

Integração de sensoriamento remoto e modelagem hidrológica na gestão de recursos hídricos: abordagens e ganhos de desempenho**Integration of remote sensing and hydrological modeling in water resources management: approaches and performance gains****Integración de teledetección y modelación hidrológica en la gestión de recursos hídricos: enfoques y ganancias de desempeño**

DOI: 10.5281/zenodo.23318394

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**

Modelos hidrológicos sustentam decisões de outorga, de operação de sistemas e de previsão de cheias, mas dependem de redes de monitoramento esparsas que limitam sua calibração e sua confiabilidade. Objetivou-se analisar, na literatura científica recente, as abordagens de integração entre dados orbitais e modelos hidrológicos, os ganhos de desempenho obtidos e as limitações relatadas. 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. Identificaram-se quatro abordagens de integração: uso de produtos orbitais como forçantes de entrada, calibração multivariável, assimilação sequencial de dados e pós-processamento estatístico ou por aprendizado de máquina. Os ganhos foram consistentes, porém condicionados: a assimilação elevou a proporção de postos com melhoria de 24 para 62 por cento conforme a transformação aplicada à observação, e a previsão de picos melhorou entre 5 e 46 por cento. A calibração multivariável nem sempre melhorou a vazão, mas tornou consistentes os demais componentes do balanço. Conclui-se que o ganho depende mais do desenho da integração e da qualidade do produto escolhido do que da simples adição de dados orbitais ao modelo.

Palavras-chave: Assimilação de dados. Bacias hidrográficas. Calibração de modelos. Escoamento. Vazão.

ABSTRACT

Hydrological models support water permit decisions, system operation and flood forecasting, yet they depend on sparse monitoring networks that limit their calibration and reliability. This study aimed to analyze, in recent scientific literature, the approaches for integrating orbital data and hydrological models, the performance gains obtained and the limitations reported. 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. Four integration approaches were identified: use of orbital products as input forcing, multivariable calibration, sequential data assimilation, and statistical or machine learning post-processing. Gains were consistent but conditional: assimilation raised the proportion of gauges showing improvement from 24 to 62

percent depending on the transformation applied to the observation, and peak flow forecasting improved between 5 and 46 percent. Multivariable calibration did not always improve streamflow, but it made the remaining water balance components consistent. It is concluded that the gain depends more on the design of the integration and on the quality of the chosen product than on simply adding orbital data to the model.

Keywords: Catchments. Data assimilation. Model calibration. Runoff. Streamflow.

RESUMEN

Los modelos hidrológicos sustentan decisiones de concesión, de operación de sistemas y de pronóstico de crecidas, pero dependen de redes de monitoreo dispersas que limitan su calibración y su confiabilidad. Se objetivó analizar, en la literatura científica reciente, los enfoques de integración entre datos orbitales y modelos hidrológicos, las ganancias de desempeño obtenidas y las limitaciones reportadas. 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. Se identificaron cuatro enfoques de integración: uso de productos orbitales como forzantes de entrada, calibración multivariable, asimilación secuencial de datos y posprocesamiento estadístico o por aprendizaje automático. Las ganancias fueron consistentes pero condicionadas: la asimilación elevó la proporción de estaciones con mejora del 24 al 62 por ciento según la transformación aplicada a la observación, y el pronóstico de picos mejoró entre 5 y 46 por ciento. La calibración multivariable no siempre mejoró el caudal, pero volvió consistentes los demás componentes del balance. Se concluye que la ganancia depende más del diseño de la integración y de la calidad del producto elegido que de la simple adición de datos orbitales al modelo.

Palabras clave: Asimilación de datos. Calibración de modelos. Caudal. Cuencas. Escorrentía.

1. INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos são o instrumento por meio do qual a informação hidrológica se converte em decisão. É deles que dependem a definição de vazões outorgáveis, o dimensionamento de obras, a operação de sistemas de abastecimento e a emissão de alertas de cheia. Essa centralidade impõe uma exigência de confiabilidade que a base observacional disponível nem sempre sustenta, pois a calibração de um modelo requer séries longas e consistentes de variáveis que, na maior parte das bacias do mundo, simplesmente não são medidas.

O problema tem duas faces. A primeira é a escassez absoluta de postos: há bacias inteiras sem qualquer estação fluviométrica, situação que caracteriza grande parte do território tropical e das regiões de montanha. A segunda é mais sutil e afeta também as bacias bem monitoradas: a calibração tradicional ajusta o modelo exclusivamente à vazão no exutório, de modo que parâmetros internos podem assumir valores fisicamente implausíveis desde que a soma produza o hidrograma correto. Estudos recentes documentaram essa distorção de forma direta, ao verificar que uma calibração exclusivamente por vazão atingiu eficiência de Kling e Gupta de 0,87 enquanto a evapotranspiração simulada pelo mesmo modelo ficou abaixo de 0,70 (Pan *et al.*, 2022).

O sensoriamento remoto oferece a saída para as duas faces do problema, porque fornece observações espacialmente distribuídas de variáveis que os modelos simulam internamente e que a rede convencional ignora: evapotranspiração, umidade do solo, elevação da superfície da água, extensão de inundação, armazenamento terrestre total e precipitação. A disponibilidade dessas variáveis transformou a relação entre dado observado e modelo, deslocando o sensoriamento remoto da condição de fonte auxiliar para a de componente estrutural do processo de modelagem.

No Brasil, os relatórios de conjuntura dos recursos hídricos registram a desigualdade na densidade das redes de monitoramento entre regiões e a consequente dificuldade de produzir estimativas confiáveis de disponibilidade em bacias pouco instrumentadas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2025). Experiências conduzidas na Amazônia confirmam a viabilidade da alternativa orbital, com eficiências de Nash e Sutcliffe de 0,85 na calibração e 0,89 na validação em bacia atendida por uma única estação fluviométrica, utilizando precipitação e reanálise climática de origem orbital (Rufino *et al.*, 2023).

A integração, contudo, não é automática nem invariavelmente benéfica. A literatura acumulou evidências de que a adição de dados orbitais pode alterar o conjunto de parâmetros sensíveis sem melhorar o desempenho global, e de que a escolha entre produtos concorrentes da mesma variável afeta o resultado mais do que a decisão de incorporá-los (Dangol *et al.*, 2023). Essa constatação desloca a pergunta relevante: não se trata de saber se o sensoriamento remoto deve ser integrado, mas de identificar sob quais desenhos a integração produz ganho real.

A literatura que responde a essa pergunta está dispersa entre comunidades que operam com vocabulários próprios. Trabalhos de calibração multivariável, estudos de assimilação sequencial, avaliações de produtos de precipitação como forçante e aplicações de aprendizado de máquina ao pós-processamento raramente se citam, embora enfrentem o mesmo problema. Essa fragmentação dificulta a comparação dos ganhos e a escolha fundamentada de uma estratégia.

A revisão integrativa é o desenho apropriado para essa síntese, 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 abordagens de integração entre sensoriamento remoto e modelagem hidrológica têm sido empregadas na gestão de recursos hídricos, com que ganhos de desempenho e com quais limitações, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026?

O objetivo geral consistiu em analisar as evidências recentes sobre a integração entre dados de sensoriamento remoto e modelos hidrológicos aplicados à gestão de recursos hídricos. Como objetivos específicos, buscou-se caracterizar os estudos quanto à origem geográfica e ao delineamento, classificar as

abordagens de integração identificadas, sintetizar os ganhos de desempenho relatados e sistematizar as limitações metodológicas e as lacunas de pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial que orienta esta revisão organiza-se em três eixos: a natureza do problema de equifinalidade que motiva a integração, as variáveis orbitais disponíveis para enfrentá-lo e os mecanismos técnicos pelos quais a observação é incorporada ao modelo.

2.1 *Equifinalidade e os limites da calibração por vazão*

A calibração de um modelo hidrológico consiste em ajustar parâmetros não observáveis de modo que a resposta simulada reproduza a observada. Quando a única variável de referência é a vazão no exutório, conjuntos distintos de parâmetros produzem hidrogramas igualmente satisfatórios, situação conhecida como equifinalidade. O problema não é apenas teórico: ele implica que a repartição interna do balanço hídrico, entre escoamento superficial, percolação e evapotranspiração, pode estar errada mesmo quando o resultado agregado está certo.

A demonstração empírica desse efeito aparece de forma recorrente. Em bacia do leste da China, a calibração exclusivamente por vazão produziu excelente ajuste do hidrograma e desempenho insatisfatório para a evapotranspiração, situação corrigida pela calibração conjunta das duas variáveis, que ainda melhorou a representação dos extremos de cheia e de estiagem (Pan *et al.*, 2022). Em bacia dos Estados Unidos, a incorporação de evapotranspiração e umidade do solo alterou o número e os valores dos parâmetros sensíveis, e a calibração isolada por qualquer uma dessas variáveis mostrou-se inferior à calibração por vazão, o que levou os autores a concluir que a vazão permanece indispensável (Dangol *et al.*, 2023).

O corolário prático é que a integração deve ser desenhada como complemento, e não como substituição. A questão passa a ser qual combinação de variáveis restringe o espaço de parâmetros sem degradar o ajuste da variável de interesse primário, e em que escala espacial e temporal essa restrição deve ser imposta.

2.2 *Variáveis orbitais disponíveis e suas incertezas*

A evapotranspiração é a variável orbital mais utilizada na calibração, por representar a maior saída do balanço na maioria das bacias. A escolha do produto, contudo, não é indiferente. A comparação de cinco conjuntos distintos em bacia chinesa mostrou que todos produziram simulações satisfatórias de vazão, mas

com desempenhos desiguais, e que a calibração orientada à dinâmica temporal em escala de célula superou a calibração orientada ao padrão espacial em escala de bacia (Guo *et al.*, 2022). Em outra aplicação, o refinamento dos parâmetros de evaporação por tipo de uso do solo, a partir de séries orbitais, melhorou a concordância espacial das simulações (Casper *et al.*, 2023).

A precipitação orbital cumpre papel distinto, pois entra como forçante e não como referência de calibração. Sua avaliação em bacia montanhosa do Himalaia revelou diferenças expressivas entre produtos, com dois conjuntos alcançando eficiência de Nash e Sutcliffe próxima de 0,62 na calibração mensal, contra 0,45 e 0,41 dos demais, e com desempenho superior das simulações mensais frente às diárias. Todos os produtos subestimaram os picos de cheia, ainda que tenham reproduzido o momento e a sazonalidade das vazões (Aryal *et al.*, 2023).

O armazenamento terrestre total, medido por gravimetria orbital, oferece uma restrição integradora que nenhuma outra variável fornece, pois engloba água superficial, umidade do solo e água subterrânea. Sua baixa resolução espacial, entretanto, exige procedimentos de refinamento. A aplicação de aprendizado de máquina para essa finalidade, em escala nacional, produziu anomalias de armazenamento refinadas com correlação média de 0,93 frente a poços de observação, permitindo estimar declínio médio de cerca de 29 centímetros por ano e identificar defasagem de aproximadamente oito meses entre a seca meteorológica e a seca subterrânea (Kashani; Safavi, 2025).

A elevação da superfície da água e a extensão de inundação completam o conjunto. Em regiões de montanha, a combinação de múltiplas fontes permitiu construir produtos integrados de evapotranspiração diária a 1 quilômetro de resolução, com correlação de 0,83 frente a torres de fluxo, e decompor a contribuição das fontes de água de escoamento, com 51 por cento provenientes do derretimento de neve, 27 por cento do gelo e 22 por cento da chuva (Menenti *et al.*, 2021).

2.3 Mecanismos de incorporação da observação ao modelo

A calibração multivariável é o mecanismo mais simples: a observação orbital entra na função objetivo, ao lado da vazão, e o conjunto de parâmetros é ajustado para satisfazer simultaneamente as duas restrições. O ganho típico não se manifesta na vazão, e sim na consistência interna do balanço, razão pela qual avaliações que medem apenas o hidrograma tendem a subestimar o benefício (Dangol *et al.*, 2023; Guo *et al.*, 2022).

A assimilação sequencial opera de modo distinto, pois corrige o estado do modelo a cada passo de tempo, em vez de ajustar parâmetros de uma vez por todas. Sua aplicação à estimativa de vazão em rio continental mostrou dependência crítica da forma como a observação é transformada antes de ser

assimilada: a assimilação direta melhorou as estimativas em 24 por cento dos postos, a assimilação de anomalias em 38 por cento e a assimilação de valores normalizados em 62 por cento, elevando a eficiência mediana de Nash e Sutcliffe de 0,42 para 0,50 (Revel *et al.*, 2023).

Em contexto operacional de previsão, a assimilação mostrou ganhos expressivos porém irregulares. A previsão de picos induzidos por furacões melhorou entre 21 e 46 por cento em uma bacia e entre 5 e 46 por cento em outra, mas falhou em evento no qual a vazão saltou de cerca de 28 para 566 metros cúbicos por segundo em um único dia, e apresentou desempenho ruim em postos situados a jusante de barragens, onde as liberações controladas desvinculam a vazão do forçamento natural (Abbaszadeh *et al.*, 2025).

O quarto mecanismo é o pós-processamento, que corrige a saída do modelo sem alterar sua estrutura. Avaliação conduzida em mais de dois mil postos europeus indicou que métodos de aprendizado de máquina superaram os estatísticos, sobretudo nos extremos, e que o mapeamento de quantis, embora melhorasse o volume total, degradou o desempenho em vazões baixas em cerca de 2 por cento dos postos. Nenhum método mostrou-se superior em todo o domínio, e a similaridade hidrológica entre bacias explicou melhor o ganho do que a escolha do método (Du; Pechlivanidis, 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 (Page *et al.*, 2021).

A questão norteadora foi assim definida: quais abordagens de integração entre sensoriamento remoto e modelagem hidrológica têm sido empregadas na gestão de recursos hídricos, com que ganhos de desempenho e com quais limitações, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026? A pergunta foi estruturada em três componentes: população, correspondente a bacias hidrográficas e sistemas de recursos hídricos representados por modelos; interesse, correspondente ao uso de dados orbitais como forçante, referência de calibração, observação a assimilar ou insumo de pós-processamento; e contexto, correspondente à avaliação de desempenho e ao apoio à decisão em gestão 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: (“hydrological model” OR “hydrologic modelling” OR “rainfall-runoff model”) AND (“remote sensing” OR satellite OR “earth observation”) AND (calibration OR “data assimilation” OR forcing OR “water resources management”). Os equivalentes em português incluíram modelagem hidrológica, sensoriamento remoto, calibração, assimilação de dados, bacia hidrográfica e gestão de recursos hídricos. As buscas foram executadas entre 12 de agosto e 2 de setembro de 2026.

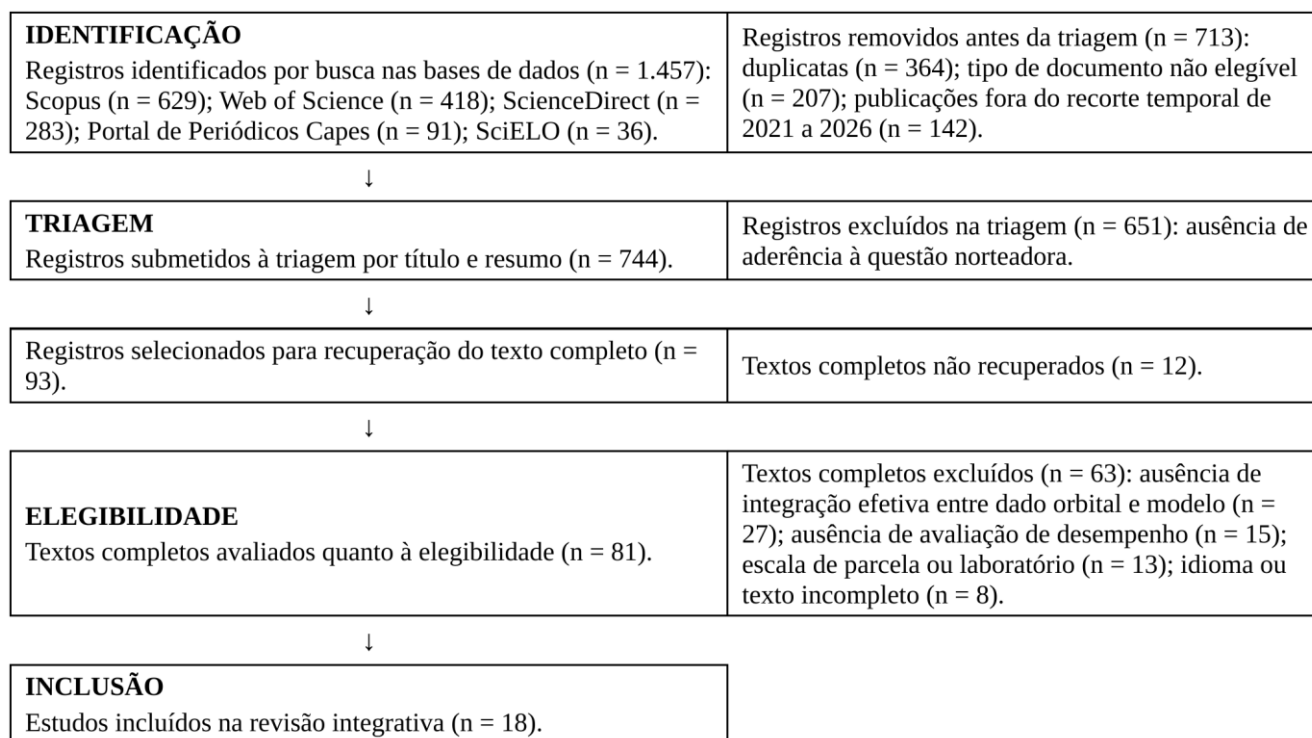
Foram adotados como critérios de inclusão: artigos completos publicados em periódicos revisados por pares entre 2021 e 2026; textos redigidos em português, inglês ou espanhol; estudos nos quais dados de sensoriamento remoto fossem efetivamente integrados a um modelo hidrológico ou hidrodinâmico, em qualquer das quatro modalidades consideradas; e trabalhos que apresentassem medidas de desempenho, procedimentos de validação ou síntese da literatura. Foram excluídos: estudos de sensoriamento remoto sem acoplamento a modelo; trabalhos de modelagem sem componente orbital; pesquisas conduzidas exclusivamente em escala de parcela ou laboratório, sem recorte de bacia; estudos 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 1.457 registros. A remoção prévia à triagem eliminou 713 registros, sendo 364 duplicatas, 207 documentos de tipo não elegível e 142 publicações fora do recorte temporal. Na triagem por título e resumo, 744 registros foram avaliados e 651 foram excluídos por não atenderem à questão norteadora. Dos 93 registros selecionados para recuperação, 12 não tiveram o texto completo acessível. Entre os 81 textos completos avaliados quanto à elegibilidade, 63 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, modelo hidrológico empregado, variáveis e produtos orbitais utilizados, modalidade de integração, métricas de desempenho e limitações relatadas. 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, modalidades de integração e ganhos de desempenho, aplicações em cenários e previsão, e limitações e lacunas.

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 8 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
Akhtar <i>et al.</i>	2021	Afganistão	Modelo semidistribuído alimentado por dados orbitais na bacia do rio Cabul; coeficiente de determinação de 0,75 a 0,86 e eficiência de Nash e Sutcliffe de 0,62 a 0,81 na calibração; projeção de redução de vazão de até 5 e 8,5 por cento sob dois cenários de emissão.
Menenti <i>et al.</i>	2021	Ásia de montanha	Produtos hidrológicos multifonte para bacias de alta montanha; evapotranspiração diária a 1 quilômetro com correlação de 0,83 frente a torres de fluxo; contribuição ao escoamento de 51 por cento de neve, 27 por cento de gelo e 22 por cento de chuva.
Guo <i>et al.</i>	2022	China	Cinco conjuntos de evapotranspiração testados na calibração de modelo distribuído; todos produziram vazão satisfatória; calibração pela dinâmica temporal em escala de célula superou a orientada ao padrão

Autor	Ano	País	Principais desfechos
			espacial de bacia; melhoria da umidade do solo em relação à calibração só por vazão.
Pan <i>et al.</i>	2022	China	Calibração só por vazão atingiu eficiência de Kling e Gupta de 0,87, com evapotranspiração abaixo de 0,70; calibração conjunta de vazão e evapotranspiração produziu resultados razoáveis para ambas e melhorou a simulação de extremos de cheia e estiagem.
Aryal <i>et al.</i>	2023	Nepal	Quatro produtos de precipitação avaliados em bacia himalaia; eficiência de Nash e Sutcliffe mensal de 0,63 e 0,61 para os dois melhores, contra 0,45 e 0,41 dos demais; simulações mensais mais confiáveis que diárias; subestimação dos picos por todos os produtos.
Casper <i>et al.</i>	2023	Alemanha	Calibração de parâmetros de evaporação por tipo de uso do solo a partir de séries orbitais em duas bacias do vale do Nahe; melhoria da concordância espacial medida por índice de eficiência espacial na maioria das classes; desempenho menor na primavera e no fim do verão seco.
Dangol <i>et al.</i>	2023	Estados Unidos	Calibração multivariável alterou o conjunto de parâmetros sensíveis sem melhorar de forma confiável o desempenho global; calibração isolada por evapotranspiração ou umidade do solo foi inferior à calibração por vazão; a escolha entre produtos concorrentes afetou significativamente o resultado.
Paiva <i>et al.</i>	2023	Peru	Conversão de cerca de 12 por cento da floresta em solo exposto na bacia de Madre de Dios; aumento de 38 por cento no escoamento superficial mensal e de 12 por cento na vazão média; na sub-bacia mais afetada, aumento de 187 por cento no escoamento e queda de 8 por cento na evapotranspiração.
Revel <i>et al.</i>	2023	Brasil	Assimilação de elevação da superfície da água em modelo hidrodinâmico continental na Amazônia; melhoria em 24 por cento dos postos com assimilação direta, 38 por cento com anomalias e 62 por cento com valores normalizados; eficiência mediana elevada de 0,42 para 0,50.
Rufino <i>et al.</i>	2023	Brasil	Modelo semidistribuído alimentado por precipitação e reanálise de origem orbital em bacia amazônica com uma única estação fluviométrica; eficiência de Nash e Sutcliffe de 0,85 na calibração e 0,89 na validação, com viés percentual de -9,5 e -0,6.
Verma <i>et al.</i>	2023	Índia	Doze cenários combinando quatro mapas de uso do solo e três períodos climáticos em complexo de reservatórios; taxa de variação da área construída passou de 1,00 para 43,75 por cento em duas décadas; ausência de tendência de precipitação e elevação sustentada das temperaturas.
Betterle; Salamon	2024	Paquistão	Algoritmo aberto de estimativa de profundidade e extensão de inundação aplicado ao evento de 2022 no vale do Indo; área inundada expandida de 39.333 para 61.331 quilômetros quadrados; menor dispersão que a ferramenta anterior frente a simulações hidrodinâmicas.
Bryant <i>et al.</i>	2024	Alemanha	Algoritmo de refinamento de grades de inundação de 32 para 4 metros aplicado à cheia de 2021 no vale do Ahr; processamento em 33 segundos contra 34 minutos da simulação hidrodinâmica, com aumento de 25 por cento no erro quadrático médio e índice de sucesso crítico de 0,813.
Abbaszadeh <i>et al.</i>	2025	Estados Unidos	Assimilação em modelo conceitual para previsão de cheias induzidas por furacões em três bacias; melhoria dos picos de 21 a 46 por cento em uma bacia e de 5 a 46 por cento em outra; falha em evento de subida abrupta e desempenho ruim a jusante de barragens.
Du; Pechlivanidis	2025	Europa	Pós-processamento de modelo pan-europeu em mais de dois mil postos; métodos de aprendizado de máquina superaram os estatísticos, sobretudo

Autor	Ano	País	Principais desfechos
			nos extremos; mapeamento de quantis degradou vazões baixas em cerca de 2 por cento dos postos; similaridade hidrológica explicou melhor o ganho que o método.
Gacu <i>et al.</i>	2025	Global	Revisão sobre inteligência artificial para previsão de vazão em bacias não monitoradas; modelos de memória longa e arquiteturas híbridas superaram modelos conceituais e físicos; 47 por cento dos estudos na Ásia e menos de 5 por cento na África e Oceania somadas.
Kashani; Safavi	2025	Irã	Refinamento de anomalias gravimétricas de armazenamento por aprendizado de máquina para 0,25 grau; correlação média de 0,93 com poços de observação; declínio médio de 29 centímetros por ano entre 2002 e 2023; defasagem de cerca de oito meses entre seca meteorológica e subterrânea.
Springer <i>et al.</i>	2026	Global	Revisão de melhores práticas em assimilação de armazenamento terrestre gravimétrico, com cerca de 60 estudos; ausência de consenso sobre a abordagem ótima; filtros de conjunto com localização e tratamento explícito de erros correlacionados apontados como estado da arte.

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.1 Caracterização dos estudos incluídos

A distribuição geográfica revelou dispersão ampla, com dezesseis contextos distintos entre os dezoito estudos. A China, a Alemanha, o Brasil e os Estados Unidos responderam por dois trabalhos cada, enquanto Afeganistão, Nepal, Peru, Índia, Paquistão e Irã contribuíram com um cada. Dois estudos adotaram escopo global e um abrangeu o domínio europeu. Essa dispersão contrasta com a concentração observada em outros campos da hidrologia orbital e sugere que a integração com modelos é atrativa justamente onde a rede de monitoramento é insuficiente, condição transversal a contextos de renda e clima muito diferentes.

Uma assimetria persiste, contudo, e foi quantificada por um dos estudos de síntese: cerca de 47 por cento da produção sobre inteligência artificial aplicada à previsão em bacias não monitoradas origina-se da Ásia e 35 por cento da América do Norte, enquanto África e Oceania somadas respondem por menos de 5 por cento (Gacu *et al.*, 2025). A presença latino-americana na amostra, com estudos no Brasil e no Peru, indica participação crescente, porém ainda modesta.

Quanto ao delineamento, catorze estudos foram classificados como empíricos, com aplicação e validação de abordagens em bacias definidas, dois como revisões sistemáticas ou de melhores práticas e dois como desenvolvimento e avaliação de algoritmos de uso geral. Os modelos hidrológicos mais frequentes foram os de base física semidistribuídos, presentes em sete estudos, seguidos pelos modelos hidrodinâmicos e de roteamento, presentes em quatro.

4.2 Modalidades de integração e ganhos de desempenho

A primeira modalidade, o uso de produtos orbitais como forçante de entrada, apareceu em cinco estudos e mostrou-se a porta de entrada típica em bacias sem rede pluviométrica. Os desempenhos alcançados foram compatíveis com aplicação em gestão: eficiência de Nash e Sutcliffe de 0,85 na calibração e 0,89 na validação, com viés percentual de -9,5 e -0,6, em bacia amazônica atendida por uma única estação fluviométrica (Rufino *et al.*, 2023), e coeficientes de determinação entre 0,75 e 0,86 na calibração de bacia transfronteiriça do sul da Ásia (Akhtar *et al.*, 2021). A ressalva recorrente é a subestimação dos picos, observada em todos os produtos avaliados em ambiente montanhoso (Aryal *et al.*, 2023).

A segunda modalidade, a calibração multivariável, apareceu em quatro estudos e produziu o achado mais contraintuitivo da revisão. O ganho não se manifesta na vazão: em bacia norte-americana, a incorporação de evapotranspiração e umidade do solo não melhorou de forma confiável o desempenho global, e a calibração isolada por essas variáveis foi pior que a calibração por vazão (Dangol *et al.*, 2023). O benefício aparece na consistência dos demais componentes, como demonstrado pela correção de uma evapotranspiração mal simulada sob excelente ajuste de hidrograma (Pan *et al.*, 2022). A escala da restrição também importou: a calibração orientada à dinâmica temporal em escala de célula superou a orientada ao padrão espacial agregado (Guo *et al.*, 2022).

A terceira modalidade, a assimilação sequencial, apareceu em quatro estudos e apresentou os ganhos mais expressivos, porém os mais sensíveis ao desenho. O resultado mais informativo é que a transformação aplicada à observação antes da assimilação determinou a magnitude do ganho: a proporção de postos com melhoria passou de 24 por cento com assimilação direta para 62 por cento com valores normalizados, e a elevação de nível foi melhorada em 85,6 por cento das estações virtuais (Revel *et al.*, 2023). Em previsão operacional, os ganhos de pico variaram de 5 a 46 por cento conforme a bacia e o posto (Abbaszadeh *et al.*, 2025). A revisão de melhores práticas em assimilação de dados gravimétricos reforça que não há consenso sobre a abordagem ótima, embora filtros de conjunto com localização e tratamento explícito de erros correlacionados constituam o estado da arte (Springer *et al.*, 2026).

A quarta modalidade, o pós-processamento, apareceu em três estudos e distingue-se por não exigir alteração do modelo. Os métodos de aprendizado de máquina superaram os estatísticos, sobretudo nos extremos, e a degradação observada em vazões baixas sob mapeamento de quantis, ainda que restrita a cerca de 2 por cento dos postos, alerta para o risco de corrigir o volume total à custa dos extremos (Du; Pechlivanidis, 2025). O achado mais relevante dessa modalidade é que a similaridade hidrológica entre bacias explicou melhor o ganho obtido do que a escolha do método, o que desloca a atenção do algoritmo para a tipologia da bacia.

Transversalmente, dois estudos trataram do processamento de produtos de inundação, com ganhos de natureza computacional. Um algoritmo de refinamento de resolução reduziu o tempo de processamento de cerca de 34 minutos para 33 segundos em relação à simulação hidrodinâmica de alta resolução, ao custo de aumento de 25 por cento no erro quadrático médio e com índice de sucesso crítico praticamente equivalente ao do método anterior (Bryant *et al.*, 2024). Outro procedimento expandiu a área inundada mapeada de 39.333 para 61.331 quilômetros quadrados em evento de grande magnitude, ao recuperar regiões mascaradas por ausência de dado (Betterle; Salamon, 2024).

4.3 Aplicações a cenários e apoio à decisão

Cinco estudos empregaram a integração para avaliar cenários futuros, aplicação que representa o elo mais direto com a gestão. A simulação de mudança de cobertura em bacia amazônica peruana indicou que a conversão de cerca de 12 por cento da floresta em solo exposto elevou o escoamento superficial mensal em 38 por cento e a vazão média em aproximadamente 12 por cento, com efeito muito mais intenso na sub-bacia mais afetada, onde o escoamento superficial anual cresceu cerca de 187 por cento (Paiva *et al.*, 2023).

Em contexto de urbanização acelerada, a combinação de quatro mapas de uso do solo com três períodos climáticos permitiu isolar os efeitos de cada forçante sobre o regime hidrológico de um complexo de reservatórios, em cenário no qual a taxa de variação da área construída passou de 1,00 por cento para 43,75 por cento ao longo de duas décadas (Verma *et al.*, 2023). Já a projeção climática em bacia de montanha indicou redução de vazão de até cerca de 5 e 8,5 por cento sob dois cenários de emissão, com uma sub-bacia apresentando comportamento oposto ao das demais (Akhtar *et al.*, 2021).

A aplicação ao monitoramento de secas subterrâneas ilustra outra frente de apoio à decisão. O refinamento de anomalias gravimétricas por aprendizado de máquina permitiu quantificar o declínio do armazenamento em escala nacional e, sobretudo, estabelecer a defasagem de cerca de oito meses entre a seca meteorológica e a seca subterrânea (Kashani; Safavi, 2025). Essa defasagem é operacionalmente valiosa, pois define uma janela de antecipação para medidas de restrição de uso.

Um limite importante dessas aplicações foi explicitado pelos próprios estudos: postos situados a jusante de barragens apresentaram desempenho consistentemente ruim, porque as liberações controladas desvinculam a vazão observada do forçamento natural que o modelo representa (Abbaszadeh *et al.*, 2025). Como grande parte das bacias de interesse para a gestão é regulada por reservatórios, essa limitação restringe justamente o domínio de maior relevância prática.

4.4 Limitações, lacunas e implicações

A limitação mais citada foi a incerteza dos próprios produtos orbitais. A escolha entre conjuntos concorrentes da mesma variável afetou significativamente o desempenho do modelo, a ponto de um dos produtos de evapotranspiração avaliados produzir simulações piores e superestimar a vazão quando usado isoladamente (Dangol *et al.*, 2023). A recomendação que daí decorre é avaliar o produto antes de incorporá-lo, e não tratar a origem orbital como garantia de qualidade.

A segunda limitação é a dependência da estrutura do modelo. O mesmo estudo observou que uma variante estrutural do modelo apresentou desempenho semelhante na calibração e consideravelmente superior na validação, o que indica que parte do ganho atribuído à integração pode, na verdade, decorrer da escolha estrutural (Dangol *et al.*, 2023). Esse resultado recomenda a avaliação de múltiplas estruturas antes de atribuir melhorias ao dado orbital.

A terceira limitação refere-se à transferibilidade. Nenhum método de pós-processamento mostrou-se superior em todo o domínio europeu analisado, e os padrões de ganho foram semelhantes entre métodos, sugerindo que as características da bacia governam o resultado mais do que o algoritmo (Du; Pechlivanidis, 2025). Conclusão convergente emergiu da síntese sobre inteligência artificial em bacias não monitoradas, que apontou transferibilidade limitada entre regiões, protocolos de avaliação inconsistentes e baixa reprodutibilidade como lacunas persistentes (Gacu *et al.*, 2025).

Como agenda, três direções foram explicitadas pelos estudos de síntese. A primeira é a incorporação de conhecimento físico aos modelos orientados a dados, de modo a preservar consistência hidrológica. A segunda é a padronização de conjuntos de referência e de protocolos de avaliação, condição para que os ganhos relatados sejam comparáveis. A terceira é o desenvolvimento de produtos de baixa latência, requisito para que a assimilação deixe de ser exercício retrospectivo e passe a operar em tempo quase real (Springer *et al.*, 2026).

Cumpramos reconhecer as limitações desta revisão. A restrição a cinco bases e a três idiomas pode ter excluído publicações de circulação regional, e a exclusão de teses, dissertações e trabalhos de eventos reduziu o acesso a experiências operacionais de órgãos gestores. A heterogeneidade das métricas, dos modelos e das escalas impediu qualquer síntese quantitativa, de modo que as comparações entre modalidades devem ser lidas como aproximações. Por fim, a classificação dos estudos em quatro modalidades é uma construção analítica desta revisão, e vários trabalhos combinaram mais de uma abordagem, tendo sido alocados pela modalidade predominante.

5. CONCLUSÃO

Esta revisão integrativa analisou 18 estudos publicados entre 2021 e 2026 sobre a integração entre sensoriamento remoto e modelagem hidrológica aplicada à gestão de recursos hídricos. Os achados indicam que o campo se organiza em quatro modalidades, o uso de produtos orbitais como forçante, a calibração multivariável, a assimilação sequencial e o pós-processamento, cada uma com lógica própria de incorporação da observação ao modelo.

Os ganhos de desempenho foram consistentes, porém condicionados ao desenho. A assimilação apresentou os maiores ganhos, com a proporção de postos beneficiados variando de 24 a 62 por cento conforme a transformação aplicada à observação, e com melhoria de 5 a 46 por cento na previsão de picos. A calibração multivariável, por sua vez, raramente melhorou a vazão, mas corrigiu a repartição interna do balanço hídrico, benefício que avaliações centradas apenas no hidrograma deixam de capturar.

O resultado que atravessa toda a amostra é que o ganho depende mais do desenho da integração e da qualidade do produto escolhido do que da simples adição de dados orbitais ao modelo. Três evidências sustentam essa leitura: a escolha entre produtos concorrentes da mesma variável alterou significativamente o desempenho; a estrutura do modelo respondeu por parte do ganho atribuído ao dado; e as características da bacia explicaram melhor o resultado do que o método empregado.

Recomenda-se, para a agenda futura, a avaliação prévia dos produtos orbitais antes de sua incorporação, o teste de múltiplas estruturas de modelo para separar o efeito do dado do efeito estrutural, a padronização de protocolos de avaliação que tornem comparáveis os ganhos relatados, o desenvolvimento de abordagens aplicáveis a bacias fortemente reguladas por reservatórios e a ampliação da produção científica em regiões sub-representadas, condição para que os métodos sejam validados onde a carência de monitoramento é mais severa.

REFERÊNCIAS

ABBASZADEH, P. *et al.* Towards a robust hydrologic data assimilation system for hurricane-induced river flow forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 29, n. 11, p. 2407-2427, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-29-2407-2025>. Acesso em: 29 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.

AKHTAR, F. *et al.* Coupling remote sensing and hydrological model for evaluating the impacts of climate change on streamflow in data-scarce environment. *Sustainability*, v. 13, n. 24, art. 14025, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132414025>. Acesso em: 15 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.

ARYAL, A. *et al.* Evaluation of satellite-derived precipitation products for streamflow simulation of a mountainous Himalayan watershed: a study of Myagdi Khola in Kali Gandaki basin, Nepal. *Remote Sensing*, v. 15, n. 19, art. 4762, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15194762>. Acesso em: 21 ago. 2026.

BETTERLE, A.; SALAMON, P. Water depth estimate and flood extent enhancement for satellite-based inundation maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 24, n. 8, p. 2817-2836, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2817-2024>. Acesso em: 26 ago. 2026.

BRYANT, S. *et al.* Technical note: resolution enhancement of flood inundation grids. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 28, n. 3, p. 575-588, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-28-575-2024>. Acesso em: 27 ago. 2026.

CASPER, M. C. *et al.* Calibration of land-use-dependent evaporation parameters in distributed hydrological models using MODIS evaporation time series data. *Hydrology*, v. 10, n. 12, art. 216, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology10120216>. Acesso em: 22 ago. 2026.

DANGOL, S. *et al.* Multivariate calibration of the SWAT model using remotely sensed datasets. *Remote Sensing*, v. 15, n. 9, art. 2417, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15092417>. Acesso em: 19 ago. 2026.

DU, Y.; PECHLIVANIDIS, I. G. Hybrid approaches enhance hydrological model usability for local streamflow prediction. *Communications Earth and Environment*, v. 6, art. 334, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02324-y>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GACU, J. G. *et al.* Application of artificial intelligence in hydrological modeling for streamflow prediction in ungauged watersheds: a review. *Water*, v. 17, n. 18, art. 2722, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w17182722>. Acesso em: 31 ago. 2026.

GUO, X. *et al.* Evaluating the potential of different evapotranspiration datasets for distributed hydrological model calibration. *Remote Sensing*, v. 14, n. 3, art. 629, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14030629>. Acesso em: 17 ago. 2026.

KASHANI, A.; SAFAVI, H. R. Assessing groundwater drought in Iran using GRACE data and machine learning. *Scientific Reports*, v. 15, art. 14671, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99342-9>. Acesso em: 1 set. 2026.

MENENTI, M. *et al.* Multi-source hydrological data products to monitor high Asian river basins and regional water security. *Remote Sensing*, v. 13, n. 24, art. 5122, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13245122>. Acesso em: 16 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: 14 ago. 2026.

PAIVA, K. *et al.* Hydrological response assessment of land cover change in a Peruvian Amazonian basin impacted by deforestation using the SWAT model. *Remote Sensing*, v. 15, n. 24, art. 5774, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15245774>. Acesso em: 23 ago. 2026.

PAN, S. *et al.* Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration datasets for improving hydrological model simulation in humid region of East China. *Remote Sensing*, v. 14, n. 18, art. 4546, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14184546>. Acesso em: 18 ago. 2026.

REVEL, M. *et al.* Assimilation of transformed water surface elevation to improve river discharge estimation in a continental-scale river. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 27, n. 3, p. 647-671, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-27-647-2023>. Acesso em: 24 ago. 2026.

RUFINO, P. R. *et al.* Evaluation of the SWAT model for the simulation of flow and water balance based on orbital data in a poorly monitored basin in the Brazilian Amazon. *Geographies*, v. 3, n. 1, p. 1-18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geographies3010001>. Acesso em: 20 ago. 2026.

SPRINGER, A. *et al.* A review of current best practices and future directions in assimilating GRACE and GRACE-FO terrestrial water storage data into numerical models. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 30, n. 4, p. 985-1022, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-30-985-2026>. Acesso em: 2 set. 2026.

VERMA, S. *et al.* Simulating the hydrological processes under multiple land use/land cover and climate change scenarios in the Mahanadi reservoir complex, Chhattisgarh, India. *Water*, v. 15, n. 17, art. 3068, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15173068>. Acesso em: 25 ago. 2026.