.2013.08.002.

XU, H.; BERRES, A.; LIU, Y.; ALLEN-DUMAS, M. R.; SANYAL, J.. *An overview of visualization and visual analytics applications in water resources management.* ***Environmental Modelling and Software****,* Estados Unidos, v. 152, 28 abr. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105396

YOUNG, G. *et al. Hydrological sciences and water security: an overview.* ***Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences***, v. 366, p. 1–9, 2015. DOI: 10.5194/piahs-366-1-2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276901530_Hydrological_sciences_and_water_security_An_overview.

ZOHDY, B. S. M.; RAMADAN, N.; MAHMOOD, M. A.; HEFNY, H. A. *Machine vision application on science and industry: machine vision trends.* In: *Optoelectronics in machine vision-based theories and applications.* Hershey, PA: **IGI Global**, 2019. p. 233–254. DOI: https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5751-7.ch008.

ANEXO 1

Roteiro de entrevistas semiestruturado

Prezado (a) Participante,

Agradecemos por aceitar contribuir com esta pesquisa sobre os desafios e oportunidades na segurança hídrica e gestão de bacias hidrográficas. Esse estudo faz parte de um projeto aprovado pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), no edital de políticas públicas de 2023, desenvolvido por pesquisadores da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade Nove de Julho (UNINOVE) em parceria com a Fundação Agência das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que tem como principal objetivo tornar as bacias hidrográficas inteligentes, melhorando a eficiência da gestão dos recursos hídricos ao utilizar Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) inovadoras que auxiliem no monitoramento da segurança hídrica.

O roteiro de entrevista foi elaborado em formato semiestruturado com entrevistas abertas e em profundidade garantindo a fidedignidade das respostas e a confiabilidade das informações. Reforçamos que seus dados serão usados unicamente para fins acadêmicos e científicos.

Por favor, sinta-se à vontade para fornecer respostas amplas e exemplificar suas experiências. Sua participação é fundamental para o sucesso deste estudo.

Público-alvo

Membros de comitês de bacias hidrográficas, gestores públicos, pesquisadores e outros atores que atuam com segurança hídrica e gestão de bacias hidrográficas. Os entrevistados podem ter sua atuação tanto no Brasil quanto em outros países.

Objetivos da pesquisa

- ✓ Validar as tecnologias inovadoras e indicadores encontrados na literatura científica e verificar a existência de tecnologias e indicadores que já estão sendo utilizadas;
- ✓ Realizar um levantamento, análise e apresentar estimativas de viabilidade técnica, operacional, econômica e da efetividade na aplicação das diversas soluções tecnológicas

das tecnologias de informação e comunicação que estão sendo ou podem ser utilizadas na produção de indicadores aplicados ao contexto da segurança hídrica;

- ✓ Auxiliar no diagnóstico do que existe de tecnologias inovadoras e o que está sendo desenvolvido para monitorar a segurança hídrica de bacias hidrográficas.

Questões:

As questões são divididas em seis blocos. São eles:

a) Identificação dos participantes

1. Qual é o seu nome, a instituição que você está vinculado(a), cargo e função?
2. Qual é a sua formação acadêmica?

b) Experiência profissional

3. O que você entende por segurança hídrica e gestão de recursos hídricos?
4. Há quanto tempo você atua na área de segurança hídrica e gestão de recursos hídricos?
5. Em qual região ou bacia hidrográfica você atua principalmente?
6. Com quais projetos ou programas relacionados à gestão de bacias e segurança hídrica você trabalha atualmente?

c) Contexto geral Gestão dos recursos hídricos e segurança hídrica

7. Como você descreveria a situação atual da área de atuação da segurança hídrica em sua região?
8. Quais eventos recentes (ex.: seca, enchente, poluição) afetaram a gestão dos recursos hídricos na sua região?
9. Em sua opinião, quais são os maiores desafios para a segurança hídrica e a gestão de bacias hidrográficas em sua região ou área de atuação?
10. Existem desafios particulares que afetam sua região/bacia hidrográfica (ex.: falta de infraestrutura, conflitos de uso da água, mudanças climáticas)?
11. Você acredita que o uso de Tecnologias de Informação e Comunicação inovadoras podem contribuir para melhorar a gestão de recursos hídricos e segurança hídrica?

d) Perguntas sobre as tecnologias inovadoras

Apresentamos a seguir uma relação de Tecnologias inovadoras encontradas na literatura científica e onde elas são aplicadas.

Tecnologias inovadoras	Aplicação
Sensoriamento remoto	Monitoramento da qualidade da água Monitoramento de águas subterrâneas Monitoramento de águas superficiais Monitoramento da bacia hidrográfica Detecção de vazamentos
IoT	
Inteligência artificial (Machine Learning, Deep Learning, Neural Network)	
Sistemas de apoio a decisão, Big Data	
Realidade Virtual	
Realidade Aumentada	
Machine Vision	

Responda as seguintes perguntas:

12. Quais delas você conhece?
13. Quais delas você entende que tem potencial de melhorar o monitoramento da segurança hídrica?
14. Com o seu conhecimento, quais delas você vê dificuldade de implementação e por qual motivo (viabilidade técnica, viabilidade econômica, e outros)?
15. Quais delas você já utiliza no seu ambiente de trabalho? Descreva onde e como ela é aplicada.
16. Você utiliza alguma outra TIC que considera inovadora diferente das apresentadas? Descreva onde e como ela é aplicada.

e) Perguntas sobre os indicadores

Apresentamos a seguir uma relação de indicadores utilizados no contexto da segurança hídrica encontrados na literatura científica.

Categoria de indicadores	Indicadores - exemplos
Demanda de água	Consumo de água agrícola Consumo de água industrial

	Consumo de água per capita
Disponibilidade de água	Disponibilidade de água subterrânea; Volume de água usado por pessoa em um dia; Volume disponível de recursos hídricos para fins de consumo
Governança da água	Acesso à água potável canalizada Recursos Hídricos Renováveis Potencial para se adaptar a mudanças futuras
Incerteza relacionada a eventos ambientais	Áreas propensas a inundações Áreas propensas a secas Mitigação de desastres
Infraestrutura	Infraestrutura de proteção contra inundações Investimento em águas residuais
Qualidade da água	Cálcio, Nitrato, Ferro, Flúor, Coliforme Fecal Confiabilidade das águas subterrâneas Índice de qualidade da água
Serviços hídricos	Acesso a água potável Acesso a saneamento Porcentagem de domicílios com acesso à rede de esgoto

17. Quais deles você conhece?
18. Quais deles você entende que tem potencial de melhorar o monitoramento da segurança hídrica?
19. Com o seu conhecimento, quais deles você vê dificuldade de implementação e por qual motivo (viabilidade técnica, viabilidade econômica, e outros);
20. Quais deles você já utiliza no seu ambiente de trabalho? Descreva onde e como ele é aplicado.
21. Você utiliza algum outro indicador que considera importante para monitorar a segurança hídrica diferente dos apresentados? Descreva onde e como ele é aplicado.

f) Perspectivas futuras e comentários finais

22. Quais inovações tecnológicas e políticas você acredita que terão o maior impacto nos próximos anos?
23. Como a sua instituição pode contribuir para essas mudanças?
24. Há alguma informação adicional que você gostaria de compartilhar ou algum ponto que não foi abordado?

Agradecemos imensamente pela sua participação e disponibilidade em contribuir com este estudo. Suas respostas serão fundamentais para a compreensão dos desafios e oportunidades na segurança hídrica e gestão de bacias hidrográficas. Caso haja necessidade para outros esclarecimentos adicionais, entraremos em contato.