

Estimativa da evaporação em reservatórios utilizando sensoriamento remoto e dados meteorológicos: métodos, acurácia e aplicações

Estimation of evaporation in reservoirs using remote sensing and meteorological data: methods, accuracy and applications

Estimación de la evaporación en embalses utilizando teledetección y datos meteorológicos: métodos, exactitud y aplicaciones

DOI: 10.5281/zenodo.23318330

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 evaporação da lâmina de água representa perda significativa e frequentemente subestimada do volume armazenado em reservatórios, com repercussão direta sobre a garantia de abastecimento. Objetivou-se analisar, na literatura científica recente, os métodos que combinam sensoriamento remoto e dados meteorológicos para estimar a evaporação em reservatórios, bem como a acurácia alcançada e as aplicações propostas. 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 achados indicaram que a temperatura da superfície da água obtida por sensores termais é o elo que conecta a observação orbital às formulações aerodinâmicas e de balanço de energia, com erro quadrático médio entre 0,8 e 1,83 grau Celsius. As estimativas de evaporação apresentaram erro quadrático médio entre 0,27 e 1,50 milímetro por dia. Dois resultados mostraram-se transversais: a velocidade do vento responde pela maior parcela do erro instantâneo e a variação da área inundada, e não a variação da taxa, governa o volume evaporado. Conclui-se que a quantificação deve ser expressa em volume e que a resolução espacial da área inundada condiciona a confiabilidade do resultado.

Palavras-chave: Barragens. Lâmina de água. Perdas hídricas. Temperatura da superfície. Umidade do ar.

ABSTRACT

Evaporation from the water surface represents a significant and frequently underestimated loss of the volume stored in reservoirs, with direct repercussions on supply reliability. This study aimed to analyze, in recent scientific literature, the methods that combine remote sensing and meteorological data to estimate evaporation in reservoirs, as well as the accuracy achieved and the applications proposed. 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 findings indicated that water surface temperature obtained from thermal sensors is the link connecting orbital observation to aerodynamic and energy balance formulations, with root mean square error between 0.8 and 1.83 degrees Celsius. Evaporation estimates showed root mean square error

between 0.27 and 1.50 millimeter per day. Two results proved transversal: wind speed accounts for the largest share of instantaneous error, and variation in inundated area, rather than variation in rate, governs the evaporated volume. It is concluded that quantification must be expressed as volume and that the spatial resolution of the inundated area conditions the reliability of the result.

Keywords: Air humidity. Dams. Surface temperature. Water losses. Water surface.

RESUMEN

La evaporación de la lámina de agua representa una pérdida significativa y frecuentemente subestimada del volumen almacenado en embalses, con repercusión directa sobre la garantía de abastecimiento. Se objetivó analizar, en la literatura científica reciente, los métodos que combinan teledetección y datos meteorológicos para estimar la evaporación en embalses, así como la exactitud alcanzada y las aplicaciones propuestas. 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 hallazgos indicaron que la temperatura de la superficie del agua obtenida por sensores termales es el vínculo que conecta la observación orbital con las formulaciones aerodinámicas y de balance de energía, con error cuadrático medio entre 0,8 y 1,83 grados Celsius. Las estimaciones de evaporación presentaron error cuadrático medio entre 0,27 y 1,50 milímetros por día. Dos resultados se mostraron transversales: la velocidad del viento responde por la mayor parte del error instantáneo y la variación del área inundada, y no la variación de la tasa, gobierna el volumen evaporado. Se concluye que la cuantificación debe expresarse en volumen y que la resolución espacial del área inundada condiciona la confiabilidad del resultado.

Palabras clave: Espejo de agua. Humedad del aire. Pérdidas hídricas. Presas. Temperatura superficial.

1. INTRODUÇÃO

A construção de reservatórios regulariza a oferta de água no tempo, mas introduz uma perda que não existia antes do barramento: a exposição de uma extensa superfície líquida à atmosfera. Essa perda é contínua, ocorre independentemente de qualquer retirada autorizada e tende a atingir seus valores máximos exatamente quando a disponibilidade é menor, ou seja, nos períodos quentes e secos em que o volume armazenado já se encontra reduzido. Avaliações em escala global mostram a magnitude do fenômeno: os reservatórios respondem por cerca de 5 por cento da capacidade de armazenamento dos lagos do planeta, porém concentram 16 por cento do volume total evaporado, com taxa de crescimento de 5,4 por cento por década (Zhao *et al.*, 2022).

A despeito dessa relevância, a evaporação permanece um dos termos menos monitorados do balanço hídrico de reservatórios. A prática corrente em muitas instituições ainda se apoia em tanques evaporimétricos instalados em terra, cujos valores são convertidos para a lâmina de água por coeficientes empíricos de origem distante do local de aplicação. O problema dessa transposição foi quantificado em reservatórios do Nordeste brasileiro, onde a estimativa obtida sobre a superfície líquida resultou em 5,10 milímetros por dia, contra 7,04 milímetros por dia pela formulação aplicada em terra, diferença de aproximadamente 27 por cento (Rodrigues *et al.*, 2024).

A raiz física dessa discrepância está na inércia térmica da água. Enquanto uma superfície terrestre responde quase imediatamente ao ciclo diário de radiação, um corpo hídrico armazena calor durante o dia e o libera ao longo da noite, de modo que a evaporação não cessa após o pôr do sol. Medições de alta frequência em lago da Mongólia Interior atribuíram 37 por cento da evaporação total ao período noturno, parcela que qualquer método apoiado apenas em observações diurnas tende a ignorar (Sun *et al.*, 2024).

No Brasil, os relatórios de conjuntura dos recursos hídricos reconhecem a necessidade de qualificar as estimativas de perdas em reservatórios, sobretudo nas regiões em que a relação entre superfície exposta e volume armazenado é desfavorável (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2025). Essa configuração geométrica é característica dos açudes rasos de regiões semiáridas, nos quais uma lâmina extensa cobre um volume comparativamente pequeno.

O sensoriamento remoto oferece duas contribuições específicas e complementares a esse problema. A primeira é a recuperação da temperatura da superfície da água por sensores termais, variável que alimenta diretamente as formulações aerodinâmicas e de balanço de energia e que raramente é medida em campo. A segunda é a delimitação da área inundada em cada instante, indispensável para converter uma taxa, expressa em milímetros por dia, em volume efetivamente perdido. Nenhuma dessas contribuições dispensa os dados meteorológicos, pois a velocidade do vento, a umidade do ar e a radiação continuam sendo entradas obrigatórias dos modelos.

A literatura recente sobre o tema cresceu de forma acentuada, mas permanece dispersa entre comunidades que raramente dialogam: estudos de recuperação de temperatura da água por sensores termais, trabalhos de modelagem aerodinâmica e de balanço de energia, aplicações de aprendizado de máquina e avaliações de medidas de mitigação por cobertura da superfície. Essa fragmentação dificulta a comparação de acurácias e a escolha fundamentada de um método para determinado reservatório.

A revisão integrativa é o desenho adequado para enfrentar essa dispersão, pois admite a combinação de estudos com delineamentos distintos e permite identificar padrões, contradições e lacunas em corpos de conhecimento heterogêneos (Almeida *et al.*, 2024). Formulou-se, assim, a seguinte questão norteadora: quais métodos que combinam sensoriamento remoto e dados meteorológicos têm sido empregados na estimativa da evaporação em reservatórios, com que acurácia e com quais aplicações, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026?

O objetivo geral consistiu em analisar as evidências recentes sobre a estimativa da evaporação em reservatórios por meio da integração entre dados orbitais e meteorológicos. Como objetivos específicos, buscou-se caracterizar os estudos quanto à origem geográfica e ao delineamento, identificar os métodos,

sensores e variáveis meteorológicas utilizados, sintetizar as medidas de acurácia relatadas e sistematizar as aplicações propostas à gestão de recursos hídricos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial que orienta esta revisão organiza-se em três eixos: a distinção conceitual entre a evaporação de superfícies líquidas e a evapotranspiração terrestre, os fundamentos dos métodos de estimativa e o papel das variáveis meteorológicas, e as contribuições específicas da observação orbital.

2.1 A evaporação de superfícies líquidas e sua especificidade

A evaporação de um corpo hídrico difere da perda de água de uma superfície vegetada em três aspectos determinantes. Primeiro, não há resistência estomática nem limitação por disponibilidade de água no solo, de modo que o processo é governado apenas pelo fornecimento de energia e pela capacidade de transporte da atmosfera. Segundo, a elevada capacidade térmica da água introduz defasagem entre o forçamento radiativo e a resposta evaporativa, fenômeno que desloca parcela expressiva do fluxo para o período noturno (Sun *et al.*, 2024). Terceiro, a área exposta varia no tempo conforme o nível do reservatório, o que torna o volume evaporado uma função de duas grandezas dinâmicas.

Essa última característica tem implicação prática relevante. Análise conduzida em reservatórios e barragens de contenção do Planalto de Loess revelou que a taxa de evaporação permaneceu praticamente estável no período estudado, com média de 2,98 milímetros por dia e tendência não significativa, enquanto o volume evaporado cresceu de 3,18 para 5,69 milhões de metros cúbicos por dia. A decomposição dos fatores atribuiu a variação do volume quase integralmente à expansão da área dos corpos hídricos, com contribuição meteorológica líquida inferior a 1 por cento (Liu *et al.*, 2026).

A magnitude absoluta das perdas justifica a atenção ao tema. O lago Nasser, no Egito, perde aproximadamente 12 bilhões de metros cúbicos por ano por evaporação (Abd-Elhamid *et al.*, 2021), e em escala planetária a evaporação de lagos e reservatórios foi estimada em 1500 quilômetros cúbicos por ano, valor cerca de 15 por cento superior às estimativas anteriores baseadas apenas em modelagem (Zhao *et al.*, 2022).

2.2 Métodos de estimativa e o papel dos dados meteorológicos

Os métodos de estimativa organizam-se em quatro famílias. As formulações combinadas, derivadas da equação de Penman, somam um termo radiativo a um termo aerodinâmico e exigem radiação líquida, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. As abordagens de transferência aerodinâmica

relacionam o fluxo de vapor ao gradiente entre a pressão de saturação na temperatura da superfície da água e a pressão parcial no ar, ponderado por uma função do vento. Os métodos de balanço de energia resolvem o fluxo de calor latente como resíduo, incorporando o armazenamento de calor no corpo hídrico. Por fim, os métodos empíricos simplificados dispensam parte das variáveis em troca de calibração local.

A escolha entre essas famílias não é indiferente, mas tampouco segue uma hierarquia fixa de desempenho. Estudo de sensibilidade conduzido com trinta anos de dados diários em Juazeiro, na Bahia, identificou o déficit de pressão de vapor como a variável à qual as estimativas são mais sensíveis e verificou que formulações simplificadas apresentaram boa concordância com a equação de Penman nas condições analisadas (Barros *et al.*, 2024). Em reservatórios do sul do Texas, ao contrário, as formulações clássicas tiveram desempenho fraco frente a um modelo de referência, com coeficiente de determinação de apenas 0,33 para a melhor delas (Abdullah *et al.*, 2026).

Os dados meteorológicos permanecem, portanto, insubstituíveis, e a velocidade do vento destaca-se entre eles. A avaliação de um modelo de balanço de energia para superfícies líquidas em dezenove sítios distribuídos por sete zonas climáticas mostrou que a exclusão dos períodos de vento forte elevou o coeficiente de determinação de 0,47 para 0,71, e que uma rede neural treinada para prever o erro do modelo identificou a velocidade do vento como principal preditor (Fisher *et al.*, 2023). Em escala regional, a análise de 165 reservatórios do oeste dos Estados Unidos confirmou o padrão, apontando o vento extremo como principal responsável pelos maiores eventos diários de evaporação (Zhao *et al.*, 2025).

Os algoritmos de aprendizado de máquina entraram no campo como alternativa às formulações físicas, com resultados que dependem fortemente do delineamento. A comparação entre uma rede de perceptrons de múltiplas camadas e um sistema de inferência neurodifusa na barragem Atatürk indicou melhor generalização da primeira, com coeficiente de determinação de 0,81 contra 0,32 no conjunto de teste, e evidências de sobreajuste na segunda (Dökmen; Dilcan; Ahi, 2025). Na bacia do Awash, cinco algoritmos alimentados por radiação solar e temperatura de origem orbital e de reanálise produziram estimativas consistentes, com desempenho variável conforme a estação e a estação meteorológica considerada (Eshetu *et al.*, 2025).

2.3 Contribuições específicas da observação orbital

A primeira contribuição do sensoriamento remoto é a recuperação da temperatura da superfície da água, variável que entra diretamente no cálculo da pressão de saturação e que praticamente não é medida nas redes convencionais. A validação de um algoritmo aplicado a imagens termais no reservatório de Itaipu, com 37 estações de referência, alcançou coeficiente de determinação de 0,90, desvio quadrático médio de

0,8 grau Celsius e eficiência de Nash e Sutcliffe de 0,89 (Kramer *et al.*, 2023). Em 38 lagos do norte da Polônia, a comparação entre métodos revelou que uma regressão por florestas aleatórias superou o produto operacional de temperatura, com erro quadrático médio de 1,83 contra 3,68 graus Celsius, e que o produto apresentava viés quente sistemático de 2,42 graus (Dyba *et al.*, 2022).

A segunda contribuição é a delimitação da área inundada, sem a qual a taxa não se converte em volume. A relevância da resolução espacial dessa delimitação foi quantificada no reservatório de Danjiangkou, onde o emprego de dados de área a 1000 metros produziu volume anual evaporado 14 por cento inferior ao obtido com dados a 30 metros, levando os autores a defender que a perda seja expressa em volume e não apenas em taxa (Li *et al.*, 2024).

A integração dessas duas contribuições com dados meteorológicos de superfície deu origem a modelos operacionais de baixa exigência computacional. Uma abordagem de transferência turbulenta que combina temperatura da água obtida por sensores termais e observações meteorológicas foi avaliada em doze lagos, com coeficiente de determinação entre 0,91 e 0,99 e erro quadrático médio entre 0,27 e 0,85 milímetro por dia em relação à formulação aerodinâmica de referência, além de boa concordância com medições de covariância de vórtices turbulentos (Kirupairaja; Bawazir, 2026).

A observação orbital de alta resolução ampliou ainda o alcance do monitoramento para corpos hídricos de pequeno porte, historicamente ausentes dos inventários. A combinação entre segmentação por aprendizado profundo em imagens de meio metro e estimativa empírica de evaporação permitiu detectar e contabilizar reservatórios agrícolas no Irã, com índice de interseção sobre união de 82,08 por cento na detecção e perda acumulada estimada em 388.636,7 metros cúbicos em nove meses (Khoshnevisan *et al.*, 2026).

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 (Page *et al.*, 2021).

A questão norteadora foi assim definida: quais métodos que combinam sensoriamento remoto e dados meteorológicos têm sido empregados na estimativa da evaporação em reservatórios, com que

acurácia e com quais aplicações, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026? A pergunta foi estruturada em três componentes: população, correspondente a reservatórios, açudes, lagos de barragem e pequenos corpos hídricos artificiais; interesse, correspondente ao emprego conjunto de dados orbitais e meteorológicos para estimar a perda por evaporação da lâmina de água; e contexto, correspondente à avaliação de acurácia e à gestão de recursos hídricos.

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: (“open water evaporation” OR “lake evaporation” OR “reservoir evaporation” OR “evaporative loss”) AND (“remote sensing” OR satellite OR “water surface temperature”) AND (meteorolog* OR “weather data” OR Penman OR “energy balance”). Os equivalentes em português incluíram evaporação, lâmina de água, reservatório, açude, sensoriamento remoto, temperatura da superfície da água e dados meteorológicos. 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 da evaporação de superfícies líquidas em reservatórios, lagos de barragem, açudes ou pequenos corpos hídricos artificiais, mediante uso de dados orbitais associados a variáveis meteorológicas; e trabalhos que apresentassem medidas de acurácia, procedimentos de validação ou síntese quantificada. Foram excluídos: estudos restritos à evapotranspiração de superfícies vegetadas; trabalhos que empregassem exclusivamente dados meteorológicos, sem componente orbital, ou exclusivamente dados orbitais, sem variáveis meteorológicas; pesquisas sem qualquer avaliação de desempenho; resumos de eventos, capítulos de livro, editoriais, cartas, teses e dissertações; publicações sem acesso ao texto completo; e duplicatas entre bases.

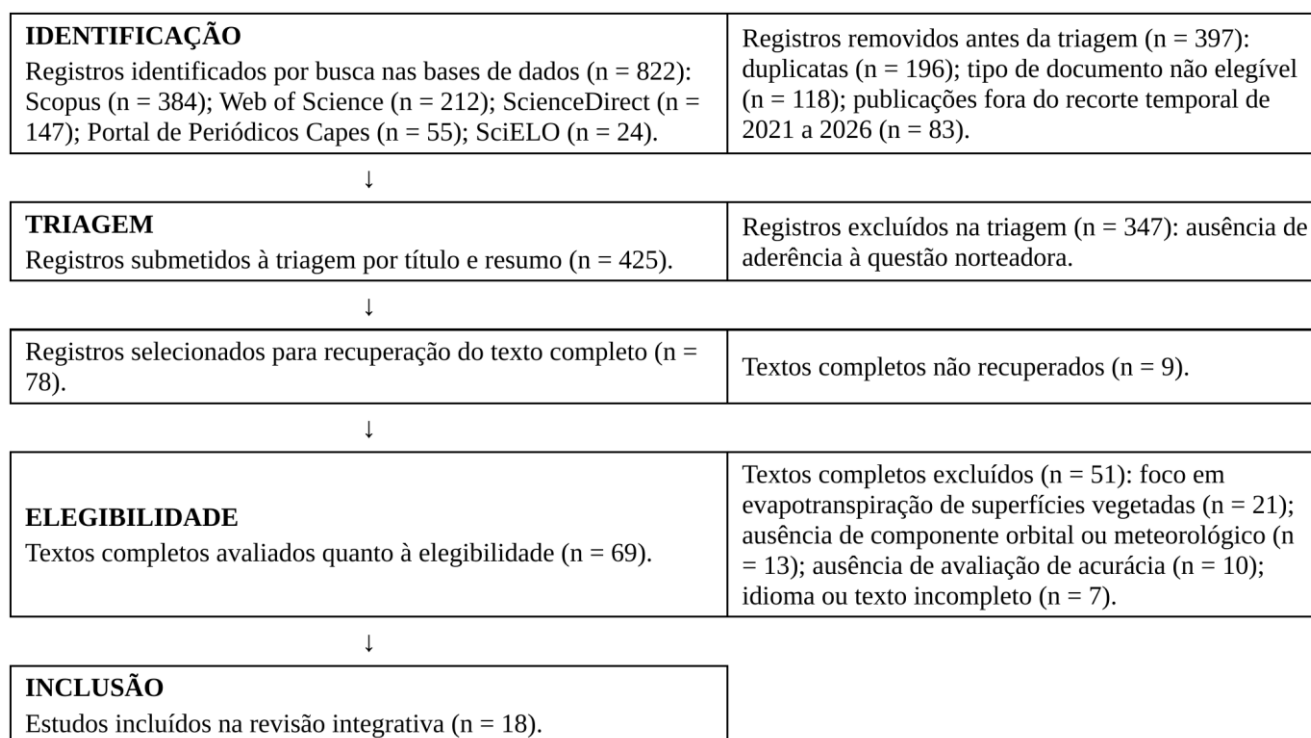
O processo de seleção ocorreu em quatro fases. Na identificação, foram recuperados 822 registros. A remoção prévia à triagem eliminou 397 registros, sendo 196 duplicatas, 118 documentos de tipo não elegível e 83 publicações fora do recorte temporal. Na triagem por título e resumo, 425 registros foram avaliados e 347 foram excluídos por não atenderem à questão norteadora. Dos 78 registros selecionados para recuperação, 9 não tiveram o texto completo acessível. Entre os 69 textos completos avaliados quanto à elegibilidade, 51 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, método de estimativa,

sensores e produtos orbitais, variáveis meteorológicas utilizadas, estratégia de validação, métricas de acurácia e aplicações propostas. A análise seguiu procedimento descritivo e interpretativo, com agrupamento dos achados em categorias temáticas construídas a partir da leitura integral dos textos: caracterização dos estudos, métodos e acurácia, papel da área inundada e da escala espacial, e mitigação das perdas 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.

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 2021 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
Abd-Elhamid <i>et al.</i>	2021	Egito	Perda anual do lago Nasser estimada em 12 bilhões de metros cúbicos pelo método aerodinâmico com dados meteorológicos de 2009 a 2020; cobertura flutuante de 25 a 100 por cento associada a economia de 2,1 a 8,4 bilhões de metros cúbicos por ano, com maior eficiência nas zonas rasas.
Dyba <i>et al.</i>	2022	Polônia	Comparação de métodos de recuperação da temperatura da superfície em 38 lagos; regressão por florestas aleatórias com erro quadrático médio de 1,83 grau Celsius contra 3,68 do produto operacional, que apresentou viés quente sistemático de 2,42 graus.
Santos <i>et al.</i>	2022	Brasil	Avaliação de cinco métodos de estimativa no reservatório de Passaúna, com melhor ajuste de Penman e Monteith; sistema fotovoltaico flutuante reduziu a evaporação em 60,20 por cento na área coberta; perda total do reservatório estimada em 4,47 hectômetros cúbicos por ano.
Zhao <i>et al.</i>	2022	Global	Evaporação de 1,42 milhão de lagos estimada em 1500 quilômetros cúbicos por ano, 15,4 por cento acima de estimativas anteriores; reservatórios com 5 por cento da capacidade de armazenamento e 16 por cento do volume evaporado, com alta de 5,4 por cento por década.
Fisher <i>et al.</i>	2023	Global	Modelo de balanço de energia para superfícies líquidas validado em 19 sítios de sete zonas climáticas; coeficiente de determinação de 0,71 com filtragem de vento forte e 0,47 sem filtragem; erro diário de 1,2 a 1,5 milímetro por dia; onze modelos de aprendizado de máquina não superaram o modelo físico.
Jin <i>et al.</i>	2023	Global	Cenário de cobertura de 30 por cento da superfície de 114.555 reservatórios por sistemas fotovoltaicos flutuantes associado a economia de 106 quilômetros cúbicos de água por ano e geração estimada de 9.434 terawatts-hora anuais.
Kramer <i>et al.</i>	2023	Brasil	Validação da temperatura da superfície da água obtida por sensor termal no reservatório de Itaipu contra 37 estações; coeficiente de determinação de 0,90, desvio quadrático médio de 0,8 grau Celsius, índice de Willmott de 0,97 e eficiência de Nash e Sutcliffe de 0,89.
Barros <i>et al.</i>	2024	Brasil	Análise de sensibilidade com 30 anos de dados diários em Juazeiro, Bahia; déficit de pressão de vapor identificado como variável de maior sensibilidade; métodos simplificados de Linacre e de Kohler com boa concordância frente à formulação de Penman.
Li <i>et al.</i>	2024	China	Integração de área diária a 30 metros e taxa diária a 100 metros no reservatório de Danjiangkou; taxa média de 806 milímetros e volume médio de 595 milhões de metros cúbicos por ano; uso de área a 1000 metros subestimou o volume anual em 14 por cento.
Rodrigues <i>et al.</i>	2024	Brasil	Avaliação multicenário em reservatórios da região metropolitana de Fortaleza; estimativa sobre a lâmina de água de 5,10 contra 7,04 milímetros por dia em terra, diferença de 27 por cento; elasticidade da vazão garantida em relação à evaporação de -0,83.
Sun <i>et al.</i>	2024	China	Modelagem com restrição multivariada no lago Wuliangsuai usando covariância de vórtices turbulentos e dados de alta frequência; modelo acoplado explicou 93 por cento da variação, 20 pontos acima do modelo apenas meteorológico; evaporação noturna correspondeu a 37 por cento do total.
Dökmen; Dilcan; Ahi	2025	Turquia	Comparação entre rede de perceptrons de múltiplas camadas e sistema neurodifuso na barragem Atatürk; melhor generalização da primeira, com

Autor	Ano	País	Principais desfechos
			coeficiente de determinação de 0,81 contra 0,32 no conjunto de teste; indícios de sobreajuste no segundo modelo.
Eshetu <i>et al.</i>	2025	Etiópia	Cinco algoritmos de aprendizado de máquina alimentados por radiação solar e temperatura de origem orbital e de reanálise em três estações da bacia do Awash; melhor desempenho de treinamento do gradiente extremo e consistência de teste do gradiente clássico e da rede de perceptrons.
Zhao <i>et al.</i>	2025	Estados Unidos	Análise de eventos extremos diários em 165 reservatórios do oeste norte-americano entre 1981 e 2022; aumento da máxima diária anual da ordem de 0,3 milímetro por dia por década nas regiões áridas; vento extremo como principal fator dos maiores eventos diários.
Abdullah <i>et al.</i>	2026	Estados Unidos	Comparação entre métodos empíricos e aprendizado de máquina em pequenos reservatórios do sul do Texas; melhor método clássico com coeficiente de determinação de 0,33; florestas aleatórias com 0,67 em teste multireservatório e 0,78 no sítio de validação independente.
Khoshnevisan <i>et al.</i>	2026	Irã	Deteção de reservatórios agrícolas em imagens de 0,5 metro por segmentação com aprendizado profundo; índice de interseção sobre união de 82,08 por cento e medida F1 de 90,15 por cento; perda acumulada estimada em 388.636,7 metros cúbicos em nove meses.
Kirupairaja; Bawazir	2026	Estados Unidos	Abordagem de transferência turbulenta combinando temperatura da água obtida por sensor termal e dados meteorológicos, avaliada em doze lagos; coeficiente de determinação de 0,91 a 0,99 e erro quadrático médio de 0,27 a 0,85 milímetro por dia; boa concordância com covariância de vórtices turbulentos.
Liu <i>et al.</i>	2026	China	Análise de 2000 a 2018 no Planalto de Loess; taxa média estável de 2,98 milímetros por dia e volume crescente de 3,18 para 5,69 milhões de metros cúbicos por dia; variação da área explicou praticamente toda a variação do volume, com efeito meteorológico líquido de 0,5 por cento.

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.1 Caracterização dos estudos incluídos

A distribuição geográfica dos estudos mostrou-se mais equilibrada do que seria esperado em um campo dependente de instrumentação sofisticada. O Brasil respondeu por quatro publicações, a China e os Estados Unidos por três cada, e Egito, Polônia, Turquia, Etiópia e Irã por uma cada. Três trabalhos adotaram escopo global. A presença brasileira relativamente expressiva relaciona-se à importância do tema no semiárido e à existência de reservatórios de grande porte no país, como ilustram os estudos conduzidos no Nordeste e nos reservatórios de Itaipu e Passaúna.

Quanto ao delineamento, treze estudos foram classificados como empíricos, com aplicação e validação de métodos em corpos hídricos específicos, três como avaliações de escopo global apoiadas em grandes conjuntos de dados e dois como estudos de cenário voltados à avaliação de medidas de mitigação. Não foram identificadas revisões sistemáticas dedicadas exclusivamente à evaporação de reservatórios no recorte analisado, o que reforça a pertinência desta síntese.

As escalas temporais variaram de um ano, em estudos de alta frequência instrumental, a 34 anos, em reconstruções globais. Essa amplitude é metodologicamente significativa: séries curtas de alta frequência permitiram revelar a contribuição noturna ao fluxo total, enquanto séries longas tornaram possível separar a tendência da taxa da tendência do volume, distinção que se mostrou central nos resultados.

4.2 Métodos de estimativa e acurácia relatada

Os estudos distribuíram-se por quatro famílias metodológicas. A mais frequente, presente em sete trabalhos, combinou a temperatura da superfície da água obtida por sensores termais com formulações aerodinâmicas ou de balanço de energia alimentadas por dados meteorológicos de superfície. Os desempenhos relatados nessa família situaram-se entre 0,27 e 0,85 milímetro por dia de erro quadrático médio, com coeficientes de determinação entre 0,91 e 0,99 na avaliação conduzida em doze lagos (Kirupairaja; Bawazir, 2026), e entre 1,2 e 1,5 milímetro por dia na avaliação internacional de um modelo de balanço de energia para superfícies líquidas (Fisher *et al.*, 2023).

A segunda família, presente em quatro estudos, apoiou-se em formulações combinadas e empíricas alimentadas predominantemente por dados meteorológicos, com o componente orbital restrito à delimitação da área. Os resultados dessa família foram os mais heterogêneos da amostra. Em condições semiáridas brasileiras, métodos simplificados apresentaram concordância satisfatória com a formulação de referência (Barros *et al.*, 2024), ao passo que, em reservatórios texanos, as mesmas famílias de equações produziram coeficientes de determinação inferiores a 0,35 frente ao modelo adotado como referência (Abdullah *et al.*, 2026). A divergência sugere que a transferibilidade dessas equações depende criticamente da semelhança entre o regime climático de calibração e o de aplicação.

A terceira família, presente em quatro estudos, empregou algoritmos de aprendizado de máquina. Os desempenhos foram intermediários e sensíveis ao desenho experimental: coeficiente de determinação de 0,81 para a melhor arquitetura na barragem Atatürk (Dökmen; Dilcan; Ahi, 2025) e de 0,67 em teste multirreservatório no Texas, elevando-se a 0,78 no sítio de validação independente (Abdullah *et al.*, 2026). Um achado particularmente informativo veio da comparação direta entre onze modelos de aprendizado de máquina e um modelo de base física: os primeiros não superaram significativamente o segundo, embora uma rede neural tenha se mostrado eficaz para prever o erro do modelo físico, com coeficiente de determinação de 0,74 (Fisher *et al.*, 2023).

A quarta família, presente em três estudos, dedicou-se à recuperação da temperatura da superfície da água como etapa intermediária. A acurácia nessa etapa condiciona toda a cadeia subsequente, pois um

viés de poucos graus na temperatura propaga-se de forma não linear para a pressão de saturação. Os erros relatados variaram de 0,8 grau Celsius em reservatório tropical de grande porte (Kramer *et al.*, 2023) a 1,83 grau Celsius em lagos temperados, neste caso já com o melhor método disponível, enquanto o produto operacional apresentou 3,68 graus e viés quente sistemático (Dyba *et al.*, 2022).

A síntese das métricas permite situar a ordem de grandeza esperada. Para a temperatura da superfície da água, os erros concentraram-se entre 0,8 e 1,83 grau Celsius quando empregados métodos ajustados localmente. Para a evaporação, os erros quadráticos médios diários variaram de 0,27 a 1,50 milímetro por dia, faixa que corresponde a parcela relevante da própria taxa média em climas temperados e a fração menor em climas áridos, onde as taxas são mais elevadas. Essa dependência do erro relativo em relação ao regime climático recomenda cautela na comparação direta entre estudos conduzidos em contextos distintos.

4.3 O papel da área inundada e da escala espacial

Um dos achados mais consistentes da revisão diz respeito à primazia da área sobre a taxa na determinação do volume evaporado. No Planalto de Loess, a decomposição dos fatores atribuiu à variação da área dos corpos hídricos praticamente toda a variação do volume evaporado, com contribuição meteorológica líquida próxima de meio por cento, ainda que a taxa tenha permanecido estatisticamente estável no período (Liu *et al.*, 2026). Em escala global, a decomposição da tendência de crescimento do volume evaporado distribuiu-se entre aumento da taxa, com 58 por cento, redução da cobertura de gelo, com 23 por cento, e aumento da área dos lagos, com 19 por cento (Zhao *et al.*, 2022).

Esse resultado tem consequência metodológica direta: a resolução espacial com que a área é delimitada torna-se determinante da confiabilidade da estimativa de volume. A quantificação desse efeito no reservatório de Danjiangkou mostrou subestimação de 14 por cento no volume anual quando a área foi obtida a 1000 metros em vez de 30 metros, o que levou os autores a sustentar que a perda deve ser expressa em volume (Li *et al.*, 2024). A implicação é que produtos de área de resolução grosseira, adequados para monitorar grandes lagos, podem introduzir viés sistemático quando aplicados a reservatórios de margens recortadas.

A questão agrava-se nos corpos hídricos de pequeno porte, que são numerosos e proporcionalmente mais expostos. No Planalto de Loess, corpos com menos de 0,05 quilômetro quadrado representaram 73,8 por cento das células de água identificadas, e as pequenas e médias estruturas de acumulação foram apontadas como principal motor do aumento das perdas (Liu *et al.*, 2026). A incorporação dessas unidades aos inventários tornou-se viável com imagens de resolução submétrica associadas a segmentação por

aprendizado profundo, estratégia que atingiu índice de interseção sobre união de 82,08 por cento na detecção de reservatórios agrícolas (Khoshnevisan *et al.*, 2026).

A escala temporal também se mostrou relevante. A contribuição noturna de 37 por cento ao fluxo total, documentada por medições de alta frequência, indica que estimativas ancoradas exclusivamente em passagens orbitais diurnas requerem esquema explícito de extrapolação temporal (Sun *et al.*, 2024). No mesmo sentido, a adoção de uma razão constante entre o déficit de pressão de vapor diário e o instantâneo mostrou-se aceitável para o escalonamento diário, com incerteza moderada (Kirupairaja; Bawazir, 2026).

4.4 Mitigação das perdas e implicações para a gestão

Quatro estudos trataram de medidas de redução das perdas, todos centrados na cobertura parcial da lâmina de água por sistemas fotovoltaicos flutuantes. Em escala global, a cobertura de 30 por cento da superfície de 114.555 reservatórios foi associada a economia potencial de 106 quilômetros cúbicos de água por ano (Jin *et al.*, 2023). No lago Nasser, cenários de cobertura entre 25 e 100 por cento corresponderam a economia estimada entre 2,1 e 8,4 bilhões de metros cúbicos anuais, com maior eficiência quando a cobertura se concentra nas zonas rasas (Abd-Elhamid *et al.*, 2021).

A experiência brasileira oferece contraponto útil quanto à escala. No reservatório de Passaúna, o sistema flutuante existente reduziu a evaporação em 60,20 por cento na área coberta, porém a economia absoluta mostrou-se pequena diante do total perdido pelo reservatório, estimado em 4,47 hectômetros cúbicos por ano, uma vez que a instalação ocupa fração mínima da superfície (Santos *et al.*, 2022). O contraste entre a elevada eficiência local e o efeito agregado modesto é informativo para a gestão, pois indica que a medida só produz resultado hidrológicamente significativo em escalas de cobertura muito superiores às atualmente implantadas.

As implicações para o planejamento foram tratadas de forma explícita em cenários de mudança climática. Em reservatórios que abastecem a região metropolitana de Fortaleza, a elasticidade da vazão garantida com 90 por cento de confiabilidade em relação à evaporação foi estimada em -0,83, magnitude comparável à do assoreamento, e as projeções indicaram variações da oferta entre -9 e mais 1 por cento conforme o cenário adotado, divergência que levou os autores a recomendar planejamento probabilístico por conjuntos em vez de cenário único (Rodrigues *et al.*, 2024).

A tendência de intensificação dos eventos extremos acrescenta urgência ao tema. A análise de 165 reservatórios do oeste norte-americano identificou aumento da evaporação diária máxima anual da ordem de 0,3 milímetro por dia por década nas regiões mais áridas, com calor e secura explicando a tendência e o vento extremo explicando os eventos individuais de maior magnitude (Zhao *et al.*, 2025). Como o vento é

justamente a variável associada à maior parcela do erro dos modelos (Fisher *et al.*, 2023), configura-se uma dificuldade específica: os episódios de maior perda são também os de estimativa menos confiável.

Cumpra reconhecer as limitações desta revisão. A restrição a cinco bases e a três idiomas pode ter excluído publicações de circulação regional. A exclusão de teses, dissertações e trabalhos de eventos reduziu o acesso a experiências operacionais de órgãos gestores, que frequentemente circulam nesses formatos. A heterogeneidade das métricas, das escalas temporais e das referências de validação impediu qualquer síntese quantitativa, de modo que as faixas apresentadas devem ser lidas como aproximações de ordem de grandeza. Por fim, a ausência de um padrão de referência universalmente aceito para a evaporação de superfícies líquidas, reconhecida pelos próprios autores dos estudos incluídos, limita a comparabilidade entre trabalhos que adotaram referências distintas.

5. CONCLUSÃO

Esta revisão integrativa analisou 18 estudos publicados entre 2021 e 2026 sobre a estimativa da evaporação em reservatórios mediante integração entre sensoriamento remoto e dados meteorológicos. Os achados indicam que a temperatura da superfície da água recuperada por sensores termais constitui o elo que conecta a observação orbital às formulações aerodinâmicas e de balanço de energia, e que os dados meteorológicos permanecem entradas obrigatórias, com destaque para a velocidade do vento e o déficit de pressão de vapor.

As acurácias relatadas situaram-se entre 0,8 e 1,83 grau Celsius para a temperatura da superfície da água e entre 0,27 e 1,50 milímetro por dia para a evaporação. Os algoritmos de aprendizado de máquina não superaram de forma consistente os modelos de base física, embora tenham se mostrado úteis para prever e corrigir o erro desses modelos, aplicação que parece mais promissora do que a substituição integral.

Dois resultados atravessaram toda a amostra e constituem a principal contribuição desta síntese. O primeiro é que o volume evaporado é governado pela variação da área inundada, e não pela variação da taxa, o que torna a resolução espacial da delimitação da lâmina de água um condicionante direto da confiabilidade da estimativa. O segundo é que a velocidade do vento responde pela maior parcela do erro instantâneo e é, ao mesmo tempo, o principal motor dos eventos extremos de perda, situação que concentra a maior incerteza justamente nos episódios de maior consequência para a gestão.

Recomenda-se, para a agenda futura, a produção de séries de temperatura da superfície da água validadas em reservatórios tropicais e semiáridos, o desenvolvimento de esquemas de extrapolação temporal que incorporem explicitamente a evaporação noturna, a incorporação sistemática de corpos

hídricos de pequeno porte aos inventários mediante sensores de alta resolução e a avaliação, em escalas de cobertura realistas, do efeito agregado de medidas de mitigação sobre a disponibilidade hídrica.

REFERÊNCIAS

ABD-ELHAMID, H. F. *et al.* Reservoir management by reducing evaporation using floating photovoltaic system: a case study of Lake Nasser, Egypt. *Water*, v. 13, n. 6, art. 769, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13060769>. Acesso em: 14 ago. 2026.

ABDULLAH, S. M. F. *et al.* Applications of machine learning in enhancing evaporation estimation for small reservoirs: a case study in semi-arid South Texas. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 12, n. 3, art. 146, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40808-026-02773-0>. Acesso em: 31 ago. 2026.

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.

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: 13 ago. 2026.

BARROS, T. F. *et al.* Evaporação no semiárido: análise de sensibilidade e comparação de métodos para estimativa. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 6, p. 3960-3973, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p3960-3973>. Acesso em: 24 ago. 2026.

DÖKMEN, F.; DILCAN, Ç. C.; AHI, Y. Daily reservoir evaporation estimation using MLP and ANFIS: a comparative study for sustainable water management. *Water*, v. 17, n. 17, art. 2623, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w17172623>. Acesso em: 28 ago. 2026.

DYBA, K. *et al.* Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8. *Remote Sensing*, v. 14, n. 15, art. 3839, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14153839>. Acesso em: 16 ago. 2026.

ESHETU, K. D. *et al.* Estimating reservoir evaporation rate: fusing remotely sensed solar radiation and temperature features with machine learning algorithms. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 156, n. 3, art. 175, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05407-0>. Acesso em: 29 ago. 2026.

FISHER, J. B. *et al.* Remotely sensed terrestrial open water evaporation. *Scientific Reports*, v. 13, art. 8174, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34921-2>. Acesso em: 20 ago. 2026.

JIN, Y. *et al.* Energy production and water savings from floating solar photovoltaics on global reservoirs. *Nature Sustainability*, v. 6, n. 7, p. 865-874, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01089-6>. Acesso em: 21 ago. 2026.

KHOSHNEVISAN, S. *et al.* Integrated machine learning framework for pond detection and evaporation loss estimation from high-resolution satellite imagery. *Geographies*, v. 6, n. 3, art. 67, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geographies6030067>. Acesso em: 1 set. 2026.

KIRUPAIRAJA, T.; BAWAZIR, A. S. A simple turbulent exchange approach for estimating reservoir evaporation in managing water for irrigation using remote sensing and ground measurements. *AgriEngineering*, v. 8, n. 5, art. 169, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriengineering8050169>. Acesso em: 2 set. 2026.

KRAMER, G. *et al.* Performance and validation of water surface temperature estimates from Landsat 8 of the Itaipu Reservoir, State of Paraná, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 1, art. 137, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10677-6>. Acesso em: 22 ago. 2026.

LI, Y. *et al.* High spatiotemporal estimation of reservoir evaporation water loss by integrating remote-sensing data and the generalized complementary relationship. *Remote Sensing*, v. 16, n. 8, art. 1320, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16081320>. Acesso em: 25 ago. 2026.

LIU, Y. *et al.* Increased surface water evaporation loss induced by reservoir development on the Loess Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 30, n. 1, p. 67-89, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-30-67-2026>. Acesso em: 30 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: 12 ago. 2026.

RODRIGUES, G. P. *et al.* Impact of reservoir evaporation on future water availability in north-eastern Brazil: a multi-scenario assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 28, n. 14, p. 3243-3260, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-28-3243-2024>. Acesso em: 26 ago. 2026.

SANTOS, F. R. dos *et al.* Effects of a floating photovoltaic system on the water evaporation rate in the Passaúna Reservoir, Brazil. *Energies*, v. 15, n. 17, art. 6274, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15176274>. Acesso em: 17 ago. 2026.

SUN, Y. *et al.* Impact analysis of H₂O fluxes and high-frequency meteorology and water quality: multivariate constrained evaporation modelling in Lake Wuliangsuhai, China. *Water*, v. 16, n. 4, art. 578, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w16040578>. Acesso em: 27 ago. 2026.

ZHAO, B. *et al.* Trends and meteorological drivers of extreme daily reservoir evaporation events in the western United States. *Journal of Hydrology*, v. 651, art. 132589, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132589>. Acesso em: 23 ago. 2026.

ZHAO, G. *et al.* Evaporative water loss of 1.42 million global lakes. *Nature Communications*, v. 13, art. 3686, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31125-6>. Acesso em: 18 ago. 2026.