

Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da disponibilidade hídrica em reservatórios: uma revisão integrativa da literatura

Remote sensing applied to the monitoring of water availability in reservoirs: an integrative literature review

Teledetección aplicada al monitoreo de la disponibilidad hídrica en embalses: una revisión integradora de la literatura

DOI: 10.5281/zenodo.23318101

Recebido: 09 out 2026

Aprovado: 10 out 2026

Aleffy Gil Pereira da Silva

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental

Instituição de formação: Universidade Federal da Paraíba

Endereço: João Pessoa, Paraíba, Brasil.

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0002-7454-699X>E-mail: eng.aleffy@gmail.com

RESUMO

A disponibilidade hídrica em reservatórios superficiais constitui elemento central da segurança hídrica, mas o monitoramento convencional depende de redes de estações limitadas e desigualmente distribuídas. Objetivou-se analisar, na literatura científica recente, as contribuições e as limitações do sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da disponibilidade hídrica em reservatórios. Trata-se de revisão integrativa da literatura, conduzida nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Portal de Periódicos Capes e SciELO, com recorte temporal de 2021 a 2026 e relato orientado pela recomendação PRISMA 2020. Após as etapas de identificação, triagem e elegibilidade, 18 estudos compuseram a amostra final. Os resultados evidenciaram três abordagens predominantes: a extração da área inundada por índices espectrais aplicados a imagens ópticas e de radar, a estimativa da cota altimétrica por altimetria radar e laser e a integração das duas informações em curvas de cota, área e volume. Os estudos relataram coeficientes de correlação entre 0,74 e 0,98 e erros quadráticos médios inferiores a 1 metro para a cota em grandes reservatórios, com desempenho inferior em corpos hídricos pequenos, estreitos e vegetados. A cobertura de nuvens, a ausência de batimetria e a subestimação sistemática das bordas inundadas foram as limitações mais frequentes. Conclui-se que o sensoriamento remoto apresenta maturidade operacional suficiente para subsidiar a gestão de reservatórios, embora a transposição para corpos hídricos de pequeno porte, predominantes em regiões semiáridas, exija calibração local e integração com dados de campo.

Palavras-chave: Açudes. Altimetria por satélite. Hidrologia. Imagens de satélite. Observação da Terra.

ABSTRACT

Water availability in surface reservoirs is a central element of water security, yet conventional monitoring depends on gauge networks that are limited and unevenly distributed. This study aimed to analyze, in recent scientific literature, the contributions and limitations of remote sensing applied to the monitoring of water availability in reservoirs. This is an integrative literature review conducted in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Capes Journal Portal and SciELO databases, covering the period from 2021 to 2026, with reporting guided by the PRISMA 2020 statement. After identification, screening and eligibility assessment, 18 studies composed the final sample. The results revealed three predominant approaches: extraction of inundated area through spectral indices applied to

optical and radar imagery, estimation of water surface elevation through radar and laser altimetry, and integration of both sources into level, area and storage curves. The studies reported correlation coefficients between 0.74 and 0.98 and root mean square errors below 1 meter for water surface elevation in large reservoirs, with lower performance in small, narrow and vegetated water bodies. Cloud cover, the absence of bathymetry and the systematic underestimation of inundated edges were the most frequent limitations. It is concluded that remote sensing already presents sufficient operational maturity to support reservoir management, although its transfer to small water bodies, which predominate in semiarid regions, requires local calibration and integration with field data.

Keywords: Dams. Earth observation. Hydrology. Satellite altimetry. Satellite imagery.

RESUMEN

La disponibilidad hídrica en embalses superficiales constituye un elemento central de la seguridad hídrica, pero el monitoreo convencional depende de redes de estaciones limitadas y desigualmente distribuidas. Se objetivó analizar, en la literatura científica reciente, las contribuciones y las limitaciones de la teledetección aplicada al monitoreo de la disponibilidad hídrica en embalses. Se trata de una revisión integradora de la literatura, realizada en las bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Portal de Periódicos Capes y SciELO, con recorte temporal de 2021 a 2026 y reporte orientado por la recomendación PRISMA 2020. Tras las etapas de identificación, cribado y elegibilidad, 18 estudios compusieron la muestra final. Los resultados evidenciaron tres enfoques predominantes: la extracción del área inundada mediante índices espectrales aplicados a imágenes ópticas y de radar, la estimación de la cota mediante altimetría radar y láser, y la integración de ambas informaciones en curvas de cota, área y volumen. Los estudios reportaron coeficientes de correlación entre 0,74 y 0,98 y errores cuadráticos medios inferiores a 1 metro para la cota en grandes embalses, con desempeño inferior en cuerpos de agua pequeños, estrechos y con vegetación. La cobertura de nubes, la ausencia de batimetría y la subestimación sistemática de los bordes inundados fueron las limitaciones más frecuentes. Se concluye que la teledetección presenta madurez operacional suficiente para apoyar la gestión de embalses, aunque su transposición a cuerpos de agua de pequeño porte, predominantes en regiones semiáridas, exige calibración local e integración con datos de campo.

Palabras clave: Altimetría satelital. Hidrología. Imágenes de satélite. Observación de la Tierra. Represas.

1. INTRODUÇÃO

A água armazenada em reservatórios superficiais sustenta o abastecimento público, a irrigação, a geração de energia e a manutenção dos ecossistemas aquáticos, de modo que a quantificação confiável do volume disponível é condição prévia para qualquer decisão de alocação. O relatório mundial sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos registra que bilhões de pessoas vivem sob situações de escassez temporária ou permanente e destaca que a ausência de informação hidrológica consistente amplia a vulnerabilidade social e aumenta o risco de conflitos pelo uso da água (Unesco, 2024). Nesse contexto, o monitoramento da disponibilidade hídrica deixa de ser tema estritamente técnico e passa a integrar a agenda de saúde coletiva e de justiça ambiental, pois a intermitência do abastecimento repercute diretamente nas condições sanitárias das populações atendidas.

No Brasil, os relatórios de conjuntura dos recursos hídricos reiteram que a segurança hídrica nacional depende de um conjunto heterogêneo de reservatórios, que varia de grandes barragens de usos múltiplos a milhares de açudes de pequeno porte concentrados na região semiárida (Agência Nacional de

Águas e Saneamento Básico, 2025). Esses pequenos corpos hídricos raramente dispõem de réguas limnimétricas, de curvas de cota e volume atualizadas ou de rotinas sistemáticas de leitura, o que produz uma assimetria informacional relevante: justamente onde a variabilidade pluviométrica é maior e o risco de colapso do abastecimento é mais elevado, a base de dados é mais frágil. A situação não é exclusivamente brasileira, pois revisões regionais mostram que a densidade das redes fluviométricas vem diminuindo em diversos países do Sul global, com redução de centenas para poucas dezenas de estações operacionais em grandes bacias africanas (Papa *et al.*, 2023).

O monitoramento convencional, apoiado em estações de medição *in situ*, continua sendo a referência de acurácia, porém apresenta limitações estruturais de cobertura espacial, de continuidade temporal e de custo de manutenção. A compilação de séries observadas para mais de quatro mil reservatórios em escala global evidencia forte concentração dos registros em países do Hemisfério Norte e cobertura escassa em regiões áridas e semiáridas, precisamente aquelas em que foram identificadas as reduções mais significativas de armazenamento nas últimas décadas (Zhang *et al.*, 2026). Essa lacuna sustenta o interesse crescente por fontes alternativas de informação capazes de operar de forma sistemática, independente de infraestrutura local e com custo marginal reduzido.

O sensoriamento remoto responde a essa demanda por meio de duas famílias principais de observação. A primeira recupera a área da superfície inundada a partir de imagens ópticas e de radar, geralmente com índices espectrais de água que exploram o contraste entre as bandas do verde, do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas. A segunda estima a cota da superfície da água por altimetria radar e laser, com séries temporais construídas em estações virtuais posicionadas sobre o espelho de água. A combinação das duas famílias permite reconstruir relações de cota, área e volume e, por consequência, estimar variações de armazenamento sem acesso direto ao reservatório. Revisões de escopo recentes indicam intensificação da produção científica sobre o tema, com predominância das missões Sentinel-3 e CryoSat-2 e crescimento acelerado das aplicações do ICESat-2 (Kossieris *et al.*, 2024).

A despeito desse avanço, a literatura permanece dispersa entre comunidades disciplinares distintas, com estudos de validação de missões altimétricas, trabalhos de classificação de imagens em plataformas de computação em nuvem, propostas de reconstrução de curvas volumétricas e produções voltadas à gestão operacional. Essa dispersão dificulta a leitura consolidada sobre o que já é operacionalmente confiável, sobre quais magnitudes de erro são esperadas em cada abordagem e sobre quais contextos permanecem mal atendidos. A revisão integrativa é o desenho adequado para esse tipo de síntese, pois admite a combinação de estudos com delineamentos diferentes e permite identificar padrões, contradições e lacunas em um corpo de conhecimento heterogêneo (Almeida *et al.*, 2024).

Diante do exposto, formulou-se a seguinte questão norteadora: quais são as contribuições e as limitações do sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da disponibilidade hídrica em reservatórios, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026? O objetivo geral consistiu em analisar as evidências recentes sobre o emprego do sensoriamento remoto no monitoramento da disponibilidade hídrica em reservatórios. Como objetivos específicos, buscou-se caracterizar os estudos quanto à origem geográfica e ao delineamento, descrever os sensores, os índices e os algoritmos utilizados, sintetizar as medidas de desempenho relatadas e sistematizar as limitações metodológicas e as lacunas de pesquisa identificadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial que orienta esta revisão articula três eixos conceituais: a noção de disponibilidade hídrica aplicada a reservatórios, os fundamentos físicos da observação remota de corpos hídricos continentais e a infraestrutura computacional que viabiliza o processamento em larga escala das séries de imagens.

2.1 Disponibilidade hídrica e segurança hídrica em reservatórios

A disponibilidade hídrica em um reservatório corresponde ao volume efetivamente passível de uso em determinado instante, grandeza que resulta da interação entre aflúências, precipitação direta, evaporação, infiltração, retiradas outorgadas e retiradas não registradas. Sua determinação operacional depende da curva que relaciona a cota do nível de água ao volume armazenado, obtida historicamente por levantamentos batimétricos. Como essas curvas envelhecem em razão do assoreamento progressivo, a estimativa de volume pode acumular erros sistemáticos ao longo de décadas, o que justifica o interesse por métodos de atualização periódica a baixo custo (Gui *et al.*, 2025).

A segurança hídrica, por sua vez, incorpora a dimensão temporal do risco, pois não basta conhecer o volume presente sem compreender a trajetória de depleção e a probabilidade de recuperação. Os relatórios nacionais de conjuntura destacam que a gestão de reservatórios no semiárido brasileiro opera em regime de incerteza elevada, com alternância entre períodos de recuperação e eventos prolongados de seca que reduzem drasticamente o armazenamento útil (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2025). Em escala internacional, análises que combinam séries de área inundada e registros oficiais de volume na região de Marmara mostraram declínios acentuados associados às secas de 2014 e de 2021, com tendência predominante de redução do armazenamento e atribuição conjunta a variabilidade climática e a pressões antrópicas de irrigação, abastecimento urbano e produção de energia (Akgün *et al.*, 2026).

Essa dimensão temporal sustenta o argumento central de que o monitoramento precisa ser frequente e espacialmente extensivo, condição que a rede convencional de estações não consegue atender integralmente. A quantificação de tendências de longo prazo em escala global reforça o diagnóstico, pois a análise de mais de mil reservatórios com séries superiores a vinte anos identificou declínios significativos de nível em parcela expressiva das unidades situadas em ambientes áridos e semiáridos (Zhang *et al.*, 2026).

2.2 Fundamentos do sensoriamento remoto aplicado a corpos hídricos continentais

A detecção remota de água superficial baseia-se no comportamento espectral característico da água líquida, que absorve intensamente a radiação no infravermelho próximo e no infravermelho de ondas curtas e reflete comparativamente mais na faixa do verde. Dessa propriedade derivam os índices normalizados de diferença de água, cuja aplicação a imagens Landsat e Sentinel-2 permite segmentar o espelho de água com procedimentos de limiarização. A aplicação do índice modificado a séries do Landsat 8 no reservatório de Poço da Cruz, em Pernambuco, demonstrou que a área inundada acompanha os eventos de precipitação regional e que o método é operacionalmente viável com softwares livres (Almeida *et al.*, 2023).

As imagens de radar de abertura sintética oferecem alternativa relevante porque independem da iluminação solar e atravessam a cobertura de nuvens. A comparação entre produtos do Sentinel-1, do Landsat 8 e do Sentinel-2 no monitoramento operacional do nível de um reservatório semiárido indicou acurácia equivalente entre a abordagem de radar e a abordagem óptica, com vantagem da polarização vertical sobre a cruzada e melhor desempenho das imagens ópticas nos braços de montante, onde a geometria do corpo hídrico é mais complexa (Souza *et al.*, 2022). O mesmo estudo observou que a maioria das cenas ópticas do período analisado foi inutilizada pela nebulosidade, o que restringe estratégias que dependam exclusivamente do sensoriamento óptico.

A altimetria por satélite constitui a terceira via de observação e mede diretamente a elevação da superfície da água. A avaliação de dados do Sentinel-3 em lagos e reservatórios da província de Jiangsu mostrou correlações superiores a 0,5 em todos os corpos hídricos analisados e erros quadráticos médios inferiores a 1 metro, com melhor desempenho do algoritmo de reposicionamento baseado no centro de gravidade do deslocamento (Xu *et al.*, 2024). Em ambientes de montanha e de reservatórios em cascata, a taxa de detecção mostrou-se fortemente dependente da versão do comando de rastreamento em malha aberta, com progressão de 36,8 por cento para 63,2 por cento no Sentinel-3A conforme a atualização das tabelas de referência altimétrica (Cheng; Zhang; Yao, 2023).

A integração das três vias permite converter observações de área e de cota em variações de armazenamento. A construção de conjuntos de dados de nível, área e variação de volume para centenas de

reservatórios chineses, com base na combinação de seis missões altimétricas e de imagens Landsat e Sentinel-2, alcançou correlação mediana de 0,89 com registros de campo e erro normalizado da ordem de 11 por cento, resultado que ilustra o grau de maturidade já atingido pela abordagem integrada em grandes reservatórios (Shen *et al.*, 2022).

2.3 Plataformas de computação em nuvem e algoritmos de classificação

A viabilidade operacional do monitoramento remoto depende da capacidade de processar séries longas de imagens, exigência que foi significativamente facilitada pelas plataformas de computação em nuvem voltadas à observação da Terra. O monitoramento mensal de oito reservatórios do estado do Piauí entre 2015 e 2021, conduzido integralmente em ambiente de nuvem com imagens Sentinel-2, demonstrou a operacionalidade dessa arquitetura e revelou respostas defasadas da área inundada em relação à precipitação, com atrasos de dois a quatro meses em parte das unidades (Moraes, 2023).

Sobre essa base computacional, algoritmos de classificação supervisionada e técnicas de otimização ampliaram o escopo das estimativas. A comparação entre produtos de mapeamento temático, índice espectral e classificador de máquina de vetores de suporte em um reservatório do semiárido pernambucano registrou reduções de área entre 63,42 por cento e 69,49 por cento no período de 2012 a 2018, com proximidade entre os resultados do índice espectral e do classificador e queda da acurácia nos anos de seca mais intensa (Carvalho *et al.*, 2023). Em outra direção, a aplicação de algoritmo genético associado a índice espectral e limiarização automática permitiu estimar o volume de um grande lago norte-americano sem recurso a dados batimétricos, com erro percentual absoluto médio de 28,85 por cento (Golmohammadi *et al.*, 2025).

3. METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, método que permite a síntese de estudos com delineamentos distintos em torno de uma mesma questão e possibilita a identificação de padrões, de contradições e de lacunas em corpos de conhecimento heterogêneos (Almeida *et al.*, 2024). O percurso metodológico seguiu seis etapas: elaboração da questão norteadora, definição dos critérios de inclusão e de exclusão, busca nas bases de dados, avaliação dos estudos recuperados, extração e análise dos dados e apresentação da síntese. O relato das etapas de identificação, triagem e elegibilidade foi orientado pela recomendação PRISMA 2020, adotada aqui como referencial de transparência do processo de seleção (Page *et al.*, 2021).

A questão norteadora foi assim definida: quais são as contribuições e as limitações do sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da disponibilidade hídrica em reservatórios, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026? A pergunta foi estruturada em três componentes: população, correspondente a reservatórios, açudes e lagos de barragem; interesse, correspondente ao emprego de técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de área inundada, de cota ou de volume armazenado; e contexto, correspondente à gestão da disponibilidade e da segurança hídrica.

A busca foi realizada em cinco bases: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Portal de Periódicos da Capes e SciELO. Foram empregados descritores em português, inglês e espanhol, combinados por operadores booleanos. A estratégia central, adaptada à sintaxe de cada base, correspondeu à seguinte expressão: (“remote sensing” OR “satellite altimetry” OR “earth observation”) AND (reservoir OR impoundment OR “water body”) AND (“water availability” OR “water storage” OR “water level” OR “surface area” OR volume). Os equivalentes em português incluíram sensoriamento remoto, altimetria por satélite, reservatório, açude, disponibilidade hídrica, armazenamento e área inundada. As buscas foram executadas entre 12 de agosto e 2 de setembro de 2026.

Foram adotados como critérios de inclusão: artigos completos publicados em periódicos revisados por pares entre 2021 e 2026; textos redigidos em português, inglês ou espanhol; estudos cujo objeto central fosse a estimativa de área inundada, de cota ou de volume de reservatórios, lagos de barragem ou açudes por meio de dados de sensoriamento remoto; e trabalhos que apresentassem resultados de desempenho, de validação ou de síntese da literatura. Foram excluídos: estudos cujo único desfecho fosse a qualidade da água, sem estimativa de quantidade; trabalhos voltados exclusivamente a rios, estuários, oceanos, geleiras ou águas subterrâneas; resumos de eventos, capítulos de livro, editoriais, cartas, notas técnicas, teses e dissertações; publicações sem acesso ao texto completo; e duplicatas entre bases.

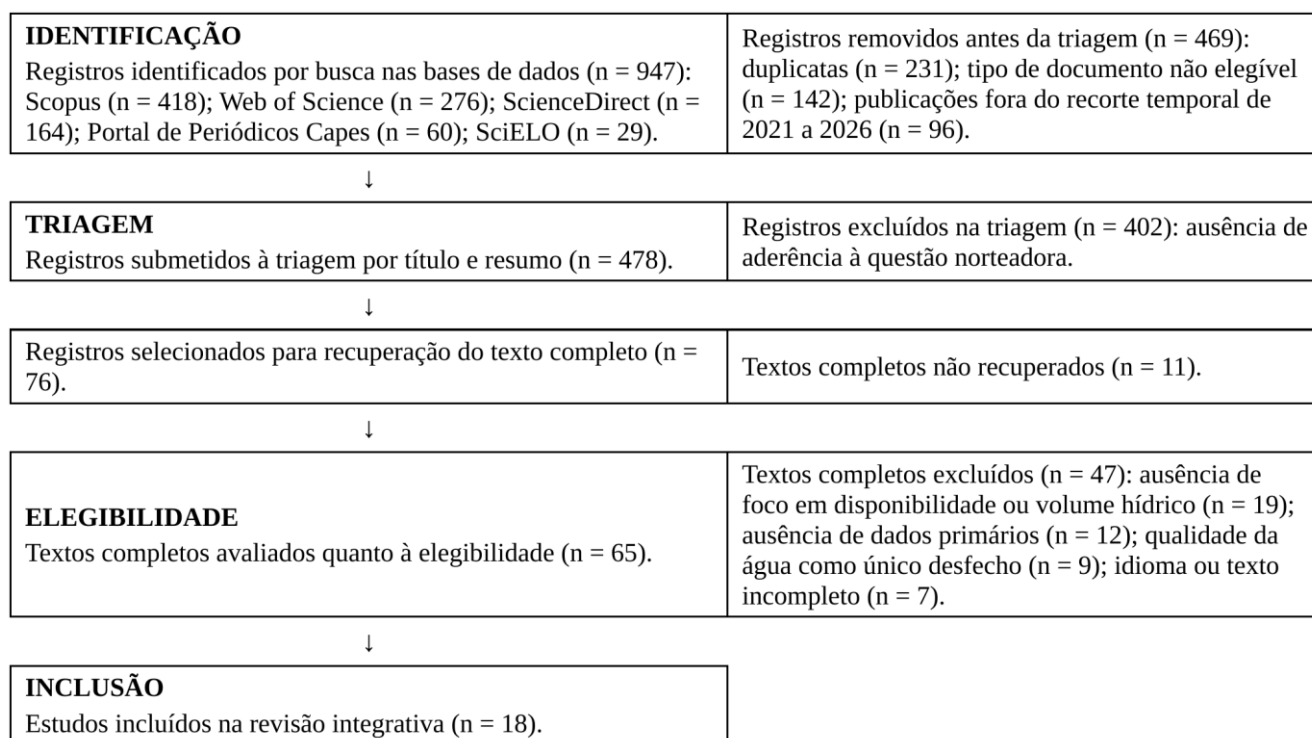
O processo de seleção ocorreu em quatro fases. Na identificação, foram recuperados 947 registros. A remoção prévia à triagem eliminou 469 registros, sendo 231 duplicatas, 142 documentos de tipo não elegível e 96 publicações fora do recorte temporal. Na triagem por título e resumo, 478 registros foram avaliados e 402 foram excluídos por não atenderem à questão norteadora. Dos 76 registros selecionados para recuperação, 11 não tiveram o texto completo acessível. Entre os 65 textos completos avaliados quanto à elegibilidade, 47 foram excluídos pelos motivos detalhados na Figura 1, resultando em 18 estudos incluídos na síntese final.

A extração dos dados foi realizada em instrumento próprio, estruturado com os seguintes campos: autoria, ano de publicação, periódico, país ou região do estudo, delineamento, sensores e missões utilizados, índices e algoritmos empregados, desfechos de desempenho e limitações relatadas. A análise dos dados

seguiu procedimento descritivo e interpretativo, com agrupamento dos achados em categorias temáticas construídas a partir da leitura integral dos textos: caracterização dos estudos, abordagens metodológicas e desempenho, limitações e lacunas, e implicações para a gestão.

Por se tratar de pesquisa desenvolvida com base em material já publicado e de domínio público, sem coleta de dados com seres humanos ou animais, o estudo dispensa apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa, nos termos da legislação brasileira aplicável. Todas as fontes utilizadas estão integralmente referenciadas, e nenhuma imagem, fotografia ou conjunto de dados de terceiros protegido por direitos autorais foi reproduzido neste manuscrito.

Figura 1. Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, conforme a recomendação PRISMA 2020.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026), com base em Page *et al.* (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra final reuniu 18 estudos publicados entre 2022 e 2026, distribuídos em 13 periódicos distintos. A Tabela 1 apresenta a caracterização dos estudos selecionados quanto à autoria, ao ano de publicação, ao país ou região investigada e aos principais desfechos relatados.

Tabela 1. Caracterização dos estudos incluídos na revisão integrativa quanto à autoria, ao ano, ao país e aos principais desfechos (n = 18).

Autor	Ano	País	Principais desfechos
Shen <i>et al.</i>	2022	China	Conjunto de dados de nível, área e variação de armazenamento para 338 reservatórios entre 2010 e 2021; correlação mediana de 0,89 e erro normalizado de 11 por cento frente a dados de campo; 71 de 74 reservatórios com erro de cota inferior a 1 metro.
Souza <i>et al.</i>	2022	Brasil	Estimativas de nível por radar do Sentinel-1 com acurácia equivalente ao índice espectral do Landsat 8; polarização vertical superior à cruzada; imagens ópticas melhores nos braços de montante; nebulosidade inviabilizou a maioria das cenas ópticas.
Almeida <i>et al.</i>	2023	Brasil	Área inundada do reservatório de Poço da Cruz mapeada por índice modificado em imagens Landsat 8 entre 2015 e 2020; extremos mínimo em outubro de 2017 e máximo em outubro de 2020; coerência com dados de precipitação regional.
Carvalho <i>et al.</i>	2023	Brasil	Comparação de três métodos no reservatório Serrinha II entre 2012 e 2018; reduções de área de 63,42, 69,49 e 67,69 por cento; índice espectral próximo ao classificador de vetores de suporte; acurácia menor em anos de seca.
Cheng; Zhang; Yao	2023	China	Taxa de detecção do Sentinel-3A em bacias de montanha e reservatórios em cascata elevou-se de 36,8 para 63,2 por cento com atualização do rastreamento em malha aberta; variações estacionais superiores a 60 metros excedem a janela do altímetro.
Morais	2023	Brasil	Monitoramento mensal de oito reservatórios do Piauí entre 2015 e 2021 em plataforma de nuvem; respostas da área inundada defasadas de dois a quatro meses em relação à chuva; correlação global fraca e negativa; nebulosidade reduziu a disponibilidade de cenas.
Papa <i>et al.</i>	2023	África	Revisão sobre monitoramento de águas superficiais africanas por satélite; redução de mais de 400 para cerca de 15 estações operacionais na bacia do Congo; incertezas altimétricas de poucos centímetros a dezenas de centímetros conforme o ambiente.
Kossieris <i>et al.</i>	2024	Global	Revisão de escopo de 48 estudos; Sentinel-3 presente em 20 trabalhos e CryoSat-2 em 12; crescimento das aplicações do ICESat-2; melhor desempenho em modo de abertura sintética; escassez de estudos que associem altimetria e aprendizado de máquina.
Pascal <i>et al.</i>	2024	Índia	Volumes de cerca de 500 pequenos reservatórios estimados por modelos digitais de elevação; erro percentual absoluto médio de 47 a 78 por cento com modelos globais e de 17 por cento com resolução de 12 metros; subestimação sistemática por suavização de diques.
Souza <i>et al.</i>	2024	Brasil	Algoritmo automático não supervisionado aplicado a imagens Sentinel-2 de nível 2A em reservatórios do sertão pernambucano entre 2016 e 2024; subestimação da área nas bordas; correção por rede neural eficaz apenas com amostra de calibração ampla e representativa.
Xu <i>et al.</i>	2024	China	Séries mensais de nível por altimetria do Sentinel-3 em lagos e reservatórios de Jiangsu entre 2017 e 2021; correlação superior a 0,5 em todos os corpos hídricos e erro quadrático médio inferior a 1 metro; melhor desempenho do reposicionamento por centro de gravidade.
Chagas; Falcão; Oliveira	2025	Portugal	Fluxo automatizado em nuvem combinando índice espectral do Sentinel-2 e limiarização automática do Sentinel-1; coeficiente de determinação superior a 0,82 em dezesseis de dezessete grandes reservatórios; detecção confiável apenas acima de três hectares.
Golmohammadi <i>et al.</i>	2025	Estados Unidos	Volume do lago Okeechobee estimado por índice espectral, limiarização automática e algoritmo genético, sem batimetria; erro percentual absoluto

Autor	Ano	País	Principais desfechos
			médio de 28,85 por cento; estimativa de 2.200 contra referência de 2.600 milhões de metros cúbicos.
Gui <i>et al.</i>	2025	China	Reconstrução da curva de cota, área e volume do reservatório de Hongjiadu; acurácia média de extração de área de 96 por cento para radar, 89 por cento para Landsat 8 e 88 por cento para Sentinel-2; coeficiente de determinação superior a 0,99 com dados de radar.
Otta <i>et al.</i>	2025	Estados Unidos	Metodologia de validação de armazenamento de reservatórios em modelos hidrológicos globais aplicada a sete reservatórios; produto altimétrico superior ao produto baseado em área quando a série excede cinco anos; incerteza associada ao pressuposto de relação linear entre área e elevação.
Slinski <i>et al.</i>	2025	Senegal	Deteção de água superficial em 22 açudes de pastagens do Ferlo entre 2022 e 2023; frequência anual de detecção de 68,2 por cento no conjunto e de 43,8 por cento em unidades menores de dez mil metros quadrados; doze açudes identificados como sentinela.
Akgün <i>et al.</i>	2026	Turquia	Áreas mensais obtidas por índice espectral em imagens Landsat correlacionadas a volumes oficiais na região de Marmara, com coeficientes de 0,74 a 0,98; quedas acentuadas nas secas de 2014 e 2021; tendência predominante de redução do armazenamento.
Zhang <i>et al.</i>	2026	Global	Base global com 4.134 séries observadas de nível de reservatórios; correlação de 0,87 e erro quadrático médio de 1,25 metro entre altimetria e campo em 183 unidades; declínio significativo em 16,9 por cento dos reservatórios, concentrado em ambientes áridos e semiáridos.

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.1 Caracterização dos estudos incluídos

A distribuição geográfica dos estudos revelou concentração em dois polos. O Brasil respondeu por cinco publicações, todas voltadas a reservatórios do Nordeste semiárido, e a China por quatro, com ênfase em grandes reservatórios e em conjuntos de dados de abrangência nacional. Três trabalhos adotaram escopo global ou continental, dois investigaram contextos dos Estados Unidos e as demais publicações trataram de casos na Índia, em Portugal, no Senegal e na Turquia. Essa configuração sugere que a produção científica se organiza em torno de dois interesses complementares: a validação de missões e de produtos em reservatórios de grande porte bem instrumentados e a adaptação de métodos a contextos de escassez de dados, nos quais a motivação aplicada é mais imediata.

Quanto ao delineamento, treze estudos foram classificados como empíricos, com aplicação e validação de métodos em áreas específicas, três como revisões de literatura ou de escopo e dois como construção e descrição de conjuntos de dados de referência. A presença de revisões recentes e de bases de dados abertas indica um campo em fase de consolidação, no qual já existe massa crítica suficiente para sínteses secundárias e para a produção de referenciais compartilhados de validação (Kossieris *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2026).

A escala temporal das séries analisadas variou de dois anos, em estudos de validação de produtos específicos, a doze anos, em bases de dados construídas para análise de tendências. Essa variação é relevante para a interpretação dos resultados, pois séries curtas favorecem a avaliação de acurácia instantânea, enquanto séries longas permitem detectar tendências de depleção e padrões de recuperação após eventos de seca.

4.2 Abordagens metodológicas e desempenho relatado

As abordagens identificadas organizaram-se em três grupos. O primeiro grupo, presente em oito estudos, baseou-se na extração da área inundada por índices espectrais aplicados a imagens ópticas, com predominância do índice normalizado de diferença de água e de sua versão modificada. Os desempenhos relatados foram consistentes quando a área extraída foi confrontada com registros oficiais de volume, com correlações entre 0,74 e 0,98 em reservatórios turcos (Akgün *et al.*, 2026) e com acurácia média de extração de 89 por cento para imagens Landsat 8 e de 88 por cento para Sentinel-2 em um reservatório chinês (Gui *et al.*, 2025).

O segundo grupo, presente em cinco estudos, apoiou-se na altimetria radar e laser para estimar diretamente a cota da superfície da água. Os erros quadráticos médios relatados situaram-se, na maior parte dos casos, abaixo de 1 metro, patamar observado tanto na avaliação do Sentinel-3 em lagos de Jiangsu (Xu *et al.*, 2024) quanto na validação de séries combinadas de múltiplas missões, em que 71 de 74 reservatórios verificados apresentaram erro inferior a esse limite (Shen *et al.*, 2022). A consolidação de registros altimétricos em base global confirmou essa ordem de grandeza, com correlação de 0,87 e erro quadrático médio de 1,25 metro em 183 reservatórios pareados com estações de campo (Zhang *et al.*, 2026).

O terceiro grupo, presente em cinco estudos, integrou área e cota para reconstruir curvas de cota, área e volume ou para estimar diretamente variações de armazenamento. Os resultados mais acurados foram obtidos com dados de radar de abertura sintética, cuja curva de cota e área apresentou coeficiente de determinação superior a 0,99, permitindo estimar perda de capacidade de armazenamento compatível com a estimativa obtida por sedimentação (Gui *et al.*, 2025). Na ausência de batimetria, a combinação de índice espectral, limiarização automática e otimização por algoritmo genético produziu estimativa de volume cerca de 15 por cento inferior ao valor de referência, com erro percentual absoluto médio próximo a 29 por cento, o que delimita com clareza o custo de acurácia associado à dispensa de levantamento batimétrico (Golmohammadi *et al.*, 2025).

A complementaridade entre sensores emergiu como achado transversal. O uso conjunto de radar e de imagens ópticas mostrou-se vantajoso porque a primeira fonte garante continuidade temporal sob

nebulosidade e a segunda oferece melhor delimitação em geometrias complexas (Souza *et al.*, 2022). Essa lógica foi incorporada em fluxos automatizados que combinam índice espectral sobre imagens ópticas e limiarização automática sobre imagens de radar, estratégia que reproduziu adequadamente a área observada em dezesseis dos dezessete grandes reservatórios analisados em bacias portuguesas (Chagas; Falcão; Oliveira, 2025).

Também merece registro o papel crescente dos métodos de aprendizado de máquina na correção de vieses sistemáticos. A aplicação de rede neural artificial à correção da subestimação produzida por algoritmo não supervisionado em reservatórios do sertão pernambucano melhorou as métricas de desempenho, porém somente quando a amostra de calibração foi suficientemente ampla e representativa para o treinamento do modelo (Souza *et al.*, 2024). Esse condicionamento é metodologicamente significativo, pois indica que o ganho proporcionado pelo aprendizado de máquina não é transferível de forma automática entre reservatórios com características morfológicas distintas.

4.3 Limitações e lacunas identificadas

A cobertura de nuvens foi a limitação mais recorrente entre os estudos que utilizaram sensores ópticos. O problema é particularmente crítico porque se concentra nos períodos chuvosos, justamente quando as variações de armazenamento são mais intensas e a informação é mais necessária para a operação dos reservatórios. Essa restrição comprometeu a disponibilidade de cenas no monitoramento mensal de reservatórios piauienses (Morais, 2023) e inviabilizou a maior parte das imagens ópticas em um estudo de monitoramento operacional no semiárido pernambucano (Souza *et al.*, 2022).

A segunda limitação diz respeito ao porte e à geometria dos corpos hídricos. Estudos convergiram ao indicar que a acurácia decresce de modo acentuado em reservatórios pequenos, estreitos ou com margens vegetadas. Em bacias portuguesas, a detecção mostrou-se confiável apenas para áreas superiores a três hectares, com subestimação sistemática abaixo desse limiar (Chagas; Falcão; Oliveira, 2025). Em pastagens do Senegal, a frequência anual de detecção caiu de 68,2 por cento, considerando todos os açudes, para 43,8 por cento nas unidades com menos de dez mil metros quadrados (Slinski *et al.*, 2025). Na Índia, estimativas de volume de pequenos reservatórios obtidas a partir de modelos digitais de elevação globais apresentaram erros percentuais absolutos médios entre 47 por cento e 78 por cento, reduzidos para aproximadamente 17 por cento apenas com modelos de resolução de 12 metros (Pascal *et al.*, 2024).

Esse conjunto de evidências configura a lacuna mais relevante do campo, pois os corpos hídricos de pequeno porte são exatamente aqueles que predominam em regiões semiáridas e que carecem de instrumentação convencional. Há, portanto, uma inversão entre necessidade e capacidade: o desempenho

do sensoriamento remoto é mais robusto onde a rede de campo já é densa e mais frágil onde a informação alternativa seria mais valiosa.

A terceira limitação refere-se à ausência ou ao envelhecimento das curvas de cota e volume. Sem batimetria atualizada, a conversão de área e de cota em volume depende de pressupostos simplificadores, como a relação linear entre área e elevação, cuja adoção foi explicitamente apontada como fonte de incerteza na validação de modelos hidrológicos globais (Otta *et al.*, 2025). O mesmo estudo observou que a normalização das séries de armazenamento, adotada para viabilizar a comparação, preserva a avaliação do ritmo de enchimento e de depleção, porém suprime a informação sobre volumes absolutos, restrição que limita a aplicação direta dos resultados à alocação de água.

Limitações de natureza técnica relacionadas à altimetria também foram documentadas. Reservatórios com variação estacional de nível superior a sessenta metros excedem a janela de rastreamento dos altímetros analisados, o que impede a obtenção de séries completas (Cheng; Zhang; Yao, 2023). Além disso, a cobertura altimétrica é intrinsecamente descontínua no espaço, pois depende da sobreposição entre as órbitas e a geometria do espelho de água, razão pela qual metade do armazenamento de reservatórios chineses não pôde ser incluída em um conjunto de dados nacional por insuficiência de passagens (Shen *et al.*, 2022).

Por fim, duas lacunas de agenda foram explicitadas pela literatura de síntese. A primeira é a escassez de estudos que articulem dados altimétricos e técnicas de aprendizado de máquina, combinação ainda pouco explorada apesar do potencial de preenchimento de falhas nas séries temporais (Kossieris *et al.*, 2024). A segunda é a concentração das séries observadas de referência em países de renda alta do Hemisfério Norte, o que fragiliza a validação dos produtos remotos precisamente nas regiões em que as tendências de declínio são mais pronunciadas (Zhang *et al.*, 2026).

4.4 Implicações para a gestão da disponibilidade hídrica

Os achados sustentam três implicações práticas. A primeira é que o sensoriamento remoto já reúne condições técnicas para integrar rotinas operacionais de monitoramento de grandes reservatórios, na condição de complemento e não de substituto da rede de campo. Os patamares de erro relatados, da ordem de um metro para a cota e de poucos pontos percentuais para a variação de armazenamento em unidades de grande porte, são compatíveis com decisões de alocação de médio prazo, embora não substituam a precisão exigida em operações de controle de cheias.

A segunda implicação envolve o desenho de arranjos híbridos de monitoramento. A comparação entre produtos de observação da Terra, modelos hidrológicos e observações de campo em pastagens do

Senegal mostrou divergências sistemáticas no momento de secagem dos açudes, com o modelo retendo água por mais tempo do que indicavam as imagens, e identificou um subconjunto de doze corpos hídricos capaz de funcionar como sentinela do comportamento regional (Slinski *et al.*, 2025). A estratégia de eleger unidades sentinela, instrumentadas em campo e acompanhadas por satélite, oferece caminho concreto para regiões que não dispõem de recursos para instrumentar o conjunto dos reservatórios.

A terceira implicação é de natureza institucional e diz respeito à produção de dados de referência. A existência de conjuntos abertos de nível, área e variação de armazenamento reduz substancialmente o custo de entrada para órgãos gestores e para grupos de pesquisa, pois dispensa a reconstrução integral das séries a cada nova aplicação (Shen *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2026). Para o contexto brasileiro, a articulação entre essas bases globais, os registros nacionais de monitoramento e os estudos locais já consolidados no semiárido constitui oportunidade de qualificação da informação hidrológica com investimento marginal reduzido (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2025).

Cumprir reconhecer as limitações desta revisão. A restrição a cinco bases de dados e a três idiomas pode ter deixado fora publicações relevantes veiculadas em repositórios institucionais ou em periódicos de circulação regional. A exclusão de teses, dissertações e trabalhos de eventos, adotada para preservar a homogeneidade do corpus revisado por pares, reduziu o acesso a experiências aplicadas de gestão que frequentemente circulam nesses formatos. Por fim, a heterogeneidade das métricas relatadas pelos estudos impediu qualquer tentativa de síntese quantitativa, de modo que a comparação entre desempenhos deve ser lida como aproximação de ordem de grandeza e não como equivalência estatística.

5. CONCLUSÃO

Esta revisão integrativa analisou 18 estudos publicados entre 2022 e 2026 sobre o emprego do sensoriamento remoto no monitoramento da disponibilidade hídrica em reservatórios. Os achados indicam que o campo se organiza em torno de três abordagens consolidadas, a extração de área inundada por índices espectrais, a estimativa de cota por altimetria e a integração das duas informações em relações de cota, área e volume, e que a combinação entre sensores ópticos e de radar constitui a estratégia mais robusta diante da restrição imposta pela cobertura de nuvens.

Os desempenhos relatados demonstram maturidade operacional em reservatórios de grande porte, com correlações elevadas frente a registros de campo e erros de cota majoritariamente inferiores a um metro. Essa maturidade, contudo, não se estende aos corpos hídricos de pequeno porte, nos quais a subestimação sistemática das bordas inundadas, a interferência da vegetação marginal e a resolução dos modelos digitais de elevação disponíveis elevam substancialmente a incerteza das estimativas de volume.

Configura-se, assim, uma assimetria entre a capacidade técnica disponível e a necessidade informacional das regiões semiáridas.

Como contribuição, o estudo sistematiza as magnitudes de erro esperadas por abordagem, explicita as condições sob as quais os ganhos do aprendizado de máquina se concretizam e organiza as limitações recorrentes em categorias úteis ao planejamento de novas pesquisas. Para a gestão, destaca-se a viabilidade de arranjos híbridos apoiados em unidades sentinela instrumentadas e no aproveitamento de conjuntos de dados abertos de referência.

Recomenda-se, para a agenda futura, o desenvolvimento de estudos voltados especificamente a açudes de pequeno porte em ambiente semiárido, a produção de modelos digitais de elevação de alta resolução obtidos em períodos de depleção máxima, a exploração sistemática da associação entre séries altimétricas e métodos de aprendizado de máquina para preenchimento de falhas e a ampliação das séries observadas de referência em países do Sul global, condição necessária para a validação confiável dos produtos remotos nas regiões em que a escassez hídrica é mais severa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2025*. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 12 ago. 2026.

AKGÜN, S. *et al.* Assessing areal and volumetric reservoir dynamics using remote sensing and in-situ measurements to explore drought relationships in the Marmara Region of Türkiye. *Environmental Earth Sciences*, v. 85, n. 11, art. 254, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-026-12977-3>. Acesso em: 29 ago. 2026.

ALMEIDA, C. B. de; ALVES, M. S.; FLORES, F. F.; MUSSI, R. F. de F. Revisão integrativa: da realização da pesquisa ao desenho da publicação acadêmica. *Cenas Educacionais*, v. 7, e20891, 2024. Disponível em: <https://revistas.uneb.br/cenaseducacionais/article/view/20891>. Acesso em: 14 ago. 2026.

ALMEIDA, D. N. O. de *et al.* Delimitation of water areas using remote sensing in Brazil's semiarid region. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 58, n. 1, p. 20-29, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781524>. Acesso em: 18 ago. 2026.

CARVALHO, W. dos A. *et al.* Comparison between three methods to monitor reservoir extension in the Brazilian semi-arid region. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 46, art. 43387, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_43387. Acesso em: 19 ago. 2026.

CHAGAS, M. C.; FALCÃO, A. P.; OLIVEIRA, R. P. de. Using Sentinel imagery for mapping and monitoring small surface water bodies. *Remote Sensing*, v. 17, n. 13, art. 2128, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17132128>. Acesso em: 25 ago. 2026.

CHENG, Y.; ZHANG, X.; YAO, Z. On the performance of Sentinel-3 altimetry over high mountain and cascade reservoirs basins: case of the Lancang and Nu River basins. *Remote Sensing*, v. 15, n. 7, art. 1769, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15071769>. Acesso em: 21 ago. 2026.

GOLMOHAMMADI, G. *et al.* Estimating Lake Okeechobee's water volume using NDWI-derived remote sensing and genetic algorithm optimization on Google Earth Engine. *Discover Water*, v. 5, art. 67, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00255-5>. Acesso em: 27 ago. 2026.

GUI, X. *et al.* Reconstructing reservoir water level-area-storage volume curve using multi-source satellite imagery and intelligent classification algorithms. *Water Resources Management*, v. 39, n. 11, p. 5339-5358, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04205-7>. Acesso em: 26 ago. 2026.

KOSSIERIS, S. *et al.* Inland water level monitoring from satellite observations: a scoping review of current advances and future opportunities. *Remote Sensing*, v. 16, n. 7, art. 1181, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16071181>. Acesso em: 22 ago. 2026.

MORAIS, R. C. de S. Monitoramento mensal de reservatórios hídricos superficiais do estado do Piauí (Brasil) utilizando imagens de satélite e computação em nuvem (2015-2021). *Caminhos de Geografia*, v. 24, n. 95, p. 131-144, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/RCG249566989>. Acesso em: 20 ago. 2026.

OTTA, K. *et al.* Towards the use of satellite remote sensing to validate reservoir storage in global hydrological models: methodology and pilot study in the CONUS. *Environmental Research: Water*, v. 1, art. 015002, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/3033-4942/adc47b>. Acesso em: 28 ago. 2026.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, art. n71, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 13 ago. 2026.

PAPA, F. *et al.* Water resources in Africa under global change: monitoring surface waters from space. *Surveys in Geophysics*, v. 44, n. 1, p. 43-93, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09700-9>. Acesso em: 23 ago. 2026.

PASCAL, C. *et al.* Monitoring Indian ungauged small reservoirs volume from remote sensing: feasibility, bias and perspectives. *PLOS Water*, v. 3, n. 12, art. e0000260, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000260>. Acesso em: 24 ago. 2026.

SHEN, Y. *et al.* High-resolution water level and storage variation datasets for 338 reservoirs in China during 2010-2021. *Earth System Science Data*, v. 14, n. 12, p. 5671-5694, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-14-5671-2022>. Acesso em: 17 ago. 2026.

SLINSKI, K. *et al.* In situ, modeled, and earth observation monitoring of surface water availability in West African rangelands. *Frontiers in Water*, v. 7, art. 1320010, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1320010>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SOUZA, J. F. S. de; RIBEIRO NETO, A.; PEÑA-LUQUE, S.; GOSSET, M. Application of Sentinel-2 Level-2A images for monitoring water surface in reservoirs in the semiarid region of Pernambuco, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 59, art. e1927, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781927>. Acesso em: 1 set. 2026.

SOUZA, W. de O. *et al.* Analysis of environmental and atmospheric influences in the use of SAR and optical imagery from Sentinel-1, Landsat-8, and Sentinel-2 in the operational monitoring of reservoir water level. *Remote Sensing*, v. 14, n. 9, art. 2218, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14092218>. Acesso em: 16 ago. 2026.

UNESCO. *The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace*. Paris: Unesco, 2024. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>. Acesso em: 15 ago. 2026.

XU, J. *et al.* Estimating and assessing monthly water level changes of reservoirs and lakes in Jiangsu Province using Sentinel-3 radar altimetry data. *Remote Sensing*, v. 16, n. 5, art. 808, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16050808>. Acesso em: 31 ago. 2026.

ZHANG, M. *et al.* A global dataset of reservoir in-situ water levels for hydrological and remote sensing applications. *Scientific Data*, v. 13, n. 1, art. 875, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-026-07091-9>. Acesso em: 2 set. 2026.