

Estimativa do Tempo de Viagem em Cursos d'Água via Otimização do Coeficiente de Determinação (R^2) de Hidrogramas.

Breno Guerreiro da Motta¹, Camila Dalla Porta Mattiuzi² & Artur José Soares Matos³

Resumo: O tempo de propagação do escoamento em cursos d'água é um parâmetro crítico para a operação assertiva de sistemas de alerta de cheias. Tradicionalmente, esse cálculo fundamenta-se simplesmente na análise de picos de hidrogramas isolados, o que impõe limitações devido à subjetividade na seleção de eventos e à necessidade de análises manuais. Este trabalho propõe uma metodologia automatizada para a determinação do tempo de propagação por meio da otimização do coeficiente de determinação (R^2) em séries temporais contínuas. Utilizando *scripts* em *python*, foram analisados dados das estações fluviométricas São Romão (43200000) e São Francisco (44200000), localizadas no Rio São Francisco. Aplicou-se um filtro para seleção de vazões superiores a 3000 m³/s, focando a análise em eventos de cheia de magnitude relevante para o sistema de alerta. O algoritmo realizou deslocamentos temporais iterativos, identificando um tempo de propagação ótimo de 18 horas, enquanto a análise de picos de um hidrograma resultou em um tempo entre 14 e 15 horas. A abordagem demonstrou ser uma alternativa robusta e ágil para o tratamento de dados hidrométricos, superando as incertezas dos métodos tradicionais e permitindo a calibração precisa de modelos de propagação de forma automatizada.

Abstract: Travel time in watercourses is a critical parameter for the accurate operation of flood warning systems. Traditionally, this calculation is based on the analysis of isolated hydrograph peaks, which presents limitations such as subjectivity in event selection and the requirement for manual analysis. This work proposes an automated methodology for determining propagation time by optimizing the coefficient of determination (R^2) in continuous time series. Using python scripts, data from the São Romão (43200000) and São Francisco (44200000) fluviometric stations on the São Francisco River were analyzed. The data were filtered using a threshold of 3,000 m³/s, focusing the analysis on flood events of significant magnitude for the warning system. The algorithm performed iterative time shifts, identifying an optimal travel time of 18 hours, whereas hydrograph peak analysis yielded a time between 14 and 15 hours. The approach proved to be a robust and efficient alternative for hydrometric data processing, overcoming the uncertainties of traditional methods and enabling the precise, automated calibration of propagation models.

Palavras-Chave: Propagação de vazões; Tempo de propagação; Coeficiente de determinação; Hidrologia estatística; Sistemas de Alerta.

Keywords: Flow routing; Propagation time; Coefficient of determination; Statistical hydrology; Warning systems.

INTRODUÇÃO

Em sistemas de alerta de cheias que utilizam correlações entre postos fluviométricos para modelagem, faz-se necessário conhecer o tempo de propagação do evento entre os locais das estações,

1) Serviço Geológico do Brasil (SGB) – breno.guerreiro@sgb.gov.br

2) Serviço Geológico do Brasil (SGB) – camila.mattiuzi@sgb.gov.br

3) Serviço Geológico do Brasil (SGB) – artur.matos@sgb.gov.br

especialmente o tempo entre os picos da cheia. Este dado possibilita a elaboração de previsões assertivas tanto em magnitude da cheia quanto o momento de sua ocorrência.

Para pequenas bacias com picos muito bem definidos, caracterizados pela duração de poucos minutos ou poucas horas, o tempo de propagação pode ser obtido simplesmente obtendo-se o horário de ocorrência de cada um destes picos e calculando-se a diferença temporal entre a estação de montante e a de jusante. Entretanto, para estações localizadas em bacias hidrográficas maiores, esta metodologia pode apresentar dificuldades de aplicação, pois um evento de cheia pode permanecer com uma vazão estável por diversas horas ou até dias, dificultando a seleção precisa deste momento.

Tipicamente, conforme Chow *et al.* (1988), o tempo de propagação de uma cheia em um canal é a soma de dois componentes: tempo de redistribuição e tempo de translação. O primeiro é causado pelo efeito do armazenamento em um trecho fluvial, que atua redistribuindo o hidrograma de saída em relação ao de entrada, causando um achatamento do pico de cheia e aumento da base. O segundo é causado pela distância percorrida, deslocando o centroide do hidrograma.

Assim, o tempo de propagação é calculado como sendo a diferença entre o centro de massa de um hidrograma da estação de montante e de jusante, conforme equações (1) e (2). Nota-se, entretanto, que em situações reais de operação de sistemas de alerta, o pico do hidrograma de jusante é superior ao pico do hidrograma de montante, conforme exemplificado na Figura 1, devido às contribuições difusas e concentradas. Este método exige a seleção de um único hidrograma bem definido, o que adiciona uma etapa manual ao trabalho com os dados e limita a análise a um, ou poucos, eventos de cheia.

$$t_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \cdot t_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

$$\Delta t_{CM} = t_{CM \text{ Jusante}} - t_{CM \text{ Montante}} \quad (2)$$

Em que: t_{CM} : tempo do centro de massa (h); Q_i : vazão no instante i (m^3/s); t_i : tempo decorrido no instante i (h); Δt_{CM} : diferença entre os tempos dos centros de massa (h).

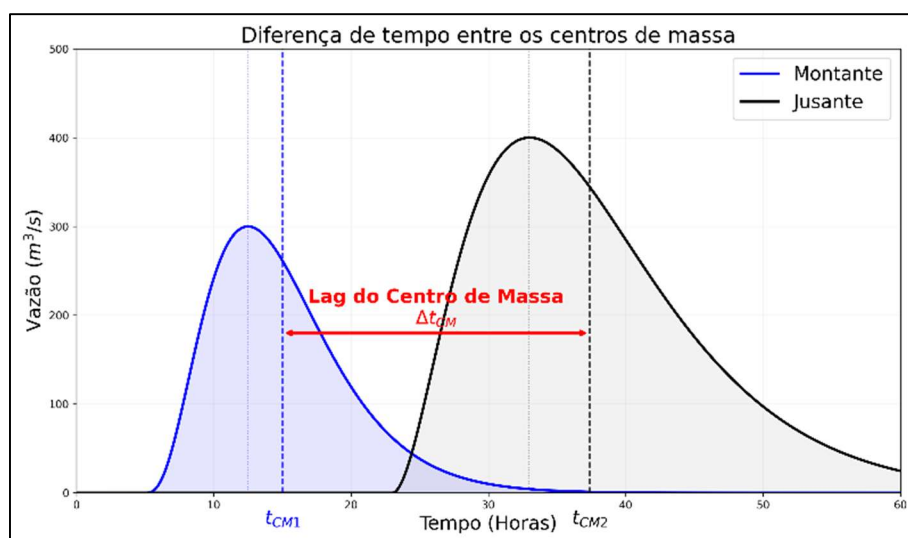


Figura 1 – Exemplo de cálculo do tempo de propagação pelo método do centro de massa.

Este trabalho propõe a utilização de uma correlação vazão $\times$ vazão entre as estações, por meio do cálculo do coeficiente de determinação (R^2) após o deslocamento temporal do hidrograma de montante. Este método permite a determinação do tempo de propagação de forma automatizada utilizando-se a série completa, sem a necessidade da escolha manual de eventos, com maior assertividade nos momentos de pico. Abordagens análogas, baseadas em correlação cruzada entre estações fluviométricas, têm sido empregadas com sucesso para a estimativa do tempo de viagem do escoamento em grandes rios como, por exemplo, em Huang *et al.* (2026), em que se avaliou os hidrogramas afluentes ao barramento de Três Gargantas, na China. A correta caracterização desse parâmetro é apontada como elemento central para a antecedência das previsões em sistemas de alerta de cheias (WMO, 2011).

MÉTODOS

A Figura 2 ilustra o procedimento proposto, por meio de dados gerados de forma sintética. Na parte superior do gráfico são apresentados os dados gerados, com as linhas cheias representando os dados utilizados e os pontilhados os dados filtrados, considerando apenas vazões acima de um limiar de interesse para o sistema de alerta. Na sequência apresenta-se o hidrograma deslocado, na coluna da esquerda, e a relação vazão $\times$ vazão, na coluna da direita, com sua respectiva linha de tendência e coeficiente de determinação. Nota-se que, a medida em que os hidrogramas se alinham, as relações vazão $\times$ vazão tendem a se aproximar de uma reta, maximizando o R^2 . Posteriormente, após o ponto ótimo, o coeficiente de determinação volta a reduzir e os dados voltam a apresentar maior dispersão.

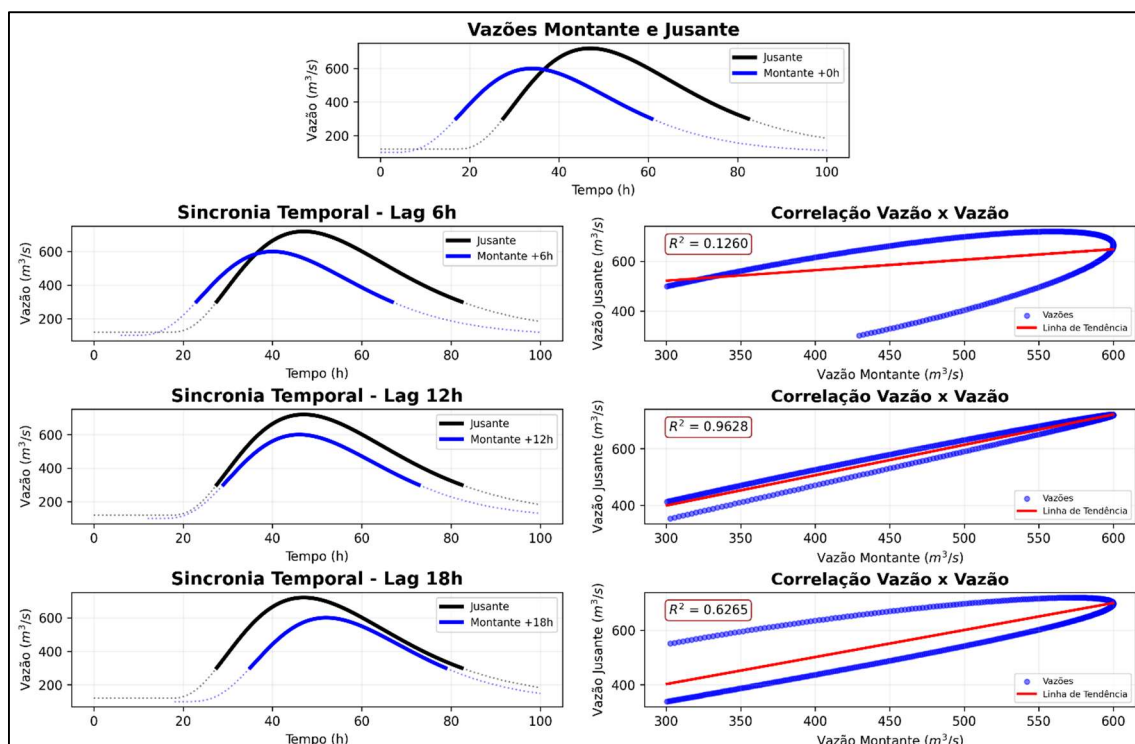


Figura 2 – Exemplo de cálculo do tempo de propagação pelo coeficiente de determinação R^2 .

Foram seleccionadas as estações São Romão (código ANA 43200000 e área de drenagem de 154.100 km²), a montante, e São Francisco (44200000 e 184.000 km²), a jusante, ambas localizadas

na calha principal do rio São Francisco, dado seu interesse para o Sistema de Alerta (SAH) do São Francisco, operado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). Os dados foram obtidos diretamente pela API (*Application Programming Interface*) da ANA através de rotinas em *python*. A análise dos dados indicou que ambas possuem registradores automáticos operacionais, com registro de dados em intervalos de 15 minutos, de forma mais regular, desde abril/2014 e dezembro/2014, respectivamente. Para este estudo, foram considerados apenas os dados do último evento de cheia ocorrido no ano hidrológico 2025/2026.

Aos dados obtidos, foi realizado o descarte de dados de horas fracionárias, mantendo-se somente as horas cheias, em razão da aderência à rotina operacional dos sistemas de alerta operados pelo SGB, cujas previsões e boletins são emitidos em base horária. Reconhece-se que essa discretização introduz uma incerteza de até $\pm 0,5$ h na estimativa do tempo de propagação, entretanto se mostram compatíveis com a janela de decisão dos sistemas de alerta, uma vez que os sistemas com previsões mais curtas são em torno de 8 horas para estações da bacia hidrográfica do rio Doce (OLIVEIRA, 2024) e do rio São Francisco (MOTTA, 2024).

Para a estação de São Francisco, o interesse é apenas por vazões acima de $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde à vazão associada à cota de alerta do sistema SAH São Francisco para esta localidade (SGB, 2026). Desta forma, foram selecionados quatro eventos de cheias e os demais dados abaixo deste limiar foram descartados da análise, para que vazões sem magnitude de interesse para o alerta não interfiram nos resultados.

Para efeito comparativo entre as metodologias, foi considerado apenas o evento de 27/02/2026 a 11/03/2026 para os cálculos de centro de massa e tempo de pico a pico. Para a metodologia de correlação vazão x vazão, foram utilizados todos os dados obtidos para o ano de 2026. A Figura 3 apresenta os dados disponíveis, o limite de vazão considerada e o destaque para o período selecionado para a análise de hidrogramas.

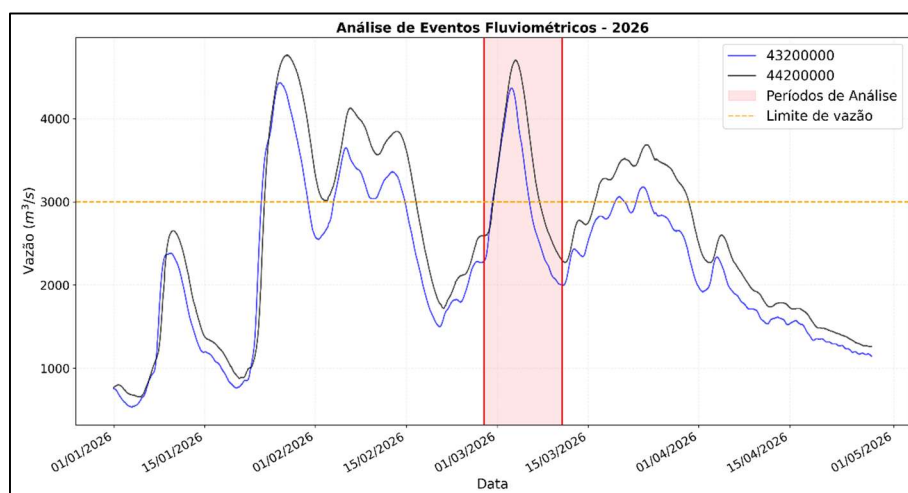


Figura 3 – Dados de 2026 das estações 43200000 e 44200000, com separação dos períodos de análise.

Assim, foram calculados os centros de massa dos hidrogramas de montante e jusante para o evento e o tempo de propagação considerado como a diferença de tempo entre os centros de massa. Para a análise de pico a pico, os dados foram analisados em *excel*, buscando-se identificar o ponto de valor máximo em cada um dos hidrogramas. O tempo de propagação foi obtido como sendo o tempo entre as duas ocorrências.

Por fim, a análise com o coeficiente de determinação foi realizada integralmente em *python*, na seguinte sequência: obtenção dos dados das estações 43200000 e 44200000 pela API da ANA; filtragem de dados maiores que 3.000 m³/s; *loop* com aplicação de *shift* para deslocamento temporal da série, entre 0h e 48h de deslocamento, com passo de 1h; análise da correlação vazão x vazão, por meio do coeficiente R² calculado pela função *linregress* da biblioteca *scipy*; armazenamento do valor máximo com seu respectivo tempo de deslocamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Método do tempo entre picos

A análise em *excel* resultou nas informações apresentadas na Tabela 1 e na Figura 4.

Tabela 1. Resultado da análise dos picos do evento.

Dado	São Romão (43200000)	São Francisco (44200000)
Pico de cheia	4363,04 m ³ /s	4701,43 m ³ /s
Período	03/03/2026 02:00 a 03/03/2026 08:00	03/03/2026 18:00 a 03/03/2026 22:00
Tempo com vazão constante	6 horas	4 horas

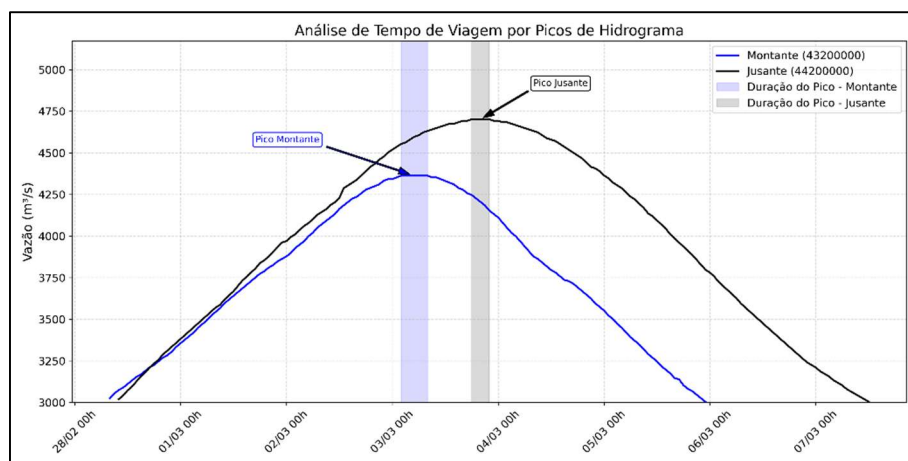


Figura 4 – Picos dos hidrogramas de montante e jusante, com destaque para suas durações.

Nota-se que há dificuldade na obtenção de forma precisa do momento de pico em eventos de grandes bacias, com a vazão máxima se mantendo constante por seis horas na estação de montante e quatro horas na estação de jusante. Considerando o momento em que ambas as estações atingem a vazão de pico, o tempo de propagação seria de 14 horas. Considerando a média temporal de ambos os picos, o tempo de propagação seria de 15 horas.

Método do centro de massa

Aplicando-se os somatórios apresentados anteriormente na equação (1) para ambas as estações, tem-se os resultados apresentados na Tabela 2 e na Figura 5. Desta forma, aplicando-se a equação (2) tem-se um tempo de propagação de 18 horas e 50 minutos.

Tabela 2. Resultado da análise dos picos do evento.

Dado	São Romão (43200000)	São Francisco (44200000)
Duração do hidrograma	28/02/2026 08:00 a 05/03/2026 23:00	28/02/2026 10:00 a 07/03/2026 12:00
Centro de massa	03/03/2026 03:33	03/03/2026 22:23

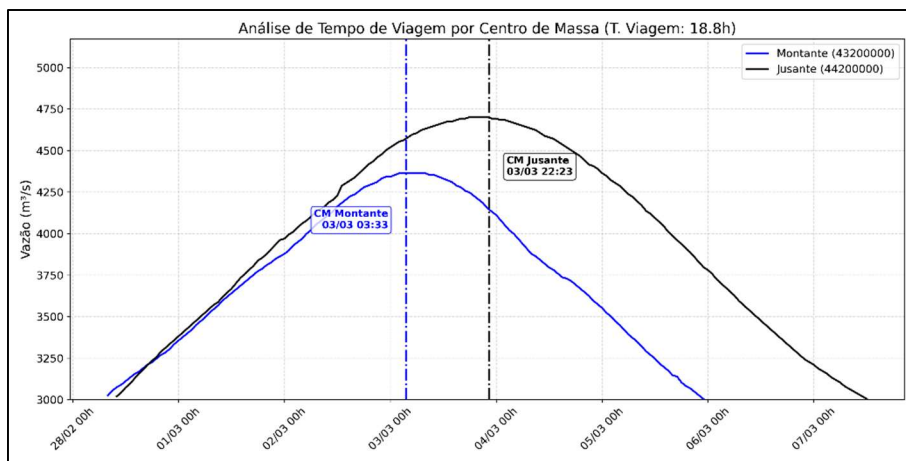


Figura 5 – Centros de massa dos hidrogramas de montante e jusante.

Método do coeficiente de determinação

A Figura 6 mostra os dados restantes após o filtro de $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ nos dados de vazão. Na Figura 7 são apresentadas algumas correlações vazão x vazão simuladas, como forma de evidenciar a tendência dos dados de agrupar em uma linha à medida que o tempo de propagação atinge um ponto ótimo. Por fim, a Figura 8 apresenta o gráfico com as séries deslocadas, em que é possível, por meio de análise visual, observar o bom alinhamento entre os picos dos eventos para o tempo de 18 horas.

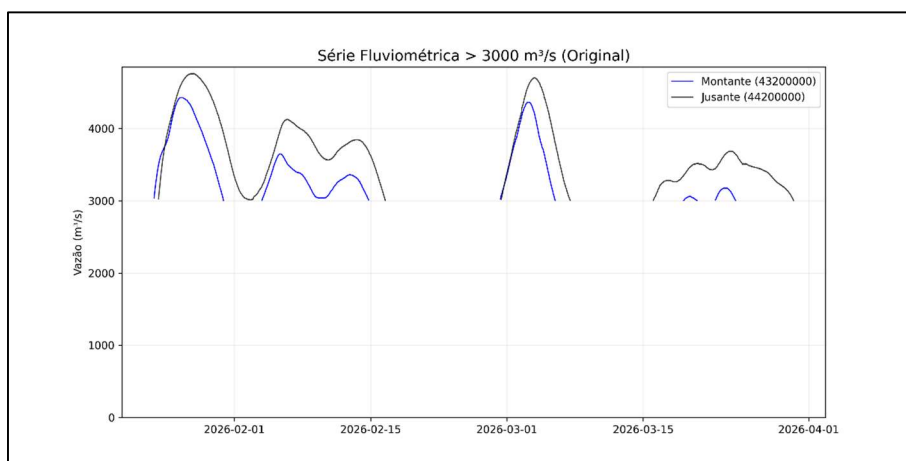


Figura 6 – Dados de 2026 das estações 43200000 e 44200000 acima de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.

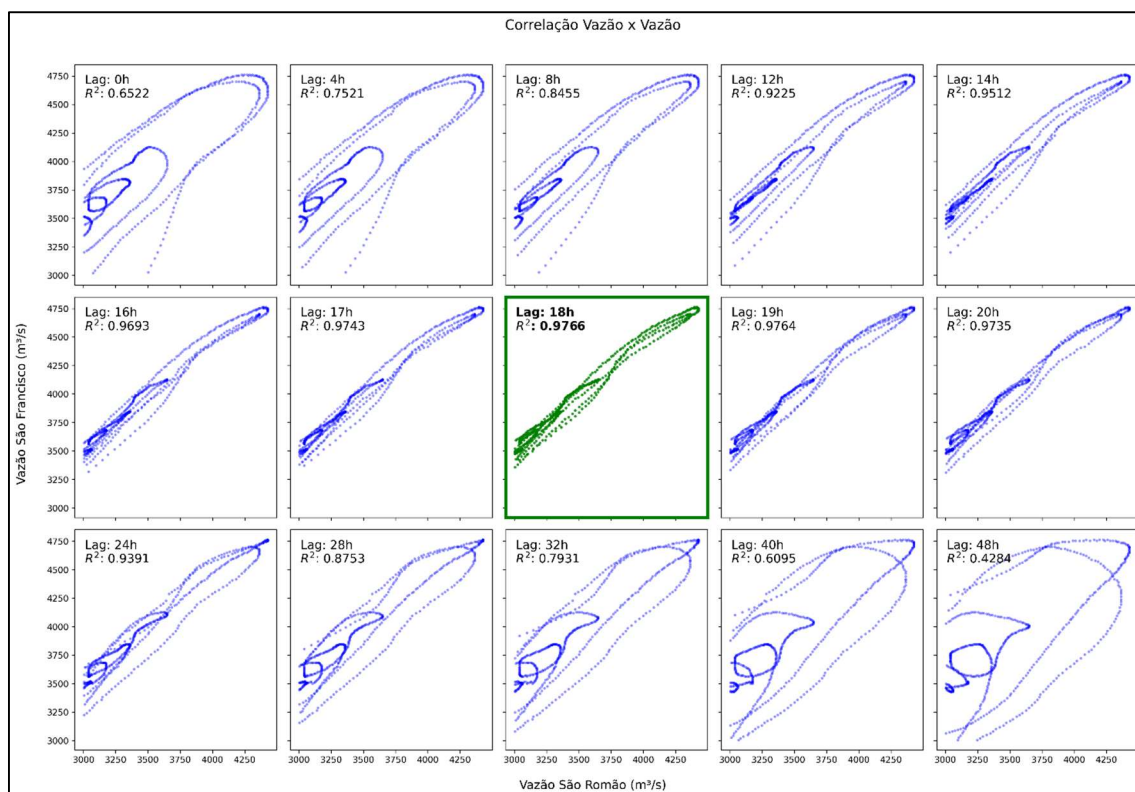


Figura 7 – Correlação vazão x vazão e R^2 de acordo com o deslocamento temporal.

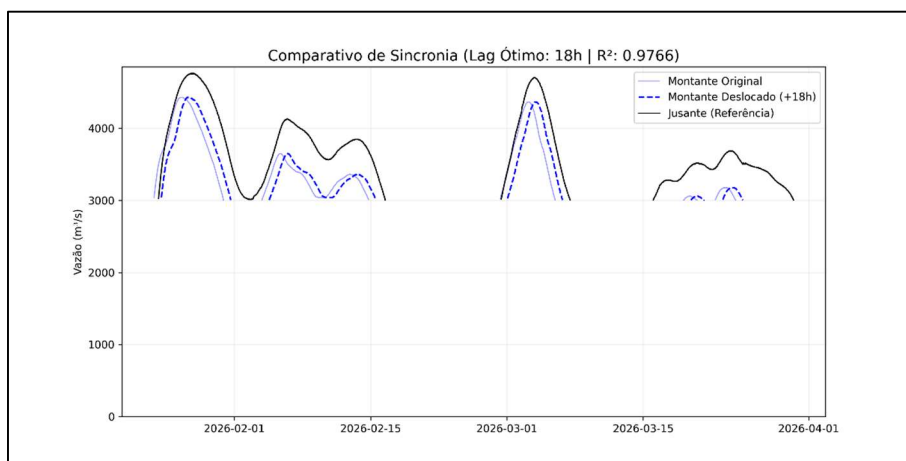


Figura 8 – Dados de 2026 das estações 43200000 e 4420000, com separação dos períodos de análise.

Cabe destacar que a curva de R^2 em função do deslocamento temporal apresentou um patamar entre 17h e 19h, com variação máxima de apenas 0,003 no coeficiente de determinação. Esse comportamento é esperado em trechos com forte achatamento do hidrograma, tornando a função objetivo pouco sensível no entorno do ótimo. Dessa forma, o resultado deve ser interpretado como um intervalo ótimo de 17h a 19h, com valor central de 18h, e não como uma estimativa pontual exata.

A divergência sistemática entre o método de picos (14h a 15h) e os demais métodos (cerca de 18 h) decorre possivelmente da dificuldade observada no método de tempo entre picos, uma vez que é fortemente sensível aos patamares de vazão constante observados (6h em São Romão e 4h em São Francisco), dificultando a distinção de seu ponto exato. Já o centro de massa e a maximização do R^2 ponderam o hidrograma completo, trazendo resultados consistentes (18h50 e 18h, respectivamente). Para a operação do SAH São Francisco, foi recomendada a adoção do valor de 18h, por ser derivado da série com quatro eventos independentes e não apenas o instante do pico ou o centro de massa de um único hidrograma.

CONCLUSÃO

A análise comparativa entre o método tradicional para determinação do tempo de propagação de escoamentos em cursos d'água (método do centro de massa) e a metodologia alternativa proposta, com utilização do coeficiente de determinação, revelou semelhanças significativas quando empregada entre as estações de São Romão e São Francisco. Os resultados confirmaram que a aplicação da metodologia alternativa pode ser realizada de forma simplificada, por meio de rotinas computacionais, sem a necessidade de seleção manual de hidrogramas de eventos, utilizando-se nesse caso a série completa.

Quanto ao método da análise de picos, os resultados foram ligeiramente distintos do valor ótimo encontrado pelo coeficiente de determinação. Essa variação pode ser atribuída à natureza do hidrograma analisado, que apresentou um patamar de vazão estável por um período prolongado, dificultando a identificação precisa do instante exato do pico.

Conclui-se, portanto, que a metodologia de maximização do coeficiente de determinação é uma alternativa ágil e precisa para a calibração de modelos de propagação de vazões e para o aprimoramento de sistemas de alerta de cheias, tendo em vista sua facilidade de automação e o rápido processamento de grandes volumes de dados históricos.

Como limitações explícitas do estudo, destacam-se: (i) a utilização apenas dos dados de 2026, recomendando-se a ampliação para a série completa, avaliando-se, ainda, possíveis tendências de longo prazo; (ii) a seleção do único limiar, vinculado à cota de alerta da estação de jusante, uma vez que diferentes vazões podem trazer diferentes tempos de propagação, cabendo a avaliação da aplicabilidade desta variação na operação dos sistemas de alerta e (iii) a aplicação a um único trecho fluvial, sendo recomendável a validação em outros trechos monitorados pelos Sistemas de Alerta na bacia do rio São Francisco.

Em termos operacionais, considerando a variabilidade interanual, o valor calculado por qualquer um dos métodos não deve ser tratado como fixo, sendo recomendado sua reavaliação ao final de cada período chuvoso (WMO, 2011).

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento ao Serviço Geológico do Brasil (SGB) pelo apoio institucional, pelo suporte técnico fundamental e pelo constante incentivo ao desenvolvimento de metodologias que aprimoram a previsão de cheias em todo o território nacional no âmbito dos Sistemas de Alerta.

À Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), pela disponibilização pública dos dados hidrométricos por meio do portal Hidroweb e pela manutenção da API de consulta de

dados, ferramenta que possibilitou a extração automatizada das séries históricas e a implementação da rotina computacional apresentada.

REFERÊNCIAS

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

HUANG, H. et al. Spatiotemporal Characteristics and Identification of Typical Hydrological Patterns of Interval Inflow in the Three Gorges Reservoir Basin, China. **Hydrology**, v. 13, n. 2, p. 75, 2026.

MOTTA, B. G. da. **Operação do sistema de alerta hidrológico da bacia do rio São Francisco 2024**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil (SGB), 2024. Relatório técnico. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/25228>. Acesso em: 11 jun. 2026.

OLIVEIRA, B. L. F. de. **Operação do sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Doce 2024**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil (SGB), 2024. Relatório técnico. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/25126>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Bacia do Rio São Francisco**. SACE - Sistema de Alerta de Eventos Críticos. Disponível em: <https://sace.sgb.gov.br/saofrancisco/>. Acesso em: 4 maio 2026.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Manual on Flood Forecasting and Warning**. WMO-No. 1072. Geneva: WMO, 2011.