INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM AGRONOMIA

Luiz Felipe Marques da Silva

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HÍDRICA NA LAGOA DO IFMG *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA

São João Evangelista – MG
2026

LUIZ FELIPE MARQUES DA SILVA

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HÍDRICA NA LAGOA DO IFMG *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda

São João Evangelista – MG
2026

S586a Silva, Luiz Felipe Marques da.

Avaliação da dinâmica hídrica na lagoa do IFMG *Campus* São João Evangelista/ Luiz Felipe Marques da Silva – 2026.

28f.: il.

Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2026.

1. Balanço hídrico. 2. Infiltração. 3. Pequenos reservatórios. 4. Sensoriamento remoto. 5. Segurança de barragens. I. Silva, Luiz Felipe Marques da. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 551.482

Catalogação: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Luiz Felipe Marques da Silva

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HÍDRICA NA LAGOA DO IFMG *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

Aprovado em: 17 de julho de 2026.

Banca examinadora:

gov.br
Documento assinado digitalmente
JONATHAN DA ROCHA MIRANDA
Data: 24/11/2026 23:21:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda
Orientador – IFMG *Campus* São João Evangelista

gov.br
Documento assinado digitalmente
PAULO HENRIQUE AMADOR MIRANDA
Data: 24/11/2026 13:53:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Paulo Henrique Amador Miranda
IFMG *Campus* São João Evangelista

gov.br
Documento assinado digitalmente
LUCAS BARROS SOUZA
Data: 24/11/2026 07:24:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Lucas Barros Souza
IFMG *Campus* São João Evangelista

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para enfrentar os desafios e concluir mais esta etapa.

À minha família, pelo apoio, pelo incentivo e pela compreensão durante toda a trajetória acadêmica.

Em especial, à minha mãe, exemplo de amor, dedicação e perseverança, pelos ensinamentos, pelo apoio incondicional e por nunca deixar que eu desistisse dos meus objetivos. Esta conquista também é sua.

Ao meu orientador, Professor Jonathan da Rocha Miranda, pela confiança, pela dedicação, pela paciência e pelos ensinamentos durante a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, pelos conhecimentos transmitidos e pela contribuição para minha formação profissional.

Aos amigos e colegas de graduação, pelo companheirismo e pelo apoio ao longo dessa caminhada.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Pequenos reservatórios respondem rapidamente a variações climáticas e a alterações estruturais, e a lagoa do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), *Campus* São João Evangelista, apresenta rebaixamento progressivo do nível nos últimos anos. Este trabalho teve como objetivo diagnosticar a dinâmica hídrica da lagoa e separar a parcela do déficit explicada pela demanda climática da parcela atribuível a perdas por infiltração. Entre maio de 2024 e maio de 2025, o nível d'água foi monitorado em régua linimétrica com poço de tranquilização, lida por nivelamento óptico, e comparado a um balanço climático diário construído com a precipitação do produto CHIRPS e a evapotranspiração real do produto MOD16A2. A resposta do nível à chuva foi avaliada por correlação cruzada, com defasagens de 0 a 15 dias, e por regressão linear simples. Em dias sem chuva, a perda média foi de 1,17 cm/dia, cerca de quatro vezes a evapotranspiração média estimada (0,27 cm/dia), e a diferença correspondeu a 76% da perda. A correlação entre precipitação e variação do nível foi máxima com defasagem de um dia ($r = 0{,}29$), e a regressão indicou ganho de 0,58 mm de nível por milímetro de chuva. O déficit não explicado pelo clima foi de 6,03 mm/dia, cerca de 2.200 mm/ano. Os resultados sugerem que o rebaixamento está associado sobretudo a perdas por infiltração no leito e nas margens, e não à demanda atmosférica. A fração atribuída à infiltração depende, porém, da estimativa de evaporação da lâmina livre e de entradas e saídas não medidas, o que indica a necessidade de medir a evaporação, registrar as vazões de entrada e de extravasamento e investigar a integridade geotécnica do barramento.

Palavras-chave: Balanço hídrico. Infiltração. Pequenos reservatórios. Sensoriamento remoto. Segurança de barragens.

ABSTRACT

Small reservoirs respond quickly to climatic variation and to structural changes, and the lagoon of the Federal Institute of Minas Gerais (IFMG), São João Evangelista *Campus*, has shown a progressive drop in water level in recent years. This study aimed to diagnose the water dynamics of the lagoon and to separate the part of the deficit explained by climatic demand from the part attributable to seepage losses. Between May 2024 and May 2025, water level was monitored with a staff gauge inside a stilling well, read by optical levelling, and compared with a daily climatic balance built from CHIRPS precipitation and MOD16A2 actual evapotranspiration. The response of water level to rainfall was assessed by cross-correlation, with lags from 0 to 15 days, and by simple linear regression. On days without rain, the mean loss was 1.17 cm/day, about four times the estimated mean evapotranspiration (0.27 cm/day), and the difference accounted for 76% of the loss. The correlation between precipitation and level change peaked at a one-day lag ($r = 0.29$), and the regression indicated a gain of 0.58 mm of level per millimetre of rain. The deficit not explained by climate was 6.03 mm/day, about 2,200 mm/year. The results suggest that the drawdown is associated mainly with seepage through the bed and banks rather than with atmospheric demand. The fraction attributed to seepage depends, however, on the estimate of open-water evaporation and on unmeasured inflows and outflows, which points to the need to measure evaporation, record inflow and spillway discharge, and investigate the geotechnical integrity of the embankment.

Keywords: Water balance. Seepage. Small reservoirs. Remote sensing. Dam safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Lagoa do IFMG *Campus* São João Evangelista 16
Figura 2 – Sistema linimétrico instalado na lagoa 17
Figura 3 – Detalhe da boia e do tubo de tranquilização durante a leitura 17
Figura 4 – Teodolito utilizado na leitura do nível 18
Figura 5 – Tendência da perda de nível em dias secos e da evapotranspiração do MOD16, de maio de 2024 a maio de 2025 (médias móveis de 30 dias) 20
Figura 6 – Nível observado e nível esperado pelo balanço climático ($P - ET$) da lagoa, de maio de 2024 a maio de 2025 22
Figura 7 – Perda diária de nível da lagoa ao longo do tempo e tendência (média móvel de 30 dias) 22
Figura 8 – Correlação entre a precipitação e a variação do nível da lagoa para defasagens de 0 a 15 dias 23
Figura 9 – Variação do nível da lagoa no dia seguinte em função da precipitação diária (defasagem de um dia) 24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perda média de nível em dias secos e evapotranspiração estimada, maio de 2024 a maio de 2025 20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CHIRPS	*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*
ET	Evapotranspiração real
IFMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
INA	Indicador de nível d'água
MODIS	*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
MOD16A2	Produto de evapotranspiração do sensor MODIS, acumulado de 8 dias
PVC	Policloreto de vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Precipitação diária (mm)
ET	Evapotranspiração real diária (mm)
ΔL_{real}	Variação diária observada do nível d'água (mm)
ΔL_{esp}	Variação diária esperada pela demanda climática (mm)
I	Perda não explicada pelo clima, atribuída à infiltração (mm)
r	Coeficiente de correlação de Pearson
β_0	Intercepto da regressão linear (mm)
β_1	Coeficiente angular da regressão linear (mm/mm)
R^2	Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**12**
2	**OBJETIVOS**	**13**
2.1	**Objetivo geral**	**13**
2.2	**Objetivos específicos**	**13**
3	**REFERENCIAL TEÓRICO**	**14**
3.1	**Balanço hídrico de pequenos reservatórios**	**14**
3.2	**Perdas por percolação e segurança de barragens**	**14**
3.3	**Sensoriamento remoto da precipitação e da evapotranspiração**	**15**
3.4	**Análise de séries temporais de nível**	**15**
4	**MATERIAL E MÉTODOS**	**16**
4.1	**Área de estudo**	**16**
4.2	**Monitoramento do nível d'água**	**16**
4.3	**Dados hidrometeorológicos**	**17**
4.4	**Balanço hídrico e estimativa da infiltração**	**18**
4.5	**Resposta do nível à precipitação**	**19**
5	**RESULTADOS E DISCUSSÃO**	**20**
5.1	**Perdas em dias secos e demanda atmosférica**	**20**
5.2	**Balanço ao longo do ano**	**21**
5.3	**Resposta do nível à precipitação**	**21**
5.4	**Implicações e limitações**	**23**
6	**CONCLUSÃO**	**25**
REFERÊNCIAS		**26**

1 INTRODUÇÃO

Lagos, lagoas e pequenos reservatórios armazenam água, regulam o ciclo hidrológico local e mantêm habitats aquáticos. A flutuação do nível d'água é um indicador do balanço hídrico desses sistemas e tende a ser sensível tanto à variabilidade climática quanto a intervenções humanas, com efeitos sobre a estrutura e o funcionamento do ecossistema (LIN *et al.*, 2025). Por terem pequeno volume e baixa profundidade, lagoas como a do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), *Campus* São João Evangelista, respondem de forma rápida a essas perturbações.

A lagoa do IFMG ocupa posição central no *campus* e é parte da paisagem da cidade, com uso em atividades de ensino, pesquisa e lazer. Nos últimos anos, porém, apresenta rebaixamento progressivo do nível, o que reduz seu valor paisagístico e pedagógico e afeta o ecossistema aquático. Diante desse quadro, a comunidade acadêmica tem discutido se o esvaziamento resulta de anos mais secos, do aumento da evaporação ou de perdas pelo leito e pelo barramento, questão que orienta a escolha das medidas de recuperação.

O nível de um reservatório resulta do balanço entre entradas, como precipitação direta, escoamento superficial e aporte subterrâneo, e saídas, como evaporação, descarga por extravasor e infiltração no leito (SUN *et al.*, 2021). Lagos podem perder água por percolação para o aquífero em parte do leito ou em todo ele (WINTER *et al.*, 1998), e a detecção e a prevenção de vazamentos são parte do acompanhamento de barragens (PLATA BEDMAR; ARAGUÁS ARAGUÁS, 2002). Quando a perda supera de forma persistente a demanda evaporativa, o desequilíbrio sugere perdas pelo leito ou pelo barramento. Em barragens de terra com controle deficiente da percolação, a erosão interna regressiva (*piping*) pode evoluir em pouco tempo até a ruptura (FELL *et al.*, 2003), e esse mecanismo é um dos focos das análises estatísticas de rupturas e acidentes nessas estruturas (FOSTER; FELL; SPANNAGLE, 2000).

Separar as componentes climática e estrutural do déficit exige séries contínuas de nível, precipitação e evaporação. Na ausência de estação meteorológica no local, produtos de sensoriamento remoto de precipitação e evapotranspiração oferecem séries diárias contínuas (FUNK *et al.*, 2015; MU; ZHAO; RUNNING, 2011), que podem ser combinadas com leituras de nível em campo para estimar a perda não explicada pelo clima.

Este trabalho parte da hipótese de que o rebaixamento da lagoa está associado principalmente a perdas por infiltração no leito e nas margens, e não à demanda climática. O diagnóstico pretende subsidiar a direção do *campus* na definição de ações de monitoramento e de recuperação da lagoa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Diagnosticar a dinâmica hídrica da lagoa do IFMG, *Campus* São João Evangelista, e avaliar a contribuição da demanda climática e das perdas por infiltração para o rebaixamento do nível d'água.

2.2 Objetivos específicos

a) monitorar a variação diária do nível d'água da lagoa entre maio de 2024 e maio de 2025;

b) estimar o balanço climático diário com precipitação e evapotranspiração obtidas por sensoriamento remoto;

c) quantificar a perda de nível nos dias sem chuva e compará-la à evapotranspiração estimada;

d) avaliar a defasagem e a magnitude da resposta do nível à precipitação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Balanço hídrico de pequenos reservatórios

O balanço hídrico de uma lagoa relaciona a variação do volume armazenado às entradas e saídas de água. Em modelos de lagoas agrícolas, essa variação é igual à vazão afluente menos a vazão efluente, somadas à precipitação e descontadas a evapotranspiração e a percolação (SUN *et al.*, 2021). Formulações simplificadas, que omitem parte desses termos, facilitam a aplicação, mas reúnem os fluxos não medidos em um único resíduo, o que limita a interpretação física desse termo (SUN *et al.*, 2021).

Em lagos, a variação do armazenamento resulta do saldo entre a afluência da bacia, a precipitação sobre a superfície e a evaporação, e o aporte da bacia somado à chuva pode compensar a perda evaporativa (WANG *et al.*, 2023). A evaporação da superfície livre é, assim, o principal termo de saída de origem climática, e sua estimativa em lagos rasos e pequenos reservatórios requer métodos próprios, distintos dos usados para a evapotranspiração de superfícies vegetadas (MCMAHON *et al.*, 2013).

3.2 Perdas por percolação e segurança de barragens

A interação entre lagos e água subterrânea depende da posição do lago em relação aos sistemas de fluxo local e regional; lagos assentados sobre depósitos de baixa permeabilidade podem perder água mesmo em áreas de descarga regional, e o limite entre os trechos do leito que recebem e que perdem água se desloca conforme a recarga altera a inclinação do lençol (WINTER *et al.*, 1998). Pela Lei de Darcy, a vazão percolada é proporcional ao gradiente hidráulico, de modo que a elevação do nível do reservatório tende a aumentar a perda. Em modelos acoplados de água superficial e subterrânea, a troca entre um corpo d'água e o aquífero é controlada pelo coeficiente de drenança, pela área de contato e pelo gradiente hidráulico, e o sentido do fluxo se inverte quando a carga subterrânea supera o nível do corpo d'água (DUNG *et al.*, 2026). A troca entre lagos e aquíferos também pode variar sazonalmente em intensidade (LIU *et al.*, 2020b).

Quando a percolação é elevada e persistente, podem se formar rotas preferenciais de fluxo que carreiam partículas do solo e iniciam a erosão interna regressiva (*piping*). A análise estatística de rupturas e acidentes em barragens de terra concentra-se na erosão interna e na instabilidade de taludes como mecanismos principais (FOSTER; FELL; SPANNAGLE, 2000). Em barragens construídas sobretudo com aterro e com controle deficiente da percolação, o tempo de desenvolvimento do *piping* pode ser curto, e o monitoramento contínuo da percolação e a inspeção são necessários para detectá-lo a tempo de evitar a ruptura (FELL *et al.*, 2003).

Intervenções no entorno de reservatórios, como movimentação de terra, alterações topográficas e retirada da vegetação marginal, podem modificar a permeabilidade do solo e as

rotas de fluxo. O sentido dessa modificação depende do tipo de intervenção: a compactação tende a reduzir a porosidade e a capacidade de infiltração do solo (KOCI *et al.*, 2020; XIE; CHUI, 2025), enquanto escavações e a remoção de camadas de baixa permeabilidade no fundo podem expor horizontes mais permeáveis.

3.3 Sensoriamento remoto da precipitação e da evapotranspiração

O produto CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) combina estimativas de precipitação por satélite no infravermelho com dados de estações e fornece séries diárias com resolução de 0,05° (FUNK *et al.*, 2015). A evapotranspiração real pode ser estimada por algoritmos aplicados a dados do sensor MODIS, em escalas regionais e globais (MU; ZHAO; RUNNING, 2011). O produto MOD16A2, versão 6.1, segue a lógica da equação de Penman-Monteith e fornece a evapotranspiração acumulada em períodos de 8 dias, com resolução de 500 m (DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.061).

Esses produtos representam a superfície terrestre do pixel. Modelos hidrológicos que separam os componentes da evapotranspiração tratam a evaporação de água livre como termo próprio, distinto da evaporação do solo e da transpiração (SHADMEHRI TOOSI *et al.*, 2025). Assim, a evapotranspiração do MOD16 sobre uma área com lagoa e entorno vegetado não equivale à evaporação da lâmina d'água, e seu uso como estimativa dessa evaporação deve ser tratado como aproximação.

3.4 Análise de séries temporais de nível

A análise de correlação cruzada mede a semelhança entre duas séries temporais em diferentes defasagens, por meio de um coeficiente que varia de -1 a 1, e tem sido usada para relacionar processos hidrológicos e suas respostas no tempo (XIAO *et al.*, 2024). Aplicada à precipitação e à variação do nível, permite identificar o tempo de resposta do reservatório e distinguir respostas imediatas de respostas tardias.

Em séries diárias, porém, as observações consecutivas não são independentes. A autocorrelação temporal reduz o número efetivo de observações e pode inflar a força aparente das relações estatísticas (ZHANG *et al.*, 2026). Além disso, o preenchimento de lacunas introduz valores que não foram medidos e deve ser considerado na interpretação das correlações.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A lagoa situa-se no IFMG, *Campus* São João Evangelista, no leste de Minas Gerais (18° 32’ 52” S; 42° 45’ 48” W; altitude de 690 m), em posição central no *campus* (Figura 1). O entorno combina áreas verdes, edificações acadêmicas e paisagismo, sobre relevo predominantemente plano a suave ondulado, com vegetação de transição entre Cerrado e Mata Atlântica. O clima é Cwa na classificação de Köppen, com verão quente e chuvoso e inverno seco (ALVARES *et al.*, 2013).

Figura 1 – Lagoa do IFMG *Campus* São João Evangelista



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

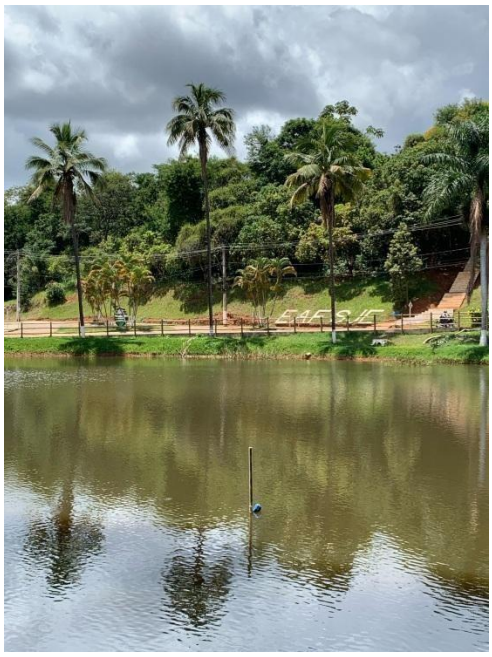
4.2 Monitoramento do nível d’água

O monitoramento contínuo da percolação e a inspeção regular são necessários para detectar a tempo perdas anômalas e a erosão interna em barramentos de terra (FELL *et al.*, 2003), e a flutuação do nível é um indicador do balanço hídrico do corpo d’água (LIN *et al.*, 2025). Para a medição do nível, o poço de tranquilização com flutuador permanece como arranjo tradicional nas estações de medição de nível (SAUER; TURNIPSEED, 2010). Instalou-se na lagoa um indicador de nível d’água composto por régua graduada em tubo de PVC de 50 mm de diâmetro e 3 m de altura, fixada verticalmente ao leito (Figura 2).

Para reduzir o efeito de ondas e de oscilações superficiais causadas pelo vento, instalou-se em torno da régua um tubo de PVC de 75 mm de diâmetro, que funcionou como poço de tranquilização e foi mantido em posição por uma boia externa (Figura 3).

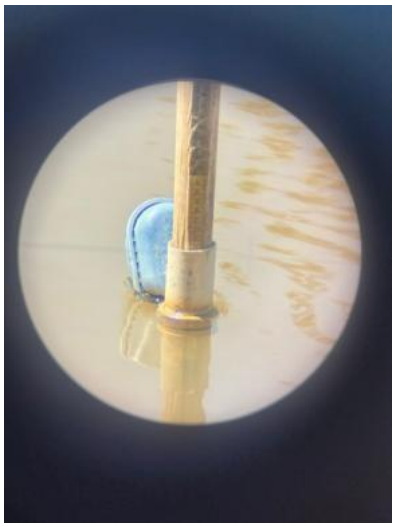
As leituras foram feitas por nivelamento óptico com teodolito (Figura 4). A visada foi

Figura 2 – Sistema linimétrico instalado na lagoa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 3 – Detalhe da boia e do tubo de tranquilização durante a leitura



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

dirigida à interseção entre a régua interna e a borda superior do tubo externo, o que permitiu obter a cota do nível d'água em relação a um referencial topográfico fixo. As leituras foram realizadas a cada dois dias no período de maio de 2024 a julho de 2025.

4.3 Dados hidrometeorológicos

A precipitação diária foi obtida do produto CHIRPS, versão 2.0, com resolução de 0,05° (cerca de 5,5 km) (FUNK *et al.*, 2015). A seleção dessa fonte buscou assegurar a continuidade da série de precipitação sobre a microbacia da lagoa, que não dispõe de estação meteorológica.

Figura 4 – Teodolito utilizado na leitura do nível



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A evapotranspiração real (ET) foi obtida do produto MOD16A2, versão 6.1, derivado do sensor MODIS, com resolução espacial de 500 m e valores acumulados a cada 8 dias (MU; ZHAO; RUNNING, 2011). Os valores foram multiplicados pelo fator de escala 0,1 e convertidos em médias diárias (mm/dia). Por representar a superfície terrestre do pixel, a ET do MOD16 foi usada como aproximação da perda atmosférica da lagoa (SHADMEHRI TOOSI *et al.*, 2025).

As séries de nível, de precipitação e de evapotranspiração foram reunidas em uma série diária de maio de 2024 a maio de 2025, expressa em lâmina d'água (mm). As leituras de nível, registradas em centímetros, tiveram os dias sem medição preenchidos pelo método de preenchimento retroativo (*backward fill*), admitindo-se que a taxa de variação da leitura seguinte representava os dias sem leitura.

4.4 Balanço hídrico e estimativa da infiltração

A variação diária observada do nível (ΔL_{real}) foi comparada à variação esperada pela demanda climática (ΔL_{esp}), calculada pela Equação 1, em que P é a precipitação diária (mm) e ET é a evapotranspiração real diária (mm). Essa formulação é uma simplificação do balanço completo de lagoas (SUN *et al.*, 2021).

$$\Delta L_{esp} = P - ET \tag{1}$$

A perda não explicada pelo clima, interpretada como infiltração no leito e nas margens (I), foi obtida pela diferença entre a variação observada e a esperada (Equação 2).

$$I = \Delta L_{real} - \Delta L_{esp} \tag{2}$$

A Equação 1 não inclui a vazão afluente, a descarga por extravasor nem eventuais retiradas, termos presentes no balanço completo de lagoas (SUN *et al.*, 2021). Assim, I reúne a infiltração e os demais fluxos não medidos, e sua interpretação como infiltração é mais segura nos dias sem chuva, quando o aporte da bacia tende a ser pequeno.

Para estimar a taxa de infiltração de base, isolaram-se os dias secos, definidos como os dias com precipitação inferior a 0,1 mm. Nesses dias, o rebaixamento foi atribuído à soma da evapotranspiração e da infiltração. Para atenuar ruídos de leitura e flutuações de curto prazo, aplicou-se média móvel centrada de 30 dias às séries de perda observada e de evapotranspiração.

4.5 Resposta do nível à precipitação

A defasagem entre a precipitação e a variação positiva do nível foi identificada por correlação cruzada, com defasagens de 0 a 15 dias, de modo a abranger desde a resposta imediata até o efeito tardio do escoamento superficial e subsuperficial na bacia de contribuição. Para cada defasagem, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (Equação 3) (XIAO *et al.*, 2024).

$$r_{lag} = \frac{\sum_i \left(P_{i-lag} - \bar{P}\right)\left(\Delta L_i - \overline{\Delta L}\right)}{\sqrt{\sum_i \left(P_{i-lag} - \bar{P}\right)^2 \sum_i \left(\Delta L_i - \overline{\Delta L}\right)^2}} \tag{3}$$

Na defasagem de maior r, ajustou-se uma regressão linear simples entre a variação do nível e a precipitação (Equação 4), em que β_0 é o intercepto, β_1 é a taxa de ganho de nível por milímetro de chuva e ε é o erro. A significância foi avaliada pelo valor de p, com nível de 5%, e o ajuste pelo coeficiente de determinação (R^2).

$$\Delta L_{i+lag} = \beta_0 + \beta_1 P_i + \varepsilon_i \tag{4}$$

Como as séries diárias são autocorrelacionadas, o número efetivo de observações independentes é menor que o número de dias, o que tende a inflar a significância aparente das associações (ZHANG *et al.*, 2026). Os valores de p foram, portanto, interpretados com cautela.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Perdas em dias secos e demanda atmosférica

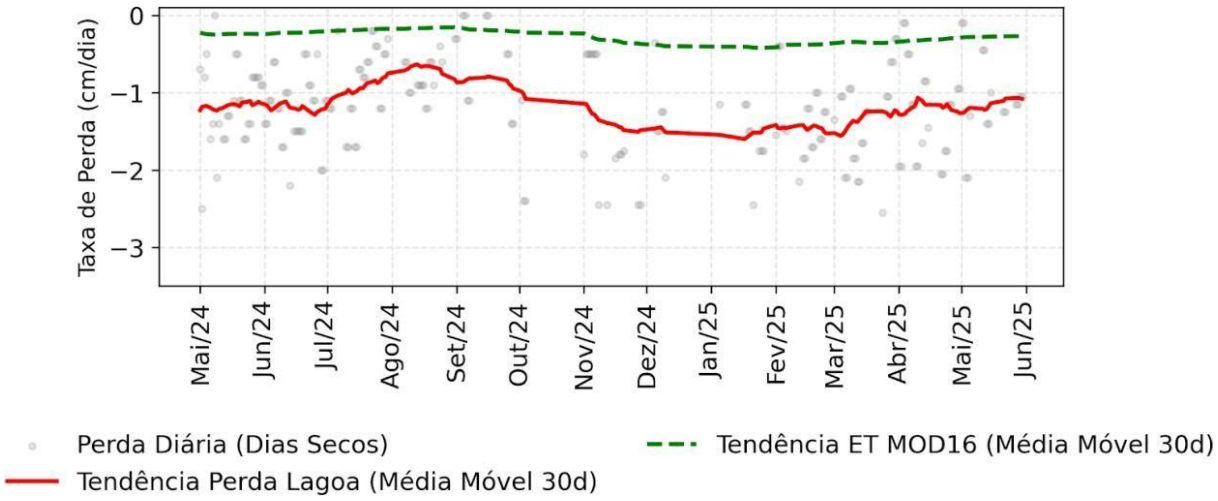
Nos dias sem chuva, a perda média de nível foi de 1,17 cm/dia, enquanto a evapotranspiração real média estimada pelo MOD16 foi de 0,27 cm/dia, com variação de 0,2 a 0,4 cm/dia ao longo do ano (Tabela 1; Figura 5). A perda observada foi cerca de quatro vezes a demanda atmosférica estimada, e a diferença, de aproximadamente 0,9 cm/dia, correspondeu a 76% da perda em dias secos.

Tabela 1 – Perda média de nível em dias secos e evapotranspiração estimada, maio de 2024 a maio de 2025

Componente	cm/dia	mm/dia
Perda observada em dias secos	1,17	11,7
Evapotranspiração real (MOD16A2)	0,27	2,7
Perda não explicada pela evapotranspiração	0,90	9,0
Participação da perda não explicada	76%	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.
Nota: dados de campo e do produto MOD16A2.

Figura 5 – Tendência da perda de nível em dias secos e da evapotranspiração do MOD16, de maio de 2024 a maio de 2025 (médias móveis de 30 dias)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.
Nota: dados de campo e do produto MOD16A2.

Esse desequilíbrio é compatível com perdas por percolação no leito ou no barramento. Embora todo reservatório apresente alguma perda por percolação, perdas que dominam o balanço sugerem rotas preferenciais de fluxo e justificam investigar a integridade do fundo e do maciço (FELL *et al.*, 2003; WINTER *et al.*, 1998).

A magnitude dessa diferença depende da estimativa da evaporação. O MOD16 representa a evapotranspiração da superfície terrestre, e não a evaporação de água livre, que modelos hidrológicos tratam como componente próprio (SHADMEHRI TOOSI *et al.*, 2025). Mesmo que a evaporação da lâmina fosse o dobro da média do MOD16 (5,4 mm/dia), a perda em dias secos ainda superaria a perda atmosférica em cerca de 6,3 mm/dia, aproximadamente 54% da perda. A conclusão de que a demanda climática não explica o rebaixamento tende, assim, a se manter, mas a fração atribuída à infiltração é sensível a essa escolha.

A perda em dias secos não foi constante ao longo do ano. Os maiores valores ocorreram entre dezembro de 2024 e fevereiro de 2025, período chuvoso, apesar da estabilidade da evapotranspiração (Figura 5). Uma explicação compatível com a Lei de Darcy é o aumento da carga hidráulica: a elevação do nível após as chuvas aumenta o gradiente entre a lagoa e o lençol, e a vazão percolada cresce com esse gradiente. A recarga no período chuvoso também altera a inclinação do lençol no entorno, o que pode deslocar os trechos do leito que perdem água (WINTER *et al.*, 1998). Esse comportamento é coerente com a dependência da troca entre corpos d'água e aquíferos em relação ao gradiente hidráulico (DUNG *et al.*, 2026) e com a variação sazonal dessa troca (LIU *et al.*, 2020b). A descarga pelo extravasor nos períodos de nível alto, contudo, também seria contabilizada como perda e não pode ser descartada sem o registro dessa saída.

5.2 Balanço ao longo do ano

A comparação entre o nível observado e o nível esperado pelo balanço climático mostra rebaixamento contínuo de maio a outubro de 2024, recuperação com as chuvas de novembro de 2024 a janeiro de 2025 e novo rebaixamento a partir de fevereiro de 2025 (Figura 6). No período seco, o nível observado caiu mais que o esperado, o que reforça a existência de perdas além da evapotranspiração. No período chuvoso, a elevação observada superou a esperada, o que indica aporte da bacia de contribuição não representado na Equação 1.

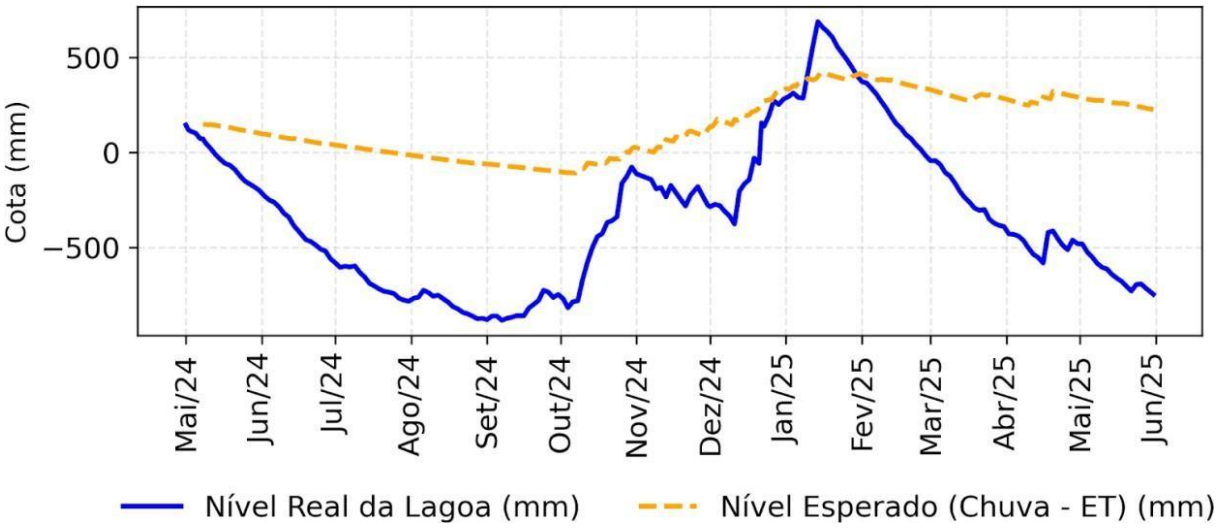
Ao longo da série, o déficit não explicado pelo clima foi de 6,03 mm/dia, o que corresponde a cerca de 2.200 mm em um ano. Mesmo com a incerteza da estimativa de evaporação da lâmina livre, que requer métodos próprios para lagos rasos e pequenos reservatórios (MCMAHON *et al.*, 2013), a análise de sensibilidade da seção anterior indica que a evaporação dificilmente explica um déficit dessa magnitude, que tende a ter outra origem.

A série diária de perda (Figura 7) mostra que o rebaixamento ocorreu durante todo o período, com taxas que oscilaram em torno de 1 cm/dia e picos próximos de 3 cm/dia.

5.3 Resposta do nível à precipitação

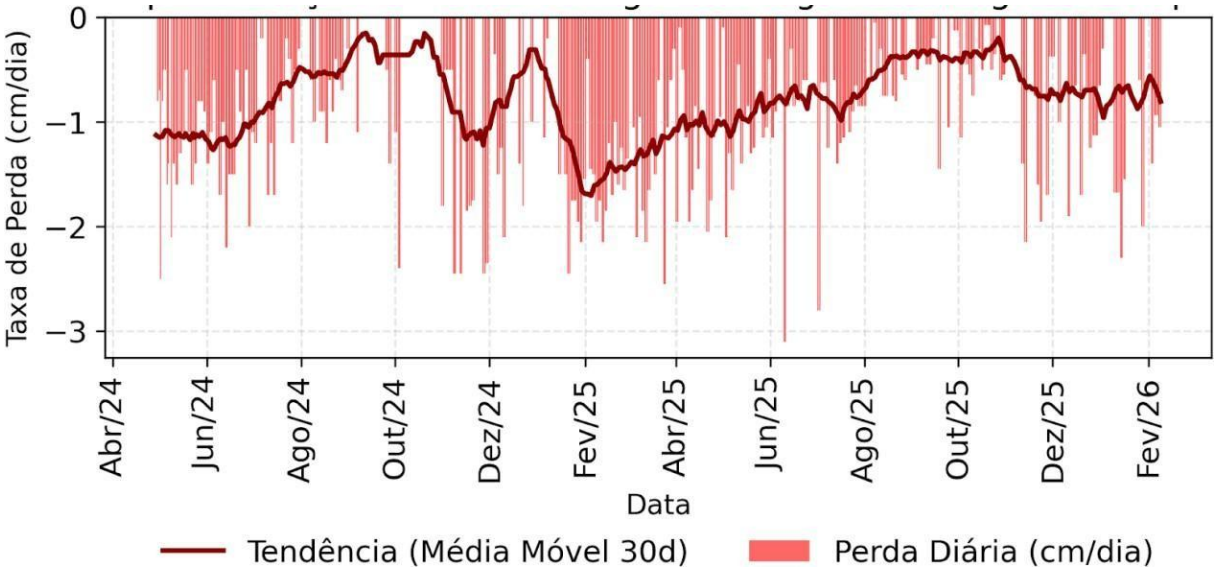
A correlação cruzada indicou associação máxima com defasagem de um dia ($r = 0{,}29$), seguida da defasagem de dois dias ($r = 0{,}27$) (Figura 8). A resposta concentrada em um a dois

Figura 6 – Nível observado e nível esperado pelo balanço climático ($P - ET$) da lagoa, de maio de 2024 a maio de 2025



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.
Nota: dados de campo, CHIRPS e MOD16A2.

Figura 7 – Perda diária de nível da lagoa ao longo do tempo e tendência (média móvel de 30 dias)

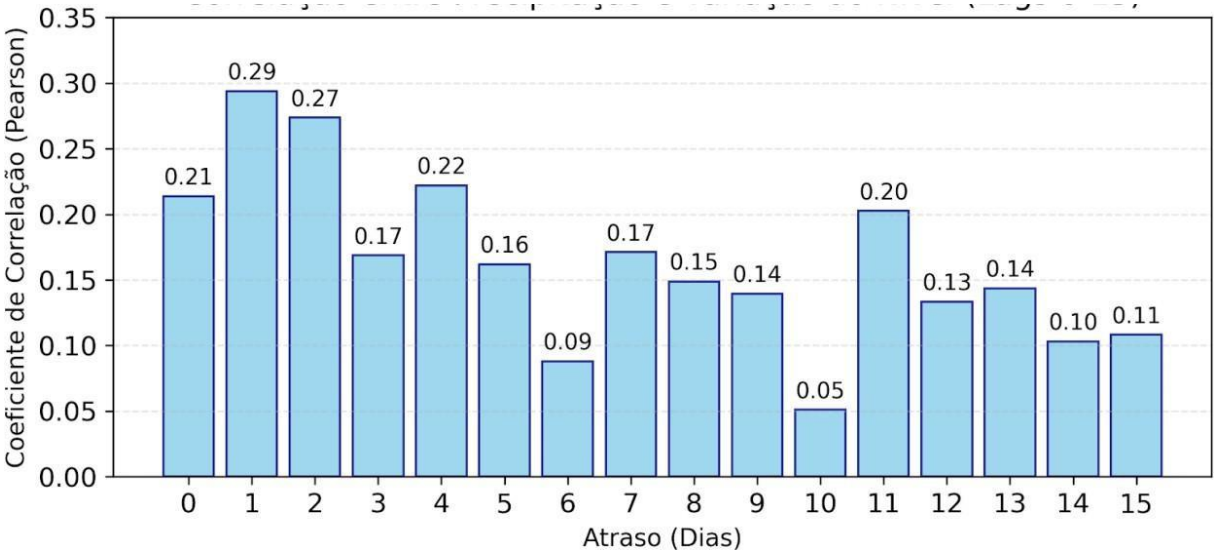


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.
Nota: dados de campo.

dias é compatível com o tempo necessário para que o escoamento das encostas alcance o espelho d'água, o que sugere que a lagoa depende do aporte lateral da bacia de contribuição, e não apenas da chuva direta. Em lagos, o aporte da bacia somado à chuva sobre a superfície é o termo que compensa as perdas (WANG *et al.*, 2023).

O valor de r é baixo, e sua significância deve ser lida com cautela, pois a autocorrelação das séries diárias e o preenchimento de dias sem leitura reduzem o número efetivo de observações independentes (ZHANG *et al.*, 2026). A atenuação da resposta é compatível com perdas contínuas

Figura 8 – Correlação entre a precipitação e a variação do nível da lagoa para defasagens de 0 a 15 dias



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.
Nota: dados de campo e CHIRPS.

por infiltração que se sobrepõem ao sinal da chuva, mas também pode refletir a resolução do CHIRPS, de cerca de 5,5 km, que não representa chuvas localizadas sobre a lagoa.

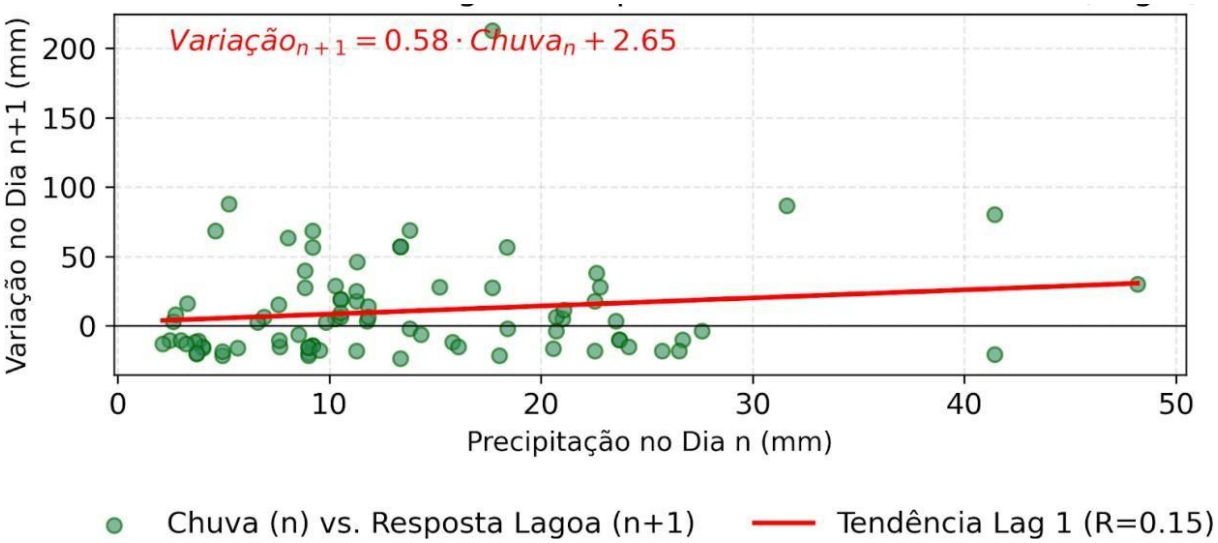
A regressão para a defasagem de um dia resultou em $\Delta L_{n+1} = 0{,}58\,P_n + 2{,}65$ (Figura 9). O coeficiente angular indica que cada 10 mm de chuva produziram, em média, 5,8 mm de elevação do nível no dia seguinte. Como a chuva direta sobre o espelho d'água eleva o nível na proporção de 1:1, e o escoamento das margens deveria acrescentar ganho, um coeficiente inferior a 1 é compatível com a perda de parte do aporte por infiltração no fundo e nas margens (WINTER *et al.*, 1998).

A interpretação desse coeficiente requer cautela. A Figura 9 indica correlação de 0,15 na amostra de dias com chuva, o que corresponde a cerca de 2% da variância explicada. O intercepto positivo (2,65 mm) não representa a variação em dias sem chuva, que é negativa em média, e resulta da extrapolação da reta ajustada a dias com chuva. A dispersão dos pontos indica resposta pouco uniforme: em chuvas acima de 30 mm, o aporte tende a superar momentaneamente a perda por percolação, o que é coerente com a maior geração de escoamento quando a umidade antecedente da bacia é alta (LIU *et al.*, 2020a); em chuvas moderadas, a infiltração contínua tende a neutralizar quase todo o ganho.

5.4 Implicações e limitações

O conjunto dos resultados é compatível com um balanço cronicamente deficitário, dominado por perdas subsuperficiais. A manutenção de perdas dessa magnitude pode indicar rotas preferenciais de fluxo e justifica acompanhamento técnico do barramento, dado o risco potencial de erosão interna, cujo desenvolvimento pode ser rápido em barragens de terra com

Figura 9 – Variação do nível da lagoa no dia seguinte em função da precipitação diária (defasagem de um dia)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.
Nota: dados de campo e CHIRPS.

controle deficiente da percolação (FELL *et al.*, 2003; FOSTER; FELL; SPANNAGLE, 2000).

As principais limitações do estudo são: (i) o uso da evapotranspiração do MOD16 como aproximação da evaporação de água livre; (ii) a ausência de medição das vazões de entrada e de extravasamento; (iii) o preenchimento de dias sem leitura, que afeta as análises diárias; (iv) a resolução do CHIRPS em relação ao tamanho da lagoa; e (v) a ausência de informações sobre a área, a profundidade e a geometria do reservatório, necessárias para converter lâminas em volumes. Essas limitações não alteram a constatação de que a perda em dias secos supera a demanda atmosférica estimada, mas afetam a fração atribuída à infiltração.

6 CONCLUSÃO

No período de maio de 2024 a maio de 2025, a lagoa do IFMG, *Campus* São João Evangelista, perdeu em média 1,17 cm/dia nos dias sem chuva, cerca de quatro vezes a evapotranspiração estimada pelo MOD16 (0,27 cm/dia), e o déficit não explicado pelo clima foi de 6,03 mm/dia, cerca de 2.200 mm em um ano. A resposta do nível à chuva concentrou-se no dia seguinte ao evento, e o ganho de 0,58 mm de nível por milímetro de chuva, inferior à relação de 1:1 esperada para a chuva direta, é compatível com a perda de parte do aporte por infiltração.

Esses resultados sustentam a hipótese de que o rebaixamento não tem origem principalmente climática e está associado a perdas por infiltração no leito e nas margens. A fração atribuída à infiltração depende, porém, da estimativa de evaporação da lâmina livre e de saídas não medidas, como a descarga por extravasor.

Recomenda-se: (i) manter o monitoramento do nível com leituras regulares e registro do horário; (ii) medir ou estimar a evaporação de água livre, por tanque Classe A ou por dados de estação meteorológica; (iii) registrar as vazões de entrada e de extravasamento; (iv) realizar investigação geotécnica do leito e do barramento para verificar a existência de rotas preferenciais de fluxo e o risco de erosão interna; e (v) definir, a partir desses resultados, as medidas de recuperação e de impermeabilização do leito.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507. Acesso em: 11 nov. 2026.

DUNG, T. T. *et al.* A coupled MIKE SHE–MIKE 11 framework for simulating surface–groundwater connectivity and water quality to support sustainable water management in the Cau River Basin. **Sustainability**, v. 18, n. 14, p. 7089, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su18147089. Acesso em: 11 nov. 2026.

FELL, R. *et al.* Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 4, p. 307–314, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307). Acesso em: 11 nov. 2026.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 5, p. 1000–1024, 2000. Disponível em: https://doi.org/10.1139/t00-030. Acesso em: 11 nov. 2026.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 150066, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66. Acesso em: 11 nov. 2026.

KOCI, J. *et al.* Effect of reduced grazing pressure on sediment and nutrient yields in savanna rangeland streams draining to the Great Barrier Reef. **Journal of Hydrology**, v. 582, p. 124520, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124520. Acesso em: 11 nov. 2026.

LIN, Y. *et al.* Effects of water level changes on the hydrological connectivity and water quality of a lake-type wetland. **Frontiers in Environmental Science**, v. 13, p. 1531893, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1531893. Acesso em: 11 nov. 2026.

LIU, W. *et al.* Dominant factors controlling runoff coefficients in karst watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125486, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125486. Acesso em: 11 nov. 2026.

LIU, X. *et al.* Satellite image-based investigation of the seasonal variations in the hydrological connectivity of a large floodplain (Poyang Lake, China). **Journal of Hydrology**, v. 585, p. 124810, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124810. Acesso em: 11 nov. 2026.

MCMAHON, T. A. *et al.* Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 1331–1363, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.5194/hess-17-1331-2013. Acesso em: 11 nov. 2026.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019. Acesso em: 11 nov. 2026.

PLATA BEDMAR, A.; ARAGUÁS ARAGUÁS, L. **Detection and prevention of leaks from dams**. Lisse: A. A. Balkema, 2002. 419 p.

SAUER, V. B.; TURNIPSEED, D. P. **Stage measurement at gaging stations**. Reston: U.S. Geological Survey, 2010. 45 p. (Techniques and Methods, book 3, chap. A7). Disponível em: https://doi.org/10.3133/tm3A7. Acesso em: 11 nov. 2026.

SHADMEHRI TOOSI, A. *et al.* Land use-land cover and hydrological modeling: a review. **WIREs Water**, v. 12, n. 2, p. e70013, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1002/wat2.70013. Acesso em: 11 nov. 2026.

SUN, C. *et al.* New modeling framework for describing the pollutant transport and removal of ditch-pond system in an agricultural catchment. **Water Resources Research**, v. 57, n. 12, p. e2021WR031077, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2021wr031077. Acesso em: 11 nov. 2026.

WANG, L. *et al.* Lake evaporation and its effects on basin evapotranspiration and lake water storage on the inner Tibetan Plateau. **Water Resources Research**, v. 59, n. 10, p. e2022WR034030, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2022WR034030. Acesso em: 11 nov. 2026.

WINTER, T. C. *et al.* **Ground water and surface water: a single resource**. Denver: U.S. Geological Survey, 1998. (Circular 1139). Disponível em: https://pubs.usgs.gov/publication/cir1139. Acesso em: 11 nov. 2026.

XIAO, H. *et al.* Subsurface hydrological connectivity controls nitrate export flux in a hilly catchment. **Water Research**, v. 253, p. 121308, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121308. Acesso em: 11 nov. 2026.

XIE, M.; CHUI, T. F. M. A tracer-based framework incorporating stormwater infrastructure for evaluating hydrological connectivity in urban watersheds. **Hydrological Processes**, v. 39, n. 11, p. e70312, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1002/hyp.70312. Acesso em: 11 nov. 2026.

ZHANG, R. *et al.* Long-term dynamics of surface-water structural connectivity in a highly regulated plain river network of the Yangtze River Delta: associations with climate variability and land-use change. **Hydrology**, v. 13, n. 10, p. 273, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.3390/hydrology13100273. Acesso em: 11 nov. 2026.