

O uso de inteligências artificiais no tratamento de água: revisão sistemática

The use of artificial intelligence in water treatment: a systematic review

Luan Vitor Pereira Trecossi ¹  <https://orcid.org/0009-0005-8252-2877>
Isadora Alves Lovo Ismail ¹  <https://orcid.org/0000-0002-2822-217X>
Marília Vasconcellos Agnesini ¹  <https://orcid.org/0000-0002-2388-6735>

Artigo de revisão

Como citar

Trecossi LVP, Ismail IAL, Agnesini MV. O uso de inteligências artificiais no tratamento de água: revisão sistemática. Revista Científica Integrada 2025. 8(1), e202526. DOI: <https://doi.org/10.59464/2359-4632.2025.3249>

Conflito de interesses

Não há conflito de interesses.

Enviado em: 10/12/2023

Aceito em: 21/02/2024

¹Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP)

Autor correspondente

Marília Vasconcellos Agnesini
marilia.agnesini@gmail.com

Revista Científica Integrada (ISSN 2359-4632)
<https://revistas.unaerp.br/rci>

RESUMO

Objetivo: Revisar o cenário atual da aplicação de IA no tratamento de água, identificando desafios e perspectivas futuras. **Método:** Realizou-se uma revisão integrativa, entre julho e dezembro de 2023, nas bases de dados Science Direct e CAPES, utilizando os descritores “Inteligência Artificial” e “Tratamento de água”. **Resultados:** De 390 artigos inicialmente selecionados, 12 atenderam aos critérios de inclusão, abordando a relação entre IA e processos de tratamento de água. Os estudos indicam que técnicas como redes neurais artificiais, lógica fuzzy e algoritmos de aprendizado de máquina são as mais aplicadas, contribuindo para maior eficiência operacional, previsão de falhas, controle de dosagem de insumos e monitoramento em tempo real. Os principais desafios identificados incluem a disponibilidade de dados confiáveis, padronização metodológica e validação em escala real. Entre os resultados observados, destaca-se a capacidade da IA de reduzir custos, aumentar a confiabilidade dos sistemas e apoiar decisões estratégicas na gestão da água. A análise evidencia que a aplicação de IA pode otimizar processos, melhorar o controle da qualidade da água e favorecer a sustentabilidade hídrica, desde que modelos robustos e adaptáveis sejam empregados. **Conclusão:** A revisão ressalta a importância de avançar em pesquisas aplicadas, validando tecnologias em contextos reais, e aponta a IA como uma estratégia relevante para segurança hídrica e eficiência operacional nos sistemas de tratamento de água.

Descritores: Gerenciamento hídrico. Otimização de processos. Controle e monitoramento. Redes neurais. Inteligência Artificial.

ABSTRACT

Objective: To review the current scenario of AI application in water treatment, identifying challenges and future prospects. **Method:** An integrative review was conducted between July and December 2023 in the Science Direct and CAPES databases, using the descriptors “Artificial Intelligence” and “Water Treatment.” **Results:** Of the 390 articles initially selected, 12 met the inclusion criteria, addressing the relationship between AI and water treatment processes. The studies indicate that techniques such as artificial neural networks, fuzzy logic, and machine learning algorithms are the most widely applied, contributing to greater operational efficiency, failure prediction, input dosage control, and real-time monitoring. The main challenges identified include the availability of reliable data, methodological standardization, and full-scale validation. Among the results observed, the ability of AI to reduce costs, increase system reliability, and support strategic decisions in water management stands out. The analysis shows that the application of AI can optimize processes, improve water quality control, and promote water sustainability, provided that robust and adaptable models are employed. **Conclusion:** The review highlights the importance of advancing applied research, validating technologies in real contexts, and points to AI as a relevant strategy for water security and operational efficiency in water treatment systems.

Descriptors: Water management. Process optimization. Control and monitoring. Neural networks. Artificial intelligence

Introdução

A escassez de água é um problema que está se tornando endêmico, segundo dados mostrados no Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Mundial da Água¹. Mesmo países com abundância em água doce, fatores como a aceleração da urbanização e o crescimento populacional, contribuem para o aumento da demanda de água, o que é agravado pelas mudanças climáticas e a poluição, reduzindo a disponibilidade hídrica². O uso consciente e sustentável da água doce traz a necessidade de estudos focados em estratégias para mitigar o problema. Esse tema é abordado inclusive dentre os Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Agenda 2030 da ONU, sendo que, o ODS 6 visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água para a população em geral¹.

Diversas tecnologias de tratamento são aplicadas para garantir a potabilidade da água, combinando processos físicos, químicos e biológicos, como coagulação, floculação, filtração e desinfecção³. O tratamento de água é essencial para garantir a qualidade e a segurança da água para o abastecimento público. Assim, é importante buscar tecnologias de tratamento adequadas para que resultem em alto desempenho na qualidade final e baixo custo⁴. No entanto, apesar dos avanços, ainda existem desafios como altos custos operacionais, falta de automação e dificuldades de monitoramento em tempo real⁵.

Nesse contexto, a inteligência artificial (IA) surge como uma tecnologia promissora para otimizar processos, prever falhas e apoiar decisões, utilizando algoritmos de aprendizado de máquina, redes neurais e lógica fuzzy⁵⁻⁶. Seu uso pode melhorar a eficiência, reduzir custos e ampliar a segurança operacional, mas sua aplicação prática ainda enfrenta barreiras como qualidade dos dados, padronização e aceitação profissional.

Apesar do crescente interesse no tema, há escassez de revisões integrativas que sistematizem o estado da arte, identifiquem lacunas e apontem perspectivas futuras, principalmente para países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Assim, este estudo teve como objetivo revisar o cenário atual da aplicação de IA no tratamento de água, identificando desafios e perspectivas futuras, por meio de uma revisão integrativa, as aplicações da IA no tratamento de água, destacando avanços, desafios e tendências emergentes.

Método

Este estudo caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura, método que permite sintetizar resultados de pesquisas já publicadas, proporcionando análise ampla e crítica do conhecimento disponível⁷. A metodologia deste artigo baseou-se na estratégia

PRISMA⁸, seguindo 6 etapas: (1) elaboração da pergunta norteadora da pesquisa; (2) busca nas bases de dados selecionadas; (3) seleção dos artigos; (4) extração dos dados; (5) síntese dos dados e (6) redação e publicação dos resultados.

A conformação da pergunta norteadora foi baseada no objetivo central do artigo, focando no uso de inteligência artificial em tratamento de água, em relação ao estado atual, os desafios e as perspectivas futuras. Com base nessas informações, foi criada a pergunta “Qual o cenário do uso da inteligência artificial no tratamento de água, os desafios existentes e as perspectivas futuras para sua aplicação?”.

A busca foi realizada em novembro de 2023, nas bases ScienceDirect e CAPES Periódicos, escolhidas por sua relevância para publicações nacionais e internacionais na área de ciência e tecnologia e pelo acesso institucional disponibilizado.

Os descritores aplicados foram “Inteligência artificial” e “Tratamento de água”, combinados pelo operador booleano AND. Os critérios de inclusão dos artigos nas bases de dados: artigos originais e de revisão; disponibilidade na internet (Open Access); publicações dos últimos 2 anos (2021 – 2023); relação com a pergunta norteadora.

A estratégia da busca é mostrada na Figura 1.

Figura 1. Estratégia de busca em plataformas de dados. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2023.

Base de dados	Descritores utilizados	n
Plataforma CAPES	water treatment and artificial intelligence	4
Science Direct	water treatment and artificial intelligence	386
Total		390

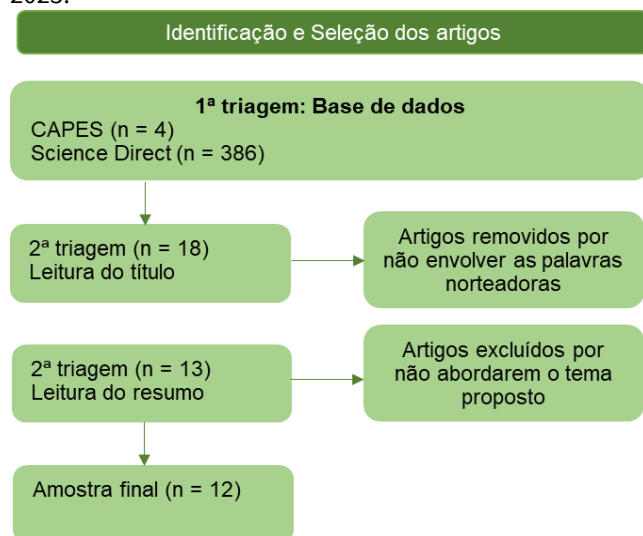
Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Inicialmente foram identificadas 390 publicações e, após a seleção final dos artigos, foram selecionadas 12 publicações que atendiam os critérios de elegibilidade definidos. Na Figura 2 estão representadas as etapas de triagem dos trabalhos.

Foram excluídos trabalhos duplicados, publicações fora do escopo da pergunta norteadora, livros, anais de eventos e artigos indisponíveis para acesso completo. A triagem seguiu três etapas: leitura de título, resumo e texto completo. A amostra inicial de 390 artigos resultou em 12 estudos incluídos após aplicação dos critérios. Importante ressaltar que para os artigos nacionais selecionados, optou-se por manter os encontrados, mesmo que estivessem fora do limite de anos estabelecidos.

A extração das informações foi realizada com o uso de ficha padronizada, montada em Excel, contendo autor, ano, objetivo, tipo de IA utilizada, aplicação no tratamento, desafios e perspectivas. A análise qualitativa seguiu abordagem temática, com categorização dos dados em três eixos: (i) diferentes aplicações da IA; (ii) desafios; e (iii) perspectivas futuras.

Figura 2. Fluxograma de identificação e seleção dos artigos científicos. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2023.



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Resultados

A busca sistemática identificou estudos que demonstram a aplicação da inteligência artificial em diferentes etapas do tratamento e gestão da água, incluindo previsão de qualidade, otimização operacional e detecção de anomalias. Entre os algoritmos mais utilizados, destacam-se redes neurais artificiais (RNA), máquinas de vetor de suporte (SVM) e algoritmos baseados em aprendizado profundo, aplicados para previsão de parâmetros como turbidez, DBO, pH e presença de contaminantes.

Além disso, foram encontrados trabalhos que integram IA a sistemas SCADA, sensores inteligentes e modelos híbridos, permitindo maior automação e eficiência nos processos de tratamento. A literatura também evidencia a utilização de modelos preditivos para apoiar a tomada de decisão no gerenciamento hídrico, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade operacional.

Os trabalhos selecionados a Figura 3, bem como título, autores e breve resumo sobre o artigo.

Figura 3. Artigos selecionados na pesquisa. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2025.

Autores	Título	Objetivo	Tipo de IA utilizada
⁹ Mabrok et al., 2022	<i>Modeling and simulations of Water Network Distribution to Assess Water Quality: Kuwait as a case study</i>	Utilização de IA para aprimorar a rede de distribuição de água no Kuwait	Modelos baseados em EPANET integrados a redes neurais artificiais
¹⁰ Kamyab et al., 2023	<i>The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management</i>	Utilização IA e banco de dados no gerenciamento de recursos hídricos	Aprendizado de máquina supervisionado e análise preditiva
¹¹ Elkharbotly et al., 2022	<i>Toward Sustainable Water: Prediction of non-revenue water via Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression modelling approach in Egypt</i>	Utilização de redes neurais na distribuição de água no Egito	Redes neurais artificiais e regressão linear múltipla
¹² Nti et al., 2023	<i>Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security</i>	Utilização de IA na gestão de recursos hídricos	Modelo de aprendizado de máquina
¹³ Bajany et al., 2022	<i>Model predictive control for water management and energy security in arid/semiarid regions</i>	Utilização de modelos de IA para prever abastecimento de água	Controle preditivo baseado em modelos
¹⁴ Silva e Souza, 2013	Modelo para o combate a crises de abastecimento urbano de água	Utilização de IA no gerenciamento de água	Sistemas baseados em conhecimento (sistemas especialistas) e no uso do MCDA (Método de decisão multi-critério)
¹⁵ Hama et al., 2022	<i>Optimization model for cost estimation of decentralized wastewater treatment units</i>	Utilização de modelo de IA para monitoramento de estações de tratamento de efluentes	Algoritmos genéticos e Sistemas de Informação Geográfica com otimização matricial
¹⁶ Nnaji et al., 2023	<i>Statistical computation and artificial neural algorithm modeling for the treatment of dye wastewater using mucuna sloanei as coagulant and study of the generated sludge</i>	Utilização de rede neural para prever remoção de cor de efluentes	Lógica fuzzy (ANFIS) e superfície de resposta (RSM)
¹⁷ Lin e Sun, 2023	<i>Development of hybrid mechanistic-artificial intelligence computational technique for separation of organic molecules from water in polymeric membranes</i>	Utilização de IA em processo de separação com membranas	Aprendizado de máquina (árvore de decisão, regressão de Poisson, KNN)
¹⁸ Santos et al., 2017	<i>Intelligent system for improving dosage control</i>	Utilização de IA para otimização da dosagem de coagulante	Redes neurais artificiais

¹⁹ Lermontov et al., 2008	Aplicação da lógica nebulosa na parametrização de um novo índice de qualidade das águas	Utilização de IA para criação de índice de qualidade de água	Lógica fuzzy
--------------------------------------	---	--	--------------

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Discussão

A análise dos estudos selecionados evidencia o crescente papel da Inteligência Artificial na gestão de recursos hídricos, abrangendo desde a distribuição e abastecimento de água, passando pelo tratamento e monitoramento, até a gestão integrada e o planejamento estratégico. Os resultados obtidos demonstram como diferentes técnicas de IA incluindo redes neurais artificiais, aprendizado de máquina, lógica fuzzy, sensores virtuais e algoritmos de otimização, têm sido aplicadas para aprimorar a eficiência operacional, prever cenários críticos, reduzir custos e apoiar a tomada de decisão em sistemas de água.

Esta seção apresenta de forma detalhada os principais achados em três perspectivas complementares: aplicações de IA na distribuição e abastecimento de água; uso de IA no tratamento de água e monitoramento e gestão integrada de recursos hídricos. Ao longo das subseções, são discutidos tanto os avanços quanto as restrições observadas na implementação de soluções inteligentes em diferentes contextos operacionais, fornecendo uma visão abrangente sobre o estado da arte da aplicação da IA no setor hídrico.

Aplicações de Inteligência Artificial na Distribuição e Abastecimento de Água

A distribuição e o abastecimento de água constituem etapas fundamentais para garantir o fornecimento contínuo, seguro e eficiente aos consumidores. Entretanto, diversos fatores, como crescimento populacional, alterações climáticas, perdas no sistema e crises de abastecimento, tornam esse processo cada vez mais complexo, exigindo soluções inovadoras para seu gerenciamento. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) tem se destacado como uma ferramenta estratégica para otimizar a operação das redes de distribuição, prever cenários críticos e apoiar a tomada de decisão.

Entre as ferramentas mais utilizadas para modelagem hidráulica, destaca-se o EPANET, desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA), amplamente empregado para simulação de comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição. Quando associado a algoritmos de IA, como redes neurais artificiais (RNA), aprendizado de máquina e sistemas fuzzy, o EPANET potencializa a análise de desempenho, previsão de falhas e elaboração de estratégias de controle avançadas.

O estudo desenvolvido por Mabrok et al. (2022) apresentou o funcionamento da rede de distribuição no

Kuwait, onde a água produzida é distribuída principalmente para reservatórios subterrâneos e parte para torres elevadas que funcionam como uma reserva de emergência e indicadora de pressão no sistema, liberando o fluxo de água para a rede em caso de baixa pressão¹⁰. O estudo destaca a importância da implementação de estratégias de otimização e integração de sistemas de monitoramento de água visto que o país é classificado como um dos mais suscetíveis a riscos relacionados a água, enfrentando diversos desafios para atender a demanda e garantir a qualidade e segurança da água fornecida.

Sendo assim, os autores desenvolveram, testaram e analisaram um modelo baseado no software EPANET. Esse modelo avaliou a qualidade da água na região estudada, focando na idade da água, que representa o tempo que a água leva para percorrer o percurso do ponto de origem até os consumidores. Foram considerados diversos cenários realistas, baseados em diferentes níveis de ocupação populacional e concluiu-se que o modelo EPANET foi capaz de identificar questões relacionadas à qualidade da água, como a idade da água na rede de distribuição. Mas os dados obtidos pelo modelo EPANET ainda só podem ser utilizados para planejamentos, sendo necessário um protótipo em grande escala para validar os dados obtidos pelo modelo (Mabrok et al., 2022)¹⁰.

Seguindo na mesma linha, os autores Elkhartbotly et al. (2022) abordaram a avaliação dos riscos nos sistemas de distribuição de água urbana¹¹. Para isso, foram desenvolvidos quatro modelos de IA para auxiliar na tomada de decisão em relação à redução da taxa de água não faturada (água que é perdida no percurso antes de chegar ao consumidor) em 15 províncias do Egito. Obteve-se melhora na precisão de pelo menos 15% em todos os modelos de redes neurais artificiais, mostraram alta precisão na estimativa final da água não faturada.

O estudo também revela que o algoritmo de Machine Learning é melhor na identificação de relação entre diferentes parâmetros estudados. As perspectivas futuras incluem a aplicação desses modelos de gerenciamento de água em outras regiões. Porém, os desafios enfrentados incluem a garantia que os modelos utilizados possibilitem a aplicação em diferentes contextos urbanos e em outras regiões de estudo, como em outros países (Elkhartbotly et al., 2022)¹¹.

Já os autores Bajany et al. (2022) propuseram um modelo de gestão de um sistema de abastecimento de água sob condições de alterações climáticas em uma região árida-semiárida¹². O modelo considerava mudanças na precipitação, no clima e em outros parâmetros interferentes no processo, sendo capaz de apresentar de forma otimizada a quantidade de água

fornecida por cada fonte, a fim de otimizar a eficiência em um sistema de abastecimento de água. Conclui-se que com os resultados obtidos, o modelo de controle preditivo demonstrou capacidade de gerenciar de forma otimizada o sistema de abastecimentos de água, além de mostrar a capacidade de adaptabilidade com alguns fenômenos como alterações climáticas. Porém, apesar dos resultados benéficos, deve-se tomar cuidado ao utilizar o modelo de controle preditivo, pois em problemas não lineares, pode ser que não seja viável a aplicação do modelo¹².

Silva e Souza (2013) apresentaram uma pesquisa para contribuir com o enfrentamento de crises no abastecimento urbano de água¹⁴. Foram desenvolvidas ferramentas computacionais com IA, denominado CAUA-SAD. Ele é um modelo híbrido de três modelos, sendo eles, CAUAmoel, capaz de classificar os casos de crises no abastecimento urbano de água, o CAUA-EXPERT, capaz de identificar diretrizes adequadas e o CAUA-MCDA sendo capaz de identificar a estratégia ideal para tratamento dos casos de crises no abastecimento urbano. O modelo foi capaz de identificar possíveis soluções para o problema na crise de abastecimento, se mostrando como uma forma promissora na solução do problema de crises de abastecimento¹⁴.

Os estudos apresentados demonstram o potencial de IA. Pesquisas aplicando modelos baseados em EPANET, a utilização de redes neurais artificiais para previsão de demanda e detecção de anomalias, soluções híbridas que combinam IA com sistemas especialistas e controle preditivo têm sido propostas para garantir maior robustez frente às incertezas relacionadas à variabilidade climática e sazonal.

Embora os resultados indiquem avanços expressivos, a implementação em larga escala ainda enfrenta desafios, como a necessidade de infraestrutura tecnológica robusta, custos de implantação e disponibilidade de dados confiáveis para calibração e validação dos modelos. Ainda assim, as tendências apontam para um cenário em que a integração entre ferramentas tradicionais, como o EPANET, e algoritmos inteligentes será fundamental para garantir sistemas de abastecimento mais resilientes, econômicos e sustentáveis.

Uso de IA no Tratamento de Água e Monitoramento

O tratamento de água constitui uma etapa fundamental para garantir que os recursos hídricos distribuídos aos consumidores atendam aos padrões de potabilidade e segurança. Essa etapa envolve processos como coagulação, floculação, filtração, desinfecção e monitoramento contínuo da qualidade da água, que são altamente influenciados por variabilidades físicas, químicas e biológicas. Nesse contexto, a IA tem se mostrado uma ferramenta valiosa para aprimorar a

eficiência operacional, reduzir custos e prever comportamentos em sistemas de tratamento, permitindo otimizações tanto em plantas de água potável quanto em estações de águas residuais. Modelos baseados em aprendizado de máquina, redes neurais artificiais, lógica fuzzy, sensores virtuais e algoritmos de otimização vêm sendo aplicados para ajustar parâmetros operacionais, estimar produção de lodo, controlar dosagens de insumos e avaliar a reutilização de água, mesmo em processos complexos e não lineares.

Os autores Hama et al. (2022) utilizaram um modelo de linguagem com algoritmo genérico em forma de matriz, para otimização do custo mínimo de construção, operação e reutilização nas estações de tratamento de água, denominado FMIN¹⁵. Este modelo foi utilizado em estações de tratamento de águas residuais na cidade de Sulaimani, no Iraque. Foram usadas como base de dados, 31 unidades descentralizadas de tratamento de águas residuais e os custos relacionados à reutilização da água em 827 áreas verdes. Concluíram que o modelo foi capaz de relacionar uma enorme quantidade de dados e considerar variações nos dados analisados. Obteve-se que a capacidade total ótima para as estações foi de 26000 m³/d, sendo esse volume suficiente para suprir 55,17% da necessidade total de água para irrigação das áreas verdes na região estudada¹⁵.

Já Nnaji et al. (2023), analisaram um modelo de linguagem para prever os parâmetros operacionais de coagulação e floculação para remoção de cor e DQO e geração de lodo em águas residuais usando Mucuna sloanei¹⁶. As variáveis de entrada controladas no modelo foram a dosagem do coagulante, pH, e o tempo de agitação. Para determinar a efetividade do modelo, utilizaram como parâmetros o coeficiente de determinação (R²) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE). O tratamento da água para remoção de cor e DQO e geração de lodo foi estimada usando lógica fuzzy (ANFIS) e a metodologia de superfície de resposta (RSM)¹⁶.

Os autores concluíram que mesmo ocorrendo variações nos dados de entrada, ambos os modelos apresentaram capacidade de adaptação a essas alterações. Ao comparar a eficiência dos modelos, observou-se que o modelo baseado na lógica fuzzy apresentou resultados de R² de 0,9823, 0,9752 e 0,9950 para remoção de cor, DQO e geração de lodo, respectivamente. Em contraste, o modelo RSM produziu R² de 0,8616, 0,9741 e 0,9930 para os mesmos parâmetros. Ao analisar a técnica RMSE, a previsão dos dados pelo modelo fuzzy apresentou valores de 20,2599, 0,2009 e 0,2341 para cor, DQO e geração de lodo, respectivamente. Enquanto isso, o modelo RSM apresentou resultado de 21,403, 0,8118 e 2,1436 para os mesmos parâmetros, respectivamente. Sendo assim, o modelo ANFIS baseado na lógica fuzzy apresentou

melhores resultados em comparação ao modelo RSM sendo capaz de simular mais precisamente o processo ¹⁶.

Lin e Sun (2023) investigaram a aplicação de modelo de linguagem Machine Learning durante um processo de separação de líquidos¹⁷. O processo estudado é um sistema com membranas responsáveis por remover componentes orgânicos. Foram usados diversos modelos de Machine Learning, com 8066 de entradas geradas por uma simulação de processo. O sistema foi estudado possuindo duas entradas e uma saída sendo as entradas as coordenadas “r” e “z” e a saída sendo a concentração do soluto. Os modelos de árvore de decisão, regressão de Poisson e K-ésimo vizinho mais próximo apresentaram R² de 0,9969, 0,9797 e 0,9841 respectivamente. Isso demonstra que apesar da relação entre a entrada e saída não ser totalmente linear nem completamente não linear, os modelos demonstraram bons resultados na aplicação de Machine Learning no processo de separação com membranas¹⁷.

Os autores Santos et al. (2017) apresentaram a utilização de rede neural artificial na otimização da etapa de coagulação em uma estação de tratamento de água¹⁸. A etapa de coagulação é uma das etapas mais importantes durante o tratamento de água, pois é nele que ocorre a aglutinação da sujeira presente na água para que posteriormente seja removida. O modelo utilizado avaliou dados de entradas em diversos cenários, como a qualidade da água bruta, cor, turbidez, decantada e filtrada para prever a dosagem ideal do coagulante. O estudo foi realizado em uma estação de tratamento de água em Cotia - SP, e obteve redução de 0,3766 mg.L⁻¹ em comparação aos dados atuais da estação. Essa redução representa uma economia de 17000 kg do coagulante usado durante um ano na estação com uma vazão nominal de 1,25 m³.s⁻¹. Sendo assim, concluíram que o uso da rede neural proporcionou uma redução do consumo de coagulante, o que gera redução de custos no processo de tratamento de água¹⁸.

Os trabalhos revisados demonstram que a aplicação de IA no tratamento e monitoramento de água permite otimizações precisas, previsões confiáveis e integração de grande volume de dados, mesmo em processos complexos e não lineares. As técnicas descritas contribuem para maior eficiência, redução de custos e aprimoramento da qualidade da água tratada, apontando para um futuro em que sistemas inteligentes serão cada vez mais indispensáveis para a gestão sustentável de recursos hídricos.

Gestão integrada e recursos hídricos

A gestão integrada de recursos hídricos busca conciliar o uso sustentável da água com a proteção dos ecossistemas e a garantia de abastecimento seguro e contínuo. Diante da crescente complexidade dos

sistemas hídricos, que envolvem múltiplos usuários, variabilidade climática, poluição e demandas setoriais diversas, surge a necessidade de ferramentas capazes de processar grandes volumes de dados, identificar padrões, prever cenários críticos e apoiar a tomada de decisão de forma eficiente. O uso das IA e de técnicas de análise de Big Data vem se destacando como um recurso estratégico, permitindo a integração de informações hidrológicas, meteorológicas e operacionais, além de possibilitar monitoramento em tempo real, detecção de riscos e otimização de processos relacionados à gestão da água.

Os estudos revisados evidenciam que a IA pode atuar em múltiplas frentes dentro da gestão integrada de recursos hídricos. Os autores Kamyab et al. (2023) apresentaram um trabalho discutindo a aplicação de IA e análise de Big Data no gerenciamento de recursos hídricos¹⁰. Essas tecnologias integradas à infraestrutura hídrica são capazes de fornecer resultados imediatos nos processamentos de dados relacionados à água, como condições meteorológicas, qualidade da água e taxas de descargas. É apresentado também, que esse processamento de dados pode apoiar na gestão de inundações, sendo capaz de processar em tempo real, dados de sensores de nível e imagens de satélite para prever potenciais riscos de inundações. Possibilitando assim, respostas rápidas às mudanças e facilitando o gerenciamento de recursos hídricos. No entanto, alguns desafios devem ser superados, como a resistência das partes interessadas em relação a métodos tradicionais já validados, além do receio em relação a precisão dos resultados e da estrutura necessária para processar grande quantidade de dados ¹⁰.

Nti et al. (2023) apresentaram um estudo de três estratégias de controle para gestão da poluição da água usando tecnologias avançadas¹². O estudo contribui para questões de qualidade da água na bacia do rio Pra, em Gana. A revisão procurou reunir a contribuição da aplicação de IA em tecnologias já conhecidas, como no caso da adsorção, visto que parâmetros como área superficial do material adsorvente, temperatura, dosagem, concentração inicial, tamanho das partículas, tamanho dos poros e tempo de contato influenciam diretamente na eficiência da adsorção¹².

Nesse contexto, os autores mostraram que a aplicação de IA demonstrou bons resultados, pois tais modelos são capazes de relacionar esses parâmetros, a fim de obter uma resposta melhor às variações durante o processo ¹². Isso ocorre devido à sua capacidade de adaptação, agilizando a tomada de decisões. Concluíram que, atualmente, não existe uma tecnologia sozinha capaz de resolver de forma eficaz todos os problemas relacionados à poluição da água. E com isso, recomendaram que fossem realizadas mais pesquisas exploratórias, para avaliar tecnologias capazes de enfrentar os desafios da poluição gerada. Como a

poluição gerada pela indústria mineradora e outras indústrias. Por fim, mencionaram que a adoção de tecnologias, incluindo a IA, e aplicação de fiscalização por meio de leis e regulamentos, auxiliariam na abordagem de fontes poluidoras de cursos de água¹².

Lermontov et al. (2008) propuseram a criação de um novo índice de qualidade de água, denominado INQA (Índice Nebuloso de Qualidade das Águas) através da utilização da lógica nebulosa¹⁹. Esta metodologia foi validada por meio das análises pré-existentes de monitoramento da CETESB no Rio Pardo, localizado na região de Ribeirão Preto-SP. O índice gerado pelo modelo se apresentou com boa proximidade ao índice IQA (Índice de Qualidade de Água) apresentado pela CETESB em seus relatórios no período de 2004 a 2006, resultando um índice de qualidade ligeiramente mais alto que o da CETESB e com uma correlação de $R^2 = 0,82593$. Através do gráfico do tipo "Box & Whiskers" constataram que o índice proposto é compatível com os outros obtidos através de outras metodologias propostas na literatura. Sendo assim, concluíram que o INQA pode ser utilizado como ferramenta alternativa para mensurar a qualidade da água, auxiliando na tomada de decisão¹⁹.

Em síntese, a gestão integrada de recursos hídricos apoiada por Inteligência Artificial permite combinar monitoramento em tempo real, análise preditiva e suporte à decisão em escala ampla, proporcionando maior eficiência e adaptabilidade na proteção e uso sustentável da água. No entanto, apesar dos avanços,

desafios permanecem, como a padronização de dados, a resistência à adoção de novas tecnologias e a necessidade de infraestrutura adequada, indicando que a aplicação da IA deve ser sempre complementada por políticas de gestão, regulamentação e fiscalização ambiental.

Síntese Crítica e Limitações

Os estudos analisados confirmam que a IA tem potencial significativo para melhorar a qualidade da água e a eficiência dos processos, especialmente por meio da previsão de variáveis críticas e da automação dos sistemas. No entanto, os trabalhos divergem quanto à robustez dos modelos quando aplicados em condições reais, uma vez que muitos algoritmos foram testados em ambientes controlados ou com dados limitados.

A partir da análise dos estudos selecionados, foi possível identificar padrões recorrentes nos benefícios e limitações do uso de Inteligência Artificial no tratamento de água. Embora as aplicações variem em função do tipo de IA e do contexto operacional, algumas vantagens e barreiras se repetem de forma consistente entre os trabalhos. Para sintetizar essas informações e facilitar a compreensão comparativa, os principais pontos positivos e restrições relatados pelos autores, foram compilados em um quadro comparativo, organizados por aspectos técnicos, operacionais e econômicos.

Figura 4. Benefícios e Limitações relacionados a aspectos técnicos, operacionais e econômicos. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2025.

Aspecto	Benefícios observados	Limitações relatadas
Eficiência operacional	Redução de custos com insumos químicos e energia, otimização da dosagem de coagulantes e aumento da confiabilidade dos sistemas.	Necessidade de calibração constante e ajuste fino dos parâmetros.
Monitoramento e controle	Capacidade de monitoramento em tempo real, previsão de qualidade da água e detecção precoce de falhas.	Dependência de sensores e infraestrutura de coleta de dados de alta qualidade.
Modelagem e previsão	Alta precisão em simulações, suporte à tomada de decisão estratégica e adaptação a diferentes cenários.	Baixa reprodutibilidade entre estudos e falta de padronização de modelos.
Adoção tecnológica	Potencial de integração com sistemas existentes e aplicabilidade em diferentes contextos (urbano, industrial, agrícola).	Resistência de operadores e gestores e custos de implementação elevados.
Escalabilidade	Possibilidade de aplicação em larga escala, inclusive em sistemas complexos.	Pouca validação prática em protótipos ou sistemas reais de grande porte.

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

De forma geral, apesar do avanço tecnológico, a análise revelou limitações significativas que comprometem a ampla aplicação da inteligência artificial no tratamento e monitoramento da qualidade da água. A dependência de grandes bases de dados é um dos principais entraves, uma vez que muitos modelos carecem de dados diversificados, o que dificulta sua

generalização para diferentes contextos. Além disso, a complexidade operacional e os altos custos de implementação representam um desafio, pois a aplicação em escala real demanda infraestrutura tecnológica robusta e mão de obra qualificada. Outro ponto crítico é a validação prática insuficiente: a maioria dos estudos permanece restrita à fase experimental,

com carência de testes em sistemas reais e sob diferentes condições ambientais.

Desafios e Oportunidades Futuras

Diante das limitações apresentadas, a revisão aponta oportunidades promissoras para o avanço da área. Entre as principais recomendações, destaca-se a necessidade de desenvolver modelos mais interpretáveis e robustos, que apresentem menor dependência de grandes volumes de dados. Também é fundamental realizar validações em ambientes reais, considerando as variabilidades climáticas e sazonais que afetam a qualidade da água.

Outro caminho é integrar a inteligência artificial a sistemas de monitoramento em tempo real, com foco em soluções de baixo custo e acessíveis para países em desenvolvimento. Por fim, sugere-se investigar abordagens híbridas que combinem IA e métodos tradicionais, de modo a aumentar a confiabilidade dos resultados e reduzir as incertezas associadas às previsões.

Conclusão

Essa revisão integrativa teve como objetivo avaliar o potencial da aplicação da inteligência artificial no tratamento e gerenciamento da água. Com base nos resultados analisados, conclui-se que a IA apresenta benefícios claros, incluindo maior confiabilidade, agilidade na tomada de decisão e otimização de processos, como controle de dosagem de coagulantes, previsão de variáveis críticas e monitoramento em tempo real.

No entanto, a implementação da IA enfrenta desafios significativos, principalmente relacionados à disponibilidade de dados confiáveis, à escolha adequada do modelo e à aceitação por parte dos profissionais do setor. Os estudos indicam que a eficácia das soluções de IA depende da adaptação dos modelos ao contexto operacional específico, bem como do suporte a infraestrutura tecnológica e capacitação técnica.

Para pesquisas futuras, recomenda-se explorar modelos híbridos que combinem técnicas de IA com métodos tradicionais, validar protótipos em escala real e investigar tecnologias emergentes, como sensores virtuais e aprendizado contínuo, para ampliar a aplicabilidade e a robustez das soluções. Assim, a IA se apresenta como uma ferramenta promissora e estratégica para o aprimoramento do tratamento de água e da gestão hídrica, quando aplicada de forma fundamentada e contextualizada.

Referências

1. United Nations, The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. UNESCO, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655> (acesso em 15 de agosto de 2025).
2. Lazaro LLB, Abram S, Giatti LL, Sinisgalli P, Jacobi PR. Assessing water scarcity narratives in Brazil – Challenges for urban governance. *Environmental Development*, 47, 100885, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100885>.
3. Di Bernardo L, Dantas AD, Voltan PEN. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 3ª edição. São Carlos: LDiBe, 2017.
4. Mdee OJ, Lwasa A, Sadiki N. Overview of the low-cost technologies for household water treatment in developing countries. *Water Practice and Technology*, 19 (8), 3051–3071, 2024. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.177>
5. Olsson G. Urban water supply automation – today and tomorrow. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 70 (4), 420–437, 2021. <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.115>
6. KAPELAN Z, WEISBORD E, BABOVIC E. Digital Water. Artificial Intelligence Solutions for the Water Sector. An IWA White Paper (2020). Disponível em: https://iwa-network.org/wp-content/uploads/2020/08/IWA_2020_Artificial_Intelligence_SCREEN.pdf (acesso em 14 de agosto de 2025).
7. Souza MT, Silva MD, Carvalho R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein (São Paulo)* 8 (1), Jan-Mar 2010. <https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134>
8. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;372:n71. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
9. Mabrok MA, Saad A, Ahmed T, Alsayab H. Modeling and simulations of Water Network Distribution to Assess Water Quality: Kuwait as a case study. *Alexandria Engineering Journal*, v. 61, n. 12, p. 11859–11877, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.05.038>
10. Kamyab H, Khade T, Chelliapan S, Kamarposhti MS, Rezania S, Yusuf M, Farajnezhad M, Abbasi M, Jeon BH, Ahn Y. The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management. *Results in Engineering*, 101566, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101566>
11. Elkhartbotly MR, Seddik M, Khalifa A. Toward Sustainable Water: Prediction of non-revenue water via Artificial Neural Network and Multiple Linear

- Regression modelling approach in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 13, n. 5, 101673, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101673>
12. Nti EK, Cobbina SJ, Attafuah EE, Senanu LD, Amenyeku G, Gyan MA, Forson D, Safo AR. Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security. v. 9, n. 7, e18170, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18170>
13. Bajany DM, Zhang L, Xia X. Model predictive control for water management and energy security in arid/semiarid regions. *Journal of Automation and Intelligence*, v. 1, n. 1, 100001, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jai.2022.100001>
14. Silva WTP, Souza MAA. Modelo para o combate a crises de abastecimento urbano de água. Paranoá, Brasília, n. 10, p. 95-104, 2013. DOI: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n10.2013.12127>
15. Hama AR, Ghafour Z, Suhili RA, Latif SD. Optimization model for cost estimation of decentralized wastewater treatment units. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 13, n. 6, 101751, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101751>
16. Nnaji PC, Anadebe VC, Agu C, Ezemagu IG, Edeh JC, Ohanehi AA, Onukwuli OD, Eluno EE. Statistical computation and artificial neural algorithm modeling for the treatment of dye wastewater using mucuna sloanei as coagulant and study of the generated sludge. *Results in Engineering*, v. 19, 101216, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101216>
17. Lin D, Sun Q. Development of hybrid mechanistic-artificial intelligence computational technique for separation of organic molecules from water in polymeric membranes. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 42, 102771, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102771>
18. Santos FCR, Librantz AFH, Dias CG, Rodrigues SG. Intelligent system for improving dosage control. v. 39, n. 1, p. 33-38, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i1.29353>
19. Lermontov A, Yokoyama L, Lermontov M, Machado MAS. Aplicação da Lógica Nebulosa na Parametrização de um Novo Índice de Qualidade das Águas. *Engvista*, v. 10, n. 2, p. 106-125, 2008. DOI: <https://doi.org/10.22409/engvista.v10i2.218>

Contribuições do autor

Todos os autores foram responsáveis pela concepção, redação e aprovação da versão final do artigo.

Editor chefe

José Cláudio Garcia Lira Neto

Copyright © 2025 Revista Científica Integrada.

Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da licença Creative Commons CC BY. Esta licença permite que terceiros distribuam, remixem, modifiquem e desenvolvam seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe deem crédito pela criação original. É a licença mais flexível de todas as licenças disponíveis. Recomenda-se maximizar a divulgação e utilização de materiais licenciados.