REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

OCORRÊNCIA HISTÓRICA DE COTAS DE ALERTA E INUNDAÇÃO EM GOVERNADOR VALADARES (MG) E ASSOCIAÇÃO COM SÉRIES FLUVIOMÉTRICAS A MONTANTE

HISTORICAL OCCURRENCE OF ALERT AND FLOOD STAGES IN GOVERNADOR VALADARES (MG, BRAZIL) AND ASSOCIATION WITH UPSTREAM FLUVIOMETRIC SERIES

OCURRENCIA HISTÓRICA DE COTAS DE ALERTA E INUNDACIÓN EN GOVERNADOR VALADARES (MG) Y ASOCIACIÓN CON SERIES FLUVIOMÉTRICAS AGUAS ARRIBA

CAMILA BERMOND BORGES RUEZZENE
Doutoranda em Ciências Ambientais, Universidade de São Paulo (USP), Brasil
E-mail: camila.ruezzene@gmail.com

MOISÉS ROCHA DOS SANTOS
Doutor em Ciências da Computação e Matemática Computacional, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC), Universidade de São Paulo (USP), Brasil
E-mail: moises0rocha@gmail.com

RENATO BILLIA DE MIRANDA
Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), Brasil
E-mail: rbm1706@gmail.com

MARIANA ABIBI DE ARAÚJO BARBOSA
Doutora em Ciências Ambientais, Universidade de São Paulo (USP), Brasil
E-mail: marianagb2@gmail.com

FREDERICO FÁBIO MAUAD
Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos pela UNICAMP, Professor Associado da EESC/USP, Brasil E-mail: mauadffm@sc.usp.br

Resumo
As inundações estão entre os desastres naturais mais recorrentes em escala global, e Governador Valadares (MG) concentra o maior número de ocorrências e o maior dano humano acumulado por inundações entre os municípios de Minas Gerais. Este estudo caracteriza estatisticamente 62 anos de série fluviométrica diária de Governador Valadares (1938–2025, anos com aproveitamento de dados ≥70%), quantificando a ocorrência de dias em cota de alerta (320–359 cm) e de inundação (≥360 cm), e avalia o grau de associação e a defasagem temporal (lag) entre essa série e seis séries de estações fluviométricas correlatas a montante, na bacia do Rio Doce. Foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk, correlação de Pearson e Spearman, correlação cruzada e causalidade de Granger. Do total de dias válidos no período chuvoso (novembro a abril), 3,70% situaram-se em cota de alerta e 3,03% em cota de inundação, com janeiro concentrando 36% dos dias de alerta e 52% dos dias de inundação de toda a série. Todas as estações correlatas apresentaram correlação forte a moderada com Governador Valadares (Spearman r entre 0,618 e 0,947), com defasagem ótima de 1 a 2 dias, fisicamente coerente com o tempo de translação da onda de cheia. Cachoeira dos Óculos, Ponte Nova, Nova Era, Naque Velho e Belo Oriente destacaram-se como as séries candidatas mais fortemente associadas, com potencial para compor variáveis explicativas em estudos futuros de previsão de cotas e sistemas de alerta precoce em Governador Valadares.
Palavras-chave: Hidrologia; previsão de cheias; Rio Doce; sistema de alerta precoce; correlação espaço-temporal.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Abstract
Floods are among the most recurrent natural disasters worldwide, and Governador Valadares (Minas Gerais, Brazil) records the highest number of flood occurrences and the largest cumulative human damage among municipalities in the state. This study statistically characterizes 62 years of daily fluviometric records for Governador Valadares (1938–2025, years with data coverage ≥70%), quantifying days at alert stage (320–359 cm) and flood stage (≥360 cm), and assesses the strength of association and time lag between this series and six correlated upstream gauging stations in the Doce River basin. Shapiro-Wilk, Pearson and Spearman correlation, cross-correlation, and Granger causality tests were applied. Of all valid days in the rainy season (November to April), 3.70% were at alert stage and 3.03% at flood stage, with January alone accounting for 36% of alert days and 52% of flood days in the full series. All correlated stations showed strong to moderate correlation with Governador Valadares (Spearman r between 0.618 and 0.947), with an optimal lag of 1 to 2 days, physically consistent with flood wave travel time. Cachoeira dos Óculos, Ponte Nova, Nova Era, Naque Velho and Belo Oriente stood out as the candidate series most strongly associated, with potential to compose explanatory variables in future stage-forecasting and early warning studies for Governador Valadares.
Keywords: Hydrology; flood forecasting; Doce River; early warning system; spatiotemporal correlation.

Resumen
Las inundaciones se encuentran entre los desastres naturales más recurrentes a escala global, y Governador Valadares (Minas Gerais, Brasil) concentra el mayor número de ocurrencias y el mayor daño humano acumulado por inundaciones entre los municipios del estado. Este estudio caracteriza estadísticamente 62 años de serie fluviométrica diaria de Governador Valadares (1938–2025, años con aprovechamiento de datos ≥70%), cuantificando los días en cota de alerta (320–359 cm) y de inundación (≥360 cm), y evalúa el grado de asociación y el desfase temporal (lag) entre esa serie y seis series de estaciones fluviométricas correlacionadas aguas arriba, en la cuenca del río Doce. Se aplicaron las pruebas de Shapiro-Wilk, correlación de Pearson y Spearman, correlación cruzada y causalidad de Granger. Del total de días válidos en la temporada lluviosa (noviembre a abril), el 3,70% se situó en cota de alerta y el 3,03% en cota de inundación, con enero concentrando el 36% de los días de alerta y el 52% de los días de inundación de toda la serie. Todas las estaciones correlacionadas presentaron correlación fuerte a moderada con Governador Valadares (Spearman r entre 0,618 y 0,947), con un desfase óptimo de 1 a 2 días, físicamente coherente con el tiempo de traslación de la onda de crecida. Cachoeira dos Óculos, Ponte Nova, Nova Era, Naque Velho y Belo Oriente se destacaron como las series candidatas más fuertemente asociadas, con potencial para componer variables explicativas en estudios futuros de previsión de niveles y sistemas de alerta temprana en Governador Valadares.
Palabras clave: Hidrología; previsión de crecidas; río Doce; sistema de alerta temprana; correlación espacio-temporal.

1. Introdução

As inundações figuram entre os desastres naturais mais recorrentes e devastadores em escala global. Entre 1995 e 2015, 43% dos desastres naturais registrados mundialmente estavam relacionados a eventos de inundação, os quais afetaram mais da metade (56%) de todas as pessoas atingidas por desastres naturais no período e foram responsáveis por cerca de um quarto (26%) das mortes associadas (UNISDR; CRED, 2015). Segundo Nguyen et al. (2015), houve tendência de aumento no número de inundações, mortes, pessoas afetadas e danos econômicos ao longo do último meio século, consolidando as inundações como o tipo de desastre natural mais frequente em nível global.

No Brasil, a resposta institucional a esse cenário incluiu a implementação, a partir de 2012, do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais – PNGRRDN (BRASIL, 2013), no âmbito da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC (BRASIL, 2012). Em Minas Gerais, o município de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Governador Valadares se destaca como o de maior número absoluto de ocorrências de inundação e maior dano humano acumulado do estado, consequência de sua localização em planície fluvial do Rio Doce associada a décadas de ocupação urbana irregular das margens do rio e de alterações antrópicas na bacia, como exploração mineral, supressão de vegetação ciliar e construção de barramentos, que intensificam a fragilidade ambiental e a vulnerabilidade do sistema fluvial (COELHO, 2006; REZENDE, 2020).

Apesar da relevância do município no cenário de risco hidrológico nacional, a caracterização estatística de longo prazo do regime de cotas de Governador Valadares, em particular a quantificação de limiares de alerta e inundação e sua relação com estações fluviométricas a montante, permanece pouco explorada na literatura. Governador Valadares é o município com o maior histórico de danos humanos por inundação em Minas Gerais, o que reforça a relevância dessa lacuna. Diante disso, este trabalho tem como objetivo suprir essa lacuna por meio da caracterização estatística de 62 anos de dados fluviométricos e da identificação de estações a montante com maior potencial preditivo para o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce.

2. Revisão da Literatura

Os desastres naturais associados a eventos hidrológicos estão entre os mais devastadores em todo o mundo, tanto pelo número de pessoas afetadas quanto pelas perdas econômicas geradas. Entre 1987 e 1997, 44% de todas as inundações ocorreram em países asiáticos, causando 228.000 mortes e danos econômicos de US$ 136 bilhões (WMO, 2011).

Nos Estados Unidos, em 2011, as inundações foram a terceira causa mais grave de mortes e custos de danos entre os perigos naturais (National Weather Service, 2012), e na Ásia, entre 1990 e 2017, cerca de 6,8 milhões de pessoas perderam a vida em decorrência de inundações e enchentes (CRED, 2020). Em 2019, as inundações representaram 49% de todos os desastres naturais registrados globalmente (CRED, 2020), e estima-se que, desde 1980, tenham respondido por cerca de 60% das perdas econômicas associadas a desastres climáticos no mundo, com eventos isolados, como a enchente do Rio Yangtze em 1998, gerando perdas da ordem de US$ 32,5 bilhões (MUNICH RE, 2025).

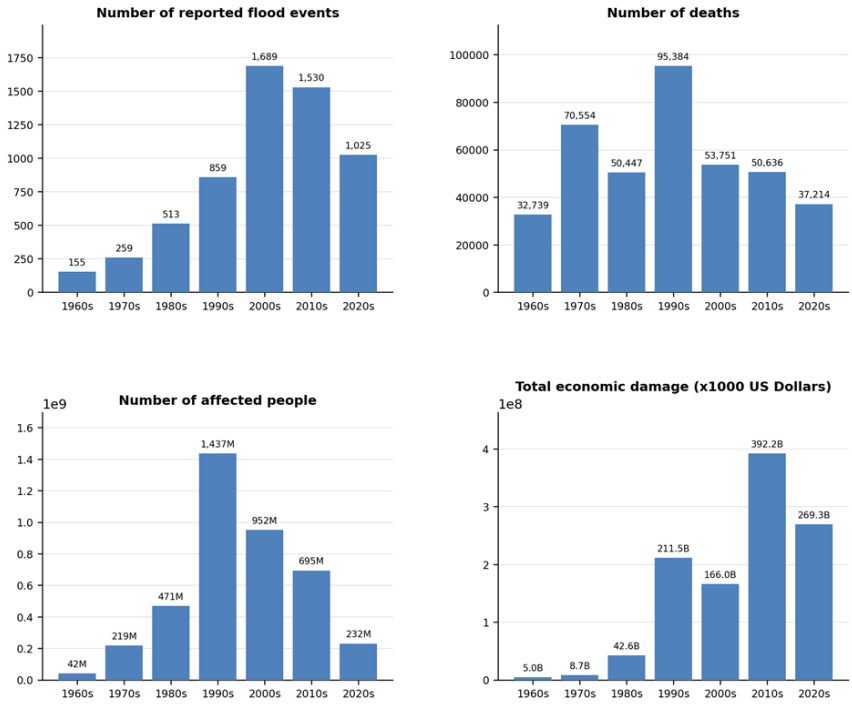
Conforme dados de inundações de 1960 a 2025 (Figura 1), observa-se crescimento expressivo no número de eventos reportados até a década de 2000 (1.689 eventos), seguido de relativa estabilização nas décadas seguintes. A década de 1990 permanece como o período de maior impacto humano, com o maior número de mortes (95.384) e de pessoas afetadas (cerca de 1,4 bilhão), enquanto os maiores danos econômicos ocorreram na década de 2010 (aproximadamente US$ 392,2 bilhões). As inundações consolidaram-se como o tipo mais comum de perigo natural entre todos os desastres (Figura 2), representando cerca de 40% de todos os eventos registrados entre 1960 e 2025, proporção que sobe para aproximadamente 44% no período de 2000 a 2025, à frente das tempestades, segundo tipo mais frequente (RAZAVI et al., 2020).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

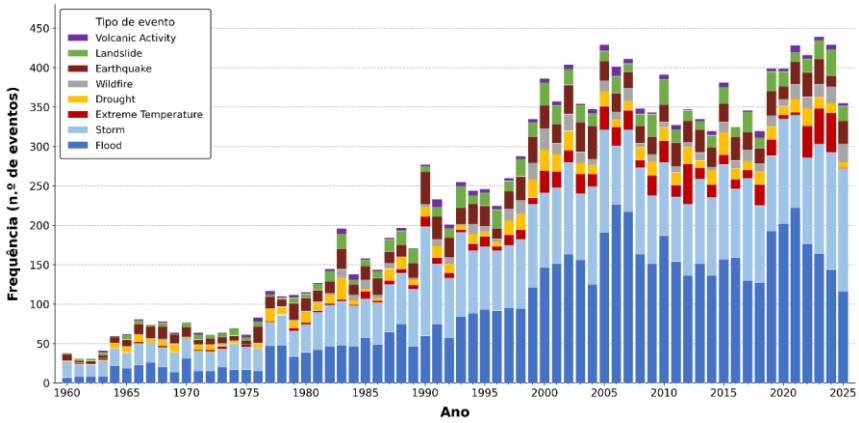
Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Figura 1. Estatísticas de inundação de 1960 a 2025 usando dados do CRED/EM-DAT.



Fonte: elaborado pela autora com base em EM-DAT, CRED/UCLouvain (2026).

Figura 2. Frequência anual de desastres naturais no mundo, por tipo de evento (1960–2025).



Fonte: elaborado pela autora com base em EM-DAT, CRED/UCLouvain (2026).

No Brasil, o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) registrou 76.191 ocorrências entre 1991 e 2025 (Sedec/MIDR; Ceped/UFSC, 2026). Os desastres hidrológicos, grupo que inclui inundações, enxurradas e alagamentos e foco central deste estudo, concentram maior dano humano absoluto nas regiões Sul (2,9 milhões de pessoas), Nordeste (2,9 milhões) e Norte (2,7 milhões), enquanto a região Sudeste concentra o maior número de registros de inundações do país (2.041

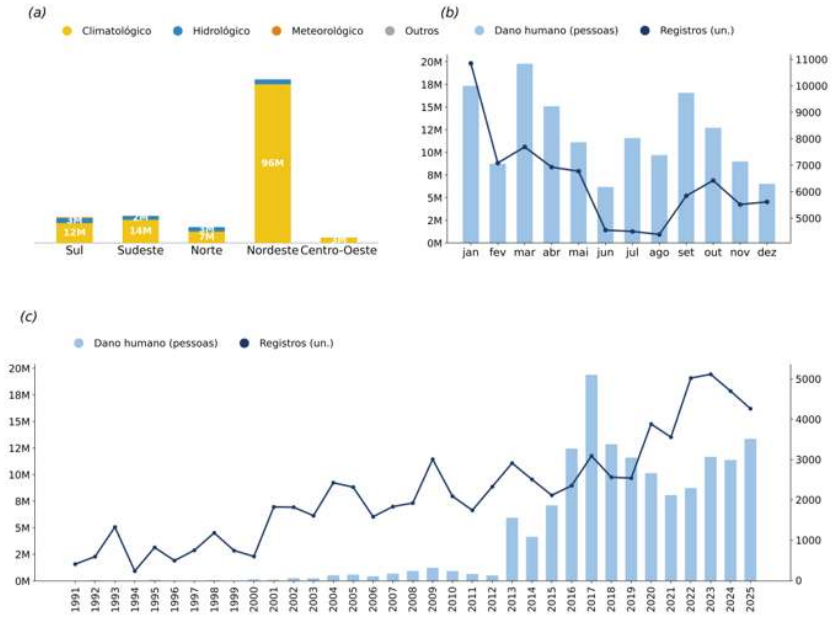
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

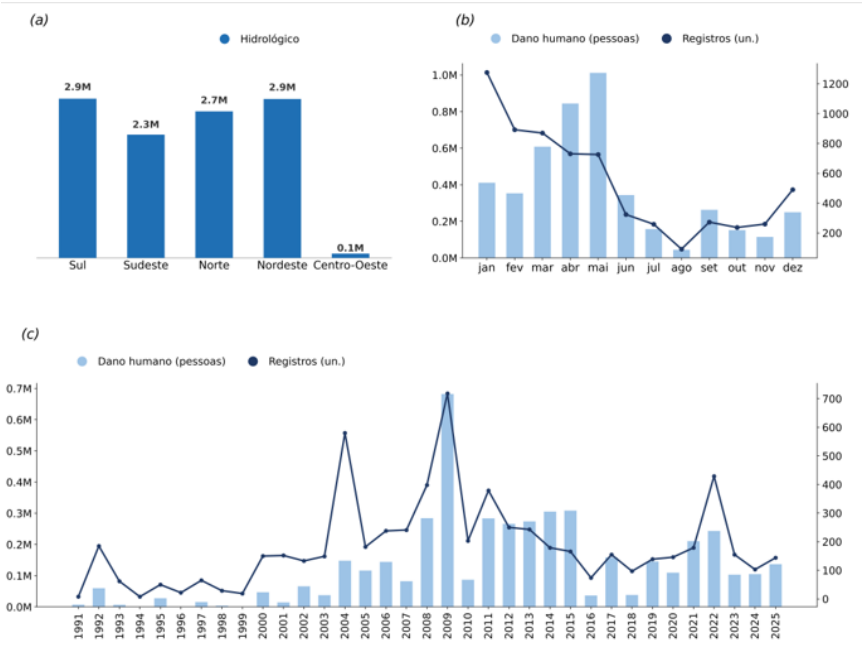
eventos) e o maior volume de danos materiais (R$ 9,17 bilhões), padrão associado à intensa urbanização e ocupação de áreas de risco (FREITAS et al., 2014).

Figura 3. Distribuição regional, sazonal e temporal dos desastres naturais no Brasil (1991–2025).



Fonte: elaborado pela autora com base no Atlas Digital de Desastres no Brasil (Sedec/MIDR; Ceped/UFSC, 2026).

Figura 4. Inundações por região, incluídas no grupo hidrológico: (a) distribuição regional, (b) distribuição mensal e (c) distribuição anual dos desastres de inundação.



Fonte: elaborado pela autora com base no Atlas Digital de Desastres no Brasil (Sedec/MIDR; Ceped/UFSC, 2026).

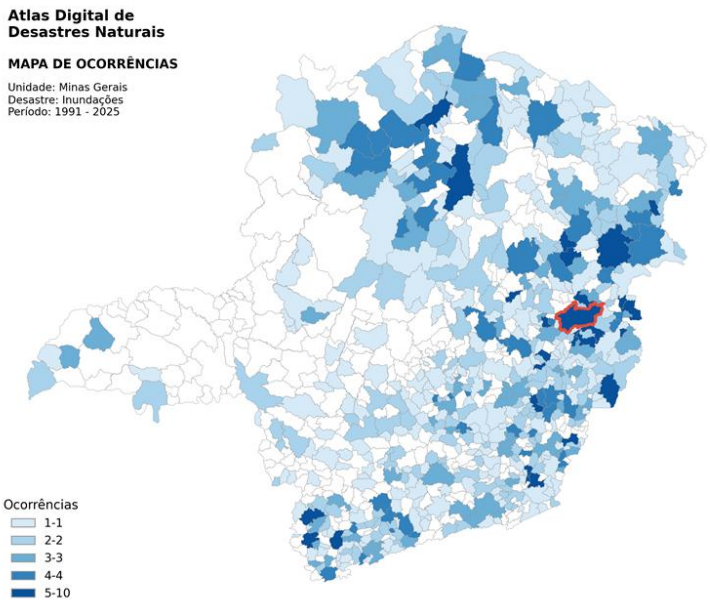
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

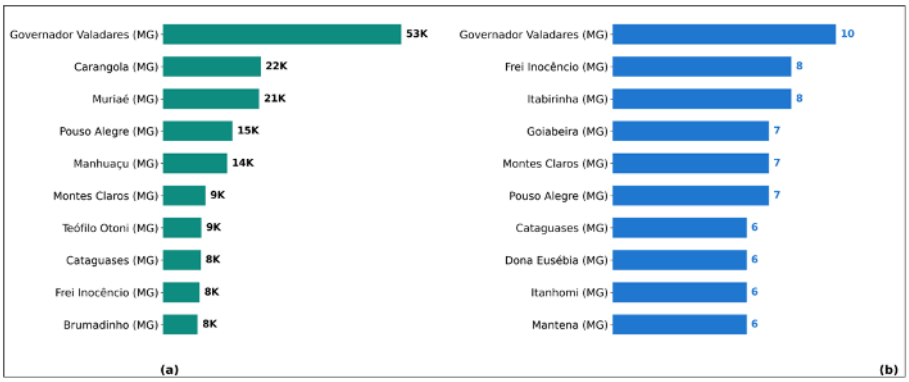
Em âmbito estadual, Minas Gerais registra média anual de R$ 230,90 milhões em danos e prejuízos decorrentes de inundações entre 1991 e 2025, e Governador Valadares concentra o maior dano humano acumulado por inundações entre os municípios mineiros (Figuras 5 e 6).

Figura 5. Mapa de ocorrências de inundações nos municípios de Minas Gerais (1991–2025), com destaque para Governador Valadares.



Fonte: elaborado pela autora com base no Atlas Digital de Desastres no Brasil (Sedec/MIDR; Ceped/UFSC, 2026) e malha municipal do IBGE.

Figura 6. Número de pessoas afetadas (a) e número de ocorrências de inundações (b) no estado de Minas Gerais.



Fonte: elaborado pela autora com base no Atlas Digital de Desastres no Brasil (Sedec/MIDR; Ceped/UFSC, 2026).

O município se desenvolveu sobre planície fluvial e se expandiu em áreas marginais do Rio Doce, característica comum ao processo de urbanização brasileiro (REZENDE, 2020). Segundo o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM, 2014), a

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

bacia do Rio Doce apresenta 304 trechos vulneráveis à inundação, em grande parte urbanizados e sem cobertura de mata ciliar; embora as inundações ocorram de forma natural na região, sua intensidade é agravada por condicionantes antrópicas, sobretudo a ocupação irregular das margens dos cursos d'água. Estudo local constatou que 11,69% da área do município apresenta suscetibilidade alta a inundação, com aumento populacional e ocupacional observado sobretudo nos bairros Nova Santa Rita, Universitário, Santos Dumont, Canaã e JK, sendo os dois últimos inseridos em zona de perigo alto de inundação, com período de retorno inferior a 10 anos (REZENDE, 2020).

Quanto ao histórico de eventos extremos, o evento de fevereiro de 1979 é amplamente reconhecido como a maior cheia da história da cidade, registrada como calamidade pública nacional: entre 5 de janeiro e 8 de fevereiro daquele ano ocorreram cerca de 35 dias de chuva praticamente ininterrupta na região, fenômeno associado ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e ao fortalecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Nesse contexto, a previsão é uma das ferramentas mais eficientes para reduzir riscos de inundação, pois modelos preditivos permitem identificar áreas propensas e fornecer informações rápidas para prevenção de danos (ZHAO et al., 2019). Diante disso, organizações em várias partes do mundo buscam metodologias para prevenir e mitigar os impactos das inundações, e a modelagem preditiva ganha destaque no meio científico, proporcionando resultados eficientes em diversas localidades (DAWSON et al., 2011).

3. Metodologia

Foram utilizadas séries de cota diária (cm) de sete estações fluviométricas da bacia do Rio Doce, incluindo Governador Valadares (estação principal) e seis estações correlatas a montante (Belo Oriente, Cachoeira dos Óculos, Mário de Carvalho, Naque Velho, Nova Era e Ponte Nova). A série de Governador Valadares abrange o período de 1938 a 2025 (65 anos com pelo menos um dia de observação registrado); ressalva-se que 2025 é um ano civil incompleto na base de dados, com registros disponíveis somente até 31 de outubro (304 dias), devendo seus totais e proporções ser interpretados com essa limitação.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

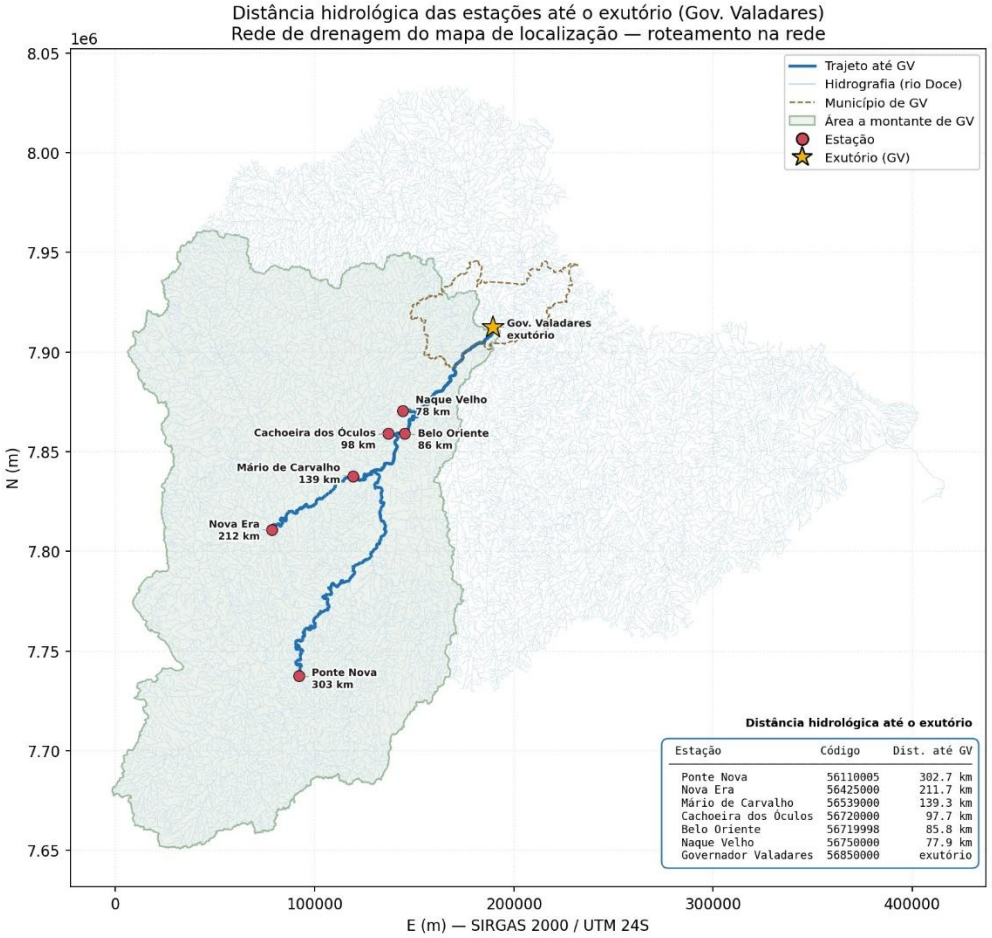


Figura 7. Mapa de localização das estações fluviométricas e distância hidrológica até o exutório (Governador Valadares).

A Tabela 1 apresenta as sete estações fluviométricas utilizadas neste estudo: Governador Valadares (estação de referência) e as seis estações correlatas a montante, com seus respectivos códigos de identificação junto à Agência Nacional de Águas (ANA), o curso d'água em que estão instaladas, o município sede, a altitude, a área de drenagem contribuinte e a distância pelo curso d'água até a estação de Governador Valadares, obtida por roteamento sobre a rede de drenagem (Figura 7). Note-se que apenas duas das seis estações correlatas (Belo Oriente e Cachoeira dos Óculos) estão instaladas no canal principal do Rio Doce; as demais monitoram afluentes distintos: Mário de Carvalho e Nova Era no rio Piracicaba, Naque Velho no rio Santo Antônio e Ponte Nova no rio Piranga, uma das duas cabeceiras formadoras do Rio Doce.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Tabela 1. Estações fluviométricas utilizadas no estudo, com localização, área de drenagem e distância até Governador Valadares.

Estação	Código ANA	Rio	Município	Altitude (m)	Área Drenagem (km²)	Distância até GV (km)
Governador Valadares	56850000	Rio Doce	Governador Valadares	150	40.500	N/A
Naque Velho	56825000	Rio Santo Antônio	Açucena	240	10.200	77.9
Belo Oriente	56719998	Rio Doce	Belo Oriente	211	24.200	85.8
Mário de Carvalho	56696000	Rio Piracicaba	Timóteo	232	5.270	139.3
Cachoeira dos Óculos (Montante)	56539000	Rio Doce	Córrego Novo	210	15.900	97.7
Ponte Nova (Jusante)	56110005	Rio Piranga	Ponte Nova	340	6.230	302.7
Nova Era	56661000	Rio Piracicaba	Nova Era	522	3.060	211.7

Fonte: elaborado pela autora a partir de dados do Cadastro de Estações Telemétricas da Agência Nacional de Águas (ANA/SGB-CPRM).

Como critério de qualidade e robustez estatística, foram excluídos da análise os anos cujo aproveitamento de dados, definido como a razão entre o número de dias com registro válido e o número total de dias do ano, foi inferior a 70%. Após a aplicação desse critério, a série de Governador Valadares analisada compreende 62 anos, com 22.416 dias de dados válidos. Observa-se um hiato de completa ausência de dados entre 1948 e 1968 (21 anos consecutivos), decorrente de descontinuidade na operação da estação fluviométrica, e não de exclusão metodológica.

O Quadro 1 detalha a situação de cada ano do intervalo civil 1938-2025 (88 anos), distinguindo anos sem nenhum registro, anos com aproveitamento inferior a 70% (excluídos) e anos incluídos na análise (aproveitamento ≥70%).

Quadro 1. Situação de aproveitamento de dados por ano, série de Governador Valadares (1938–2025).

Situação	Anos	N
Sem nenhum registro (0% de aproveitamento)	1943, 1945, 1948–1968	23
Aproveitamento < 70% (excluídos)	1944 (9,8%), 1946 (3,0%), 1969 (52,1%)	3
Aproveitamento ≥ 70% (incluídos na análise)	1938–1942, 1947, 1970–2025 (exceto os anos acima)	62

Os limiares de cota de alerta e de inundação utilizados neste estudo correspondem aos valores operacionais adotados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) para a estação de Governador Valadares (código ANA 56850000) no âmbito do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Doce (SAH Doce), conforme divulgado nos boletins de monitoramento hidrológico publicados pela Superintendência Regional de Belo Horizonte (SUREG/BH) do SGB.

A associação entre Governador Valadares e cada estação correlata foi avaliada por meio de: (i) teste de normalidade de Shapiro-Wilk, complementado por histogramas e gráficos quantil-quantil, para orientar a escolha do coeficiente de correlação; (ii) coeficientes de correlação de Pearson e de Spearman, com intervalos de confiança de 95% obtidos por bootstrap em blocos móveis (tamanho de bloco de 30 dias, 500 reamostragens), de modo a respeitar a dependência temporal das séries;

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

(iii) análise de correlação cruzada (cross-correlation function), testando defasagens de -20 a +20 dias.

(iv) teste de causalidade de Granger, aplicado às séries diferenciadas (primeira diferença) e testado em ambas as direções (estação a montante → Governador Valadares e Governador Valadares → estação a montante), com seleção do número de defasagens por critério de informação de Akaike (AIC, testando de 1 a 5 defasagens) e diagnóstico de autocorrelação residual pelo teste de Ljung-Box; (v) teste de raiz unitária de Dickey-Fuller aumentado (ADF), para verificar a estacionariedade das séries em nível e em primeira diferença; (vi) avaliação da homogeneidade das séries de máximos anuais por meio do teste de Pettitt (detecção não paramétrica de ponto de mudança) e do teste de Mann-Whitney em amostra dividida ao meio, este último seguindo o mesmo procedimento adotado pelo SGB/CPRM (2022) para a própria estação de Governador Valadares, com base em Naghettini e Pinto (2007).

(vii) cálculo do tamanho amostral efetivo, considerando a autocorrelação serial lag-1 de cada série; (viii) reanálise das correlações após remoção do ciclo sazonal (anomalias em relação à média climatológica de cada dia do ano) e após pré-branqueamento das séries (resíduos de modelos autorregressivos de ordem selecionada de modo a eliminar autocorrelação residual, pelo teste de Ljung-Box), a fim de isolar a associação não atribuível à sazonalidade compartilhada ou à autocorrelação própria de cada série; e (ix) análise de sensibilidade restrita ao período comum a todas as sete séries (2003-2023), para verificar a estabilidade das correlações frente a diferenças de cobertura temporal entre as séries.

3.1 Fórmulas Estatísticas Utilizadas

Esta seção sintetiza, na ordem em que os respectivos testes são descritos acima, as formulações estatísticas empregadas neste estudo.

1. Aproveitamento de dados

Critério de inclusão/exclusão de anos na série, calculado como a razão entre os dias com registro válido e o total de dias do ano civil (ou bissexto).

$$Aproveitamento_{(\%)} = \frac{n_{dias\ válidos}}{n_{dias\ do\ ano}} \times 100$$

2. Coeficiente de correlação de Pearson (r)

Mede a associação linear entre a estação correlata e Governador Valadares.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}$$

x, y: séries pareadas (estação e GV); x̄, ȳ: médias; n: número de pares observados.

3. Coeficiente de correlação de Spearman (ρ)

Medida não paramétrica baseada em postos, adotada como coeficiente primário de associação por não exigir normalidade.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)}$$

d_i: diferença entre os postos (ranks) de x_i e y_i; n: número de observações.

4. Teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W)
Aplicado a cada série para orientar a escolha do coeficiente de correlação apropriado.

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

$x_{(i)}$: valores ordenados da amostra; a_i: coeficientes tabelados do teste; $\bar{x}$: média amostral.

5. Correlação cruzada (cross-correlation function)
Testa defasagens (lags) de -20 a +20 dias entre cada estação correlata e Governador Valadares, para identificar o lag de correlação máxima.

$$r_{xy}(k) = \frac{\sum_t (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_t (x_t - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_t (y_{t+k} - \bar{y})^2}}$$

k: defasagem (lag) em dias; x, y: séries temporais da estação e de GV.

Adota-se neste estudo a seguinte convenção formal para a interpretação do lag k: um lag negativo (k < 0) indica que a observação da estação a montante no dia t é comparada à observação de Governador Valadares no dia t + |k|; por exemplo, lag = −1 significa que a cota da estação a montante no dia t corresponde à cota de Governador Valadares no dia t+1, consistente com a propagação a jusante da onda de cheia. Lag = 0 indica comparação contemporânea (mesmo dia); lag positivo (k > 0) indicaria, inversamente, que a observação de Governador Valadares antecede a da estação a montante.

6. Causalidade de Granger (modelo VAR)
Testa se os valores passados de x (estação a montante) melhoram a previsão de y (GV) além do que já é explicado pelos valores passados do próprio y, e vice-versa, na direção inversa.

$$y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{p} \alpha_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \beta_i x_{t-i} + \varepsilon_t$$

p: número de defasagens (selecionado por AIC); α, β: coeficientes estimados; ε_t: resíduo.

7. Teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF)
Testa a presença de raiz unitária (não estacionariedade) nas séries em nível e em primeira diferença.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p} \delta_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t$$

Δy_t: primeira diferença da série; γ: coeficiente cuja significância indica estacionariedade; t: tendência determinística.

8. Tamanho amostral efetivo (N efetivo)
Corrige o N nominal pela autocorrelação lag-1 da série, refletindo a real quantidade de informação independente disponível (fórmula de Bartlett).

$$N_{ef} = N \cdot \frac{1 - r_1}{1 + r_1}$$

N: tamanho amostral nominal; r_1: autocorrelação de defasagem 1 dia.

9. Anomalia (dessazonalização)
Remove o ciclo sazonal comum, subtraindo de cada observação a média climatológica do respectivo dia do ano (doy).

$$x'_t = x_t - \bar{x}_{doy(t)}$$

x_t: valor observado no dia t; $\bar{x}$doy(t): média histórica para aquele dia do ano.

10. Pré-branqueamento (resíduos de modelo autorregressivo)
Isola a autocorrelação própria de cada série, ajustando um modelo AR de ordem p e retendo os resíduos para a nova correlação cruzada.

$$\hat{\varepsilon}_t = x_t - \left(\phi_0 + \sum_{i=1}^{p} \phi_i x_{t-i} \right)$$

φ: coeficientes autorregressivos estimados; p selecionado por AIC/Ljung-Box (p=10 neste estudo); $\hat{\varepsilon_t}$: resíduo (série pré-branqueada).

11. Teste de Pettitt (homogeneidade / ponto de mudança)
Detecta, de forma não paramétrica, um possível ponto de mudança (quebra) na série de máximos anuais.

$$U_t = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{N} sgn(x_i - x_j) \; ; \quad K_N = \max_{1 \le t < N} |U_t|$$

sgn: função sinal; N: número de anos da série; K_N: estatística de teste (ponto de maior evidência de mudança).

12. Teste de Mann-Whitney (homogeneidade)

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Compara as duas metades da série (divisão temporal) quanto à igualdade de distribuição, replicando o procedimento do SGB/CPRM (2022) para a estação de Governador Valadares.

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1$$

n_1, n_2: tamanhos das duas metades da série; R_1: soma dos postos do primeiro grupo.

13. Intervalo de confiança por bootstrap em blocos móveis

Intervalo de confiança de 95% do coeficiente de correlação, obtido pelos percentis 2,5% e 97,5% da distribuição de 500 reamostragens em blocos de 30 dias.

$$IC_{95\%} = \left[\hat{r}^*_{(0,025)} \ , \ \hat{r}^*_{(0,975)}\right]$$

$\hat{r}^*$: coeficiente de correlação recalculado em cada reamostragem bootstrap.

4. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta o aproveitamento anual de dados, a cota média, máxima e mínima, e o número de dias em cota de alerta e de inundação para os 62 anos da série filtrada de Governador Valadares.

Tabela 2. Aproveitamento de dados por ano: Governador Valadares (anos com aproveitamento ≥ 70%).

Ano	Dias Reg.	Aproveit. (%)	Cota Média (cm)	Cota Máx. (cm)	Cota Mín. (cm)	Dias Alerta	Dias Inund.
1938	351	96,2%	256,0	354	227	9	0
1939	365	100,0%	249,1	590	218	8	9
1940	366	100,0%	248,5	413	205	13	14
1941	365	100,0%	250,7	336	218	9	0
1942	365	100,0%	261,4	453	217	19	21
1947	273	74,8%	282,8	428	246	19	23
1970	365	100,0%	181,8	363	129	5	1
1971	365	100,0%	155,7	390	103	8	3
1972	366	100,0%	172,0	366	126	2	1
1973	365	100,0%	191,4	403	134	2	4
1974	365	100,0%	177,0	321	124	1	0
1975	365	100,0%	173,2	315	120	0	0
1976	366	100,0%	162,4	344	112	1	0
1977	365	100,0%	175,7	413	121	8	4
1978	365	100,0%	181,0	382	124	6	1
1979	335	91,8%	218,9	498	155	17	9
1980	366	100,0%	199,8	397	138	11	5
1981	365	100,0%	190,1	407	124	6	2
1982	365	100,0%	209,2	445	139	16	5
1983	365	100,0%	224,6	371	154	17	8
1984	366	100,0%	179,3	364	134	1	2
1985	365	100,0%	226,0	540	153	20	23
1986	365	100,0%	172,5	394	120	6	4
1987	365	100,0%	166,2	337	112	5	0
1988	335	91,5%	167,7	354	112	4	0
1989	365	100,0%	159,0	396	111	4	3
1990	365	100,0%	139,3	248	112	0	0
1991	365	100,0%	185,0	405	126	7	5
1992	366	100,0%	213,7	457	143	18	22
1993	365	100,0%	175,3	366	126	2	2
1994	365	100,0%	175,7	346	117	3	0

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Ano	Dias Reg.	Aproveit. (%)	Cota Média (cm)	Cota Máx. (cm)	Cota Mín. (cm)	Dias Alerta	Dias Inund.
1995	365	100,0%	159,2	408	109	1	4
1996	366	100,0%	165,7	420	118	6	6
1997	365	100,0%	196,3	641	134	6	11
1998	365	100,0%	171,9	356	117	3	0
1999	365	100,0%	159,3	308	109	0	0
2000	366	100,0%	179,6	352	118	6	0
2001	365	100,0%	148,8	348	106	2	0
2002	365	100,0%	185,6	400	118	10	6
2003	365	100,0%	177,9	479	125	6	11
2004	366	100,0%	202,8	402	135	11	8
2005	365	100,0%	214,0	517	136	11	8
2006	365	100,0%	182,0	397	127	5	8
2007	365	100,0%	184,8	358	127	15	0
2008	366	100,0%	172,1	487	112	4	6
2009	365	100,0%	210,6	471	140	13	10
2010	365	100,0%	171,2	462	116	2	3
2011	365	100,0%	192,1	476	120	12	17
2012	366	100,0%	189,6	556	126	2	14
2013	365	100,0%	167,8	438	112	5	4
2014	365	100,0%	136,6	269	93	0	0
2015	365	100,0%	121,3	229	80	0	0
2016	366	100,0%	136,4	447	81	3	5
2017	365	100,0%	114,5	315	62	0	0
2018	365	100,0%	154,2	406	98	2	2
2019	365	100,0%	134,1	296	81	0	0
2020	366	100,0%	182,7	569	104	6	10
2021	365	100,0%	165,9	360	95	4	1
2022	365	100,0%	200,4	594	120	13	18
2023	365	100,0%	174,7	507	115	6	10
2024	365	99,7%	159,9	351	92	3	0
2025*	304	83,3%	149,8	369	97	4	1

*Fonte: elaborado pela autora a partir de dados de cota diária da estação de Governador Valadares (ANA/HidroWeb). *Ano de 2025 incompleto: dados disponíveis somente até 31/10/2025 (304 dias).*

Adotou-se como critério mínimo de seleção a disponibilidade de 70% dos registros no período analisado, visando assegurar a representatividade temporal das séries e reduzir a perda de informações associada às lacunas. Esse limiar é compatível com abordagens empregadas em estudos hidrológicos e climatológicos, nos quais a disponibilidade temporal dos registros é considerada fundamental para a caracterização da variabilidade e dos extremos hidrológicos, variando, conforme o estudo, entre 70% (SUN et al., 2021) e critérios mais restritivos, como o de Fang et al. (2022), que exige completude de aproximadamente 90% dos anos. Assim, o critério de 70% foi estabelecido como limite mínimo de completude temporal, buscando preservar as características dos eventos hidrológicos e evitar a exclusão excessiva de séries potencialmente relevantes.

Em atenção à possibilidade de que um ano atinja o critério de aproveitamento de 70% no total, mas apresente cobertura insuficiente especificamente nos meses chuvosos, o aproveitamento de novembro a abril foi verificado individualmente para cada um dos 62 anos incluídos na análise. Dos 62 anos, apenas 1947 (66,3%) apresentou aproveitamento novembro a abril abaixo de 70% apesar de atender ao critério anual, caso isolado que não compromete a robustez geral da série.

Segundo relatório técnico do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM, 2022), ao longo de todo o histórico da estação de Governador Valadares não houve alteração da cota do zero da régua, o que assegura a comparabilidade interna da série ao longo do tempo. O mesmo relatório documenta um único deslocamento físico da seção de réguas, ocorrido em 13 de agosto de 1972, quando o lance foi transferido 66 m rio

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

abaixo (129 m a jusante da ponte São Raimundo) devido a vandalismo recorrente, sem alteração do datum.

Foram utilizados os limiares operacionais de cota de alerta (320 a 359 cm) e cota de inundação (≥360 cm) para Governador Valadares. A fim de evitar que a delimitação do período de análise decorresse circularmente da própria distribuição de eventos críticos, apresenta-se inicialmente a distribuição completa ao longo dos 12 meses do ano civil: dos 742 dias em cota de alerta ou de inundação identificados na série de 62 anos de Governador Valadares, a totalidade concentrou-se entre novembro e abril, não havendo registro de nenhum dia em condição crítica nos seis meses restantes.

Essa concentração é consistente com a climatologia regional independente: as Normais Climatológicas do Brasil (INMET, 1991-2020) caracterizam a bacia do Rio Doce, em Minas Gerais, por regime pluviométrico fortemente sazonal, com estação chuvosa concentrada entre outubro/novembro e março/abril (associada à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul, ZCAS) e estação seca bem definida no restante do ano.

O recorte novembro-abril adotado neste estudo para as análises de frequência sazonal, portanto, não é inferido a posteriori a partir dos próprios dados de cota, mas corresponde a uma delimitação climatologicamente estabelecida por fonte externa e independente, à qual a distribuição observada de eventos críticos se mostrou integralmente aderente.

Esses limiares guardam relação direta com impactos urbanos já documentados na literatura local: Rezende (2020) identifica os bairros Nova Santa Rita, Universitário, Santos Dumont, Canaã e JK como as áreas de maior expansão populacional em zona de alta suscetibilidade a inundação no município, com Canaã e JK situados em zona de perigo alto e período de retorno inferior a 10 anos.

Dos 11.040 dias válidos observados no período chuvoso ao longo dos 62 anos da série filtrada, 408 dias (3,70%) situaram-se na faixa de cota de alerta e 334 dias (3,03%) atingiram ou superaram a cota de inundação, totalizando 6,72% dos dias do período chuvoso em situação crítica. A cota máxima histórica registrada foi de 641 cm, e a cota mínima, de 62 cm. Os anos de 1947 e 1985 registraram o maior número de dias em cota de inundação (23 dias cada), seguidos por 1992 (22 dias) e 1942 (21 dias). Em contrapartida, sete anos da série filtrada (1975, 1990, 1999, 2014, 2015, 2017 e 2019) não registraram nenhum dia em cota de alerta ou de inundação.

Em atenção à distinção entre dias de excedência e episódios independentes, os 742 dias em cota de alerta ou de inundação foram agrupados por contiguidade calendária (dias consecutivos pertencem ao mesmo episódio), resultando em 158 episódios independentes ao longo dos 62 anos analisados. A duração mediana foi de 3 dias (média de 4,7 dias), e 41 episódios (25,9%) corresponderam a excedências isoladas de um único dia. O episódio mais prolongado ocorreu entre 10 de janeiro e 5 de fevereiro de 1985 (27 dias consecutivos, cota máxima de 540 cm), seguido pelos eventos de janeiro de 1942 (24 dias) e de janeiro-fevereiro de 1992 (23 dias). O intervalo mediano entre o fim de um episódio e o início do seguinte foi de 22 dias.

Janeiro concentra isoladamente 36% dos dias de alerta (147 de 408) e 52% dos dias de inundação (175 de 334) de toda a série, resultando em 16,87% dos dias do mês em condição crítica, mais que o dobro de qualquer outro mês do período

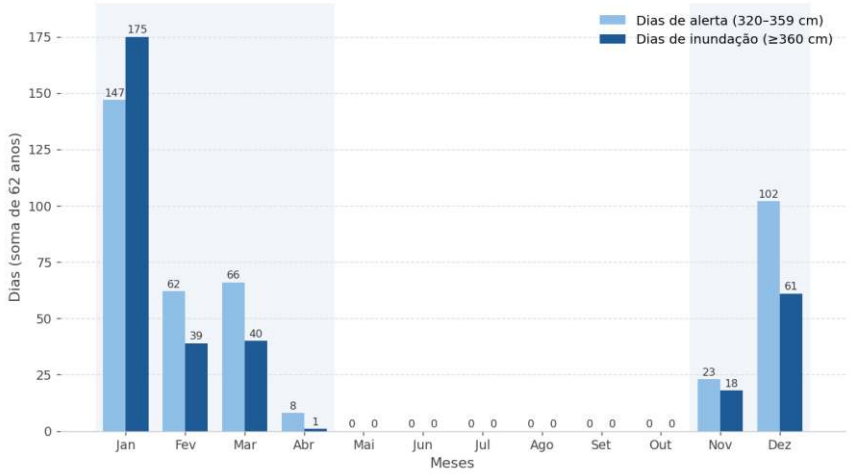
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

chuvoso (Figura 8), padrão consistente com a maior atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) entre dezembro e fevereiro.

Figura 8. Distribuição mensal do número de dias em cota de alerta (320–359 cm) e cota de inundação (≥360 cm) ao longo dos 12 meses do ano civil, Governador Valadares (1938–2025).



Fonte: elaborado pela autora.

Entre os anos individuais com maior número de dias em cota de inundação, destaca-se janeiro de 1942, com 20 dias em cota de inundação, o valor mais representativo de toda a série. Em seguida aparecem janeiro de 1985 (19 dias) e janeiro de 2012 (14 dias). Em dezembro, mês que concentra o segundo maior volume de dias de inundação da série, os anos mais representativos foram 2011 (10 dias), 2006 (8 dias) e 2008 (6 dias).

Projeções globais indicam possíveis intensificações do ciclo hidrológico, com eventos de precipitação extrema mais frequentes e severos em regiões tropicais (IPCC, 2022), e modelos regionais apontam aumento na variabilidade interanual da precipitação para a bacia do Rio Doce (MARENGO et al., 2020). Nesse contexto reforça-se a necessidade de sistemas de alerta precoce eficientes e de políticas de ordenamento territorial que previnam a ocupação de planícies de inundação (BLÖSCHL et al., 2019; KUNDZEWICZ et al., 2014).

O teste de Shapiro-Wilk rejeitou a hipótese de normalidade ($p < 0,05$) para todas as séries analisadas, resultado esperado dado o comportamento assimétrico típico de cotas fluviométricas. A Tabela 3 sintetiza os resultados dos testes de correlação, defasagem ótima e causalidade de Granger para as seis séries correlatas, ordenadas da maior para a menor correlação no lag ótimo.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Tabela 3. Síntese dos testes estatísticos entre Governador Valadares e as estações correlatas.

Estação	N (dias)	Pearson r	Spearman r	Lag ótimo (dias)	r no lag ótimo	Granger p
Cachoeira dos Óculos	18.108	0,935	0,947	-1	0,952	< 0,001
Ponte Nova	18.505	0,881	0,901	-1	0,908	< 0,001
Nova Era	8.309	0,830	0,882	-2	0,905	< 0,001
Naque Velho	18.474	0,888	0,820	-1	0,904	< 0,001
Belo Oriente	14.149	0,870	0,771	-1	0,874	< 0,001
Mário de Carvalho	13.483	0,740	0,618	-1	0,778	< 0,001

Fonte: elaborado pela autora. Nota: Períodos de sobreposição (dados simultaneamente válidos) com Governador Valadares: Cachoeira dos Óculos, Ponte Nova e Naque Velho, 1975–2025; Belo Oriente, 1987–2025; Mário de Carvalho, 1987–2023; Nova Era, 2003–2025.

Todas as seis séries apresentaram correlação estatisticamente significativa e de magnitude forte a moderada com Governador Valadares. Cachoeira dos Óculos apresentou a maior associação no lag ótimo (r = 0,952), seguida por Ponte Nova (r = 0,908) e Nova Era (r = 0,905). Mário de Carvalho apresentou a correlação mais fraca do conjunto (r = 0,778 no lag ótimo).

Pode-se verificar na Figura 9 análises complementares que avaliam a robustez desses coeficientes de correlação brutos. O tamanho amostral efetivo, calculado a partir da autocorrelação lag-1 de cada série (0,92 a 0,98) pela formulação clássica de Bartlett (1946), é substancialmente inferior ao tamanho nominal: por exemplo, os 22.416 dias válidos de Governador Valadares correspondem a um tamanho amostral efetivo de apenas 245 observações independentes, o que já era esperado dado o comportamento fortemente persistente de cotas fluviométricas diárias e reforça que os valores de p devem ser interpretados com grande cautela.

Ao remover o ciclo sazonal comum (anomalias em relação à climatologia mensal) e ao pré-branquear as séries resultantes por meio de resíduos de modelos autorregressivos de ordem 10, selecionada de modo a garantir resíduos sem autocorrelação residual pelo teste de Ljung-Box, técnica amplamente empregada para isolar a autocorrelação própria de séries hidrológicas antes de testes de significância (Yue e Wang, 2002), as correlações de Pearson caíram de forma expressiva. A correlação bruta entre as estações e Governador Valadares (0,74 a 0,94) reduziu-se para 0,11 a 0,44 nas séries dessazonalizadas e pré-branqueadas, indicando que parcela relevante da associação bruta é atribuível à persistência temporal e à sazonalidade compartilhada, e não exclusivamente a uma relação hidrológica direta e instantânea entre os postos. Ainda assim, a correlação residual pré-branqueada permaneceu positiva e não desprezível em todas as estações, sugerindo que uma associação hidrológica genuína, embora mais modesta do que os coeficientes brutos sugerem, persiste após o controle desses efeitos.

Os intervalos de confiança de 95% obtidos por bootstrap em blocos móveis confirmaram a robustez das correlações de Pearson observadas, com amplitude reduzida (inferior a 0,05 na maioria das estações) mesmo respeitando a estrutura de dependência temporal dos dados.

As séries mostraram-se estacionárias tanto em nível quanto em primeira diferença (teste de Dickey-Fuller aumentado, p < 0,05 em todos os casos), e a análise de sensibilidade restrita ao período comum a todas as sete séries (2003-2023) reproduziu, com pequenas variações, os coeficientes obtidos no período máximo disponível para cada série, reforçando a estabilidade temporal dos resultados.

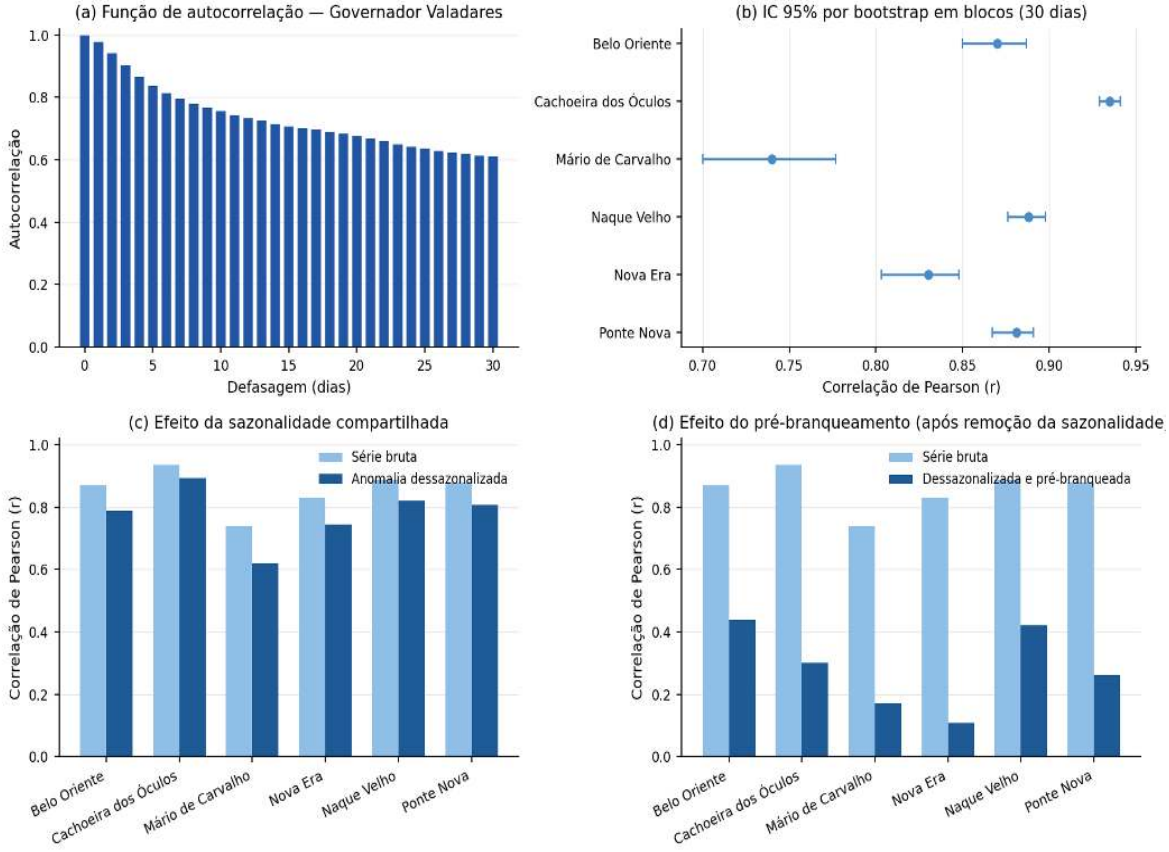
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

A avaliação de homogeneidade das séries de cotas máximas anuais, por meio dos testes de Pettitt e de Mann-Whitney (este último seguindo o mesmo procedimento empregado pelo SGB/CPRM (2022) para a série de Governador Valadares), não indicou pontos de mudança estatisticamente significativos em nenhuma das sete séries analisadas ($p > 0,05$ em ambos os testes), sustentando a adequação das séries para as análises estatísticas conduzidas neste estudo.

Figura 9. Testes de robustez estatística: (a) função de autocorrelação de Governador Valadares; (b) intervalos de confiança de 95% por bootstrap em blocos móveis; (c) efeito da remoção da sazonalidade compartilhada; (d) efeito do pré-branqueamento aplicado às séries já dessazonalizadas.



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 3 e a Figura 9 cumprem funções distintas e complementares na interpretação dos resultados. Os coeficientes brutos (Tabela 3) refletem a série tal como observada, incluindo sazonalidade e persistência temporal, e constituem o critério apropriado para a seleção de variáveis preditoras em modelos operacionais de previsão, objetivo central deste estudo. Os coeficientes ajustados (Figura 9), por sua vez, isolam a fração da associação atribuível à conectividade hidrológica direta entre os postos, controlando fatores que não implicam propagação física da onda de cheia, notadamente o regime pluviométrico compartilhado pela bacia e a autocorrelação intrínseca de cada série. A magnitude reduzida dos coeficientes ajustados (0,11 a 0,44) não invalida, portanto, o uso da correlação bruta como critério

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

de seleção; delimita, sim, o quanto dessa associação pode ser atribuído a uma relação hidrológica instantânea entre as estações, distinta de covariação decorrente de forçantes regionais comuns.

A comparação entre a força da correlação e a distância pelo curso d'água até Governador Valadares (Tabela 1; Figura 7) revela que essa relação não é diretamente proporcional. Em ordem de proximidade fluvial, as estações seguem a sequência Naque Velho (77,9 km) < Belo Oriente (85,8 km) < Cachoeira dos Óculos (97,7 km) < Mário de Carvalho (139,3 km) < Nova Era (211,7 km) < Ponte Nova (302,7 km); no entanto, a estação mais fortemente correlacionada com Governador Valadares foi Cachoeira dos Óculos (Spearman r = 0,947), apesar de não ser a mais próxima pelo curso do rio.

Essa diferença pode ser explicada pela área de drenagem contribuinte de cada posto: Cachoeira dos Óculos integra 15.900 km² de área de drenagem e está instalada no canal principal do Rio Doce, a jusante da confluência de múltiplos afluentes, o que a torna hidrologicamente representativa ao volume de água que efetivamente chega a Governador Valadares do que estações posicionadas em afluentes de menor porte, como Mário de Carvalho (rio Piracicaba, 5.270 km²) e Naque Velho (rio Santo Antônio, 10.200 km²), ainda que estas estejam fluvialmente mais próximas; ambas, aliás, drenam sub-bacias do Rio Doce já identificadas como prioritárias por suscetibilidade à erosão e à produção de sedimentos (Rodrigues et al., 2026).

Esse achado indica que a área de drenagem e a posição no canal principal, e não apenas a distância percorrida, constituem critérios relevantes para a seleção de estações preditoras em modelos de previsão de cotas, sobretudo quando se considera que a área de drenagem de Governador Valadares (40.500 km²) é aproximadamente 1,7 vez maior do que a da estação correlata mais extensa (Belo Oriente, 24.200 km²), refletindo a contribuição de afluentes adicionais não contemplados individualmente neste estudo.

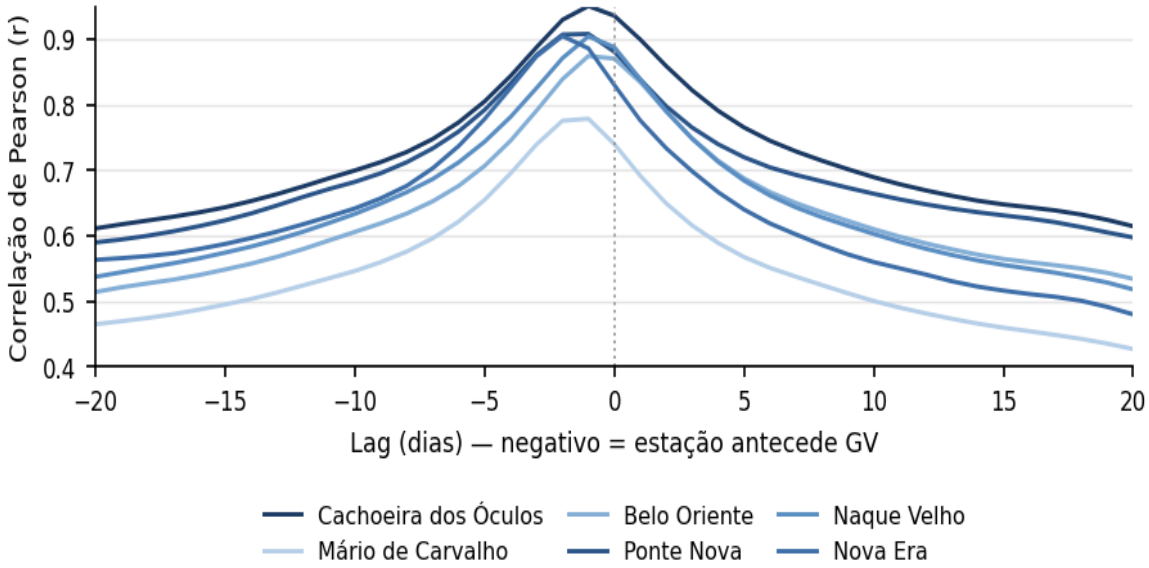
A análise de correlação cruzada revelou padrão consistente entre todas as estações: o lag de correlação máxima situou-se entre -1 e -2 dias, com valor negativo indicando que a estação a montante antecede temporalmente o comportamento de Governador Valadares, resultado fisicamente coerente com o tempo de translação da onda de cheia ao longo do canal fluvial e compatível com estimativas globais de celeridade de onda de cheia em rios de porte médio a grande (Allen et al., 2018). A Figura 10 apresenta as curvas de correlação cruzada, evidenciando picos bem definidos e simétricos em torno do lag ótimo.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Figura 10. Curvas de correlação cruzada (Pearson) entre Governador Valadares e as estações correlatas, por defasagem (lag) em dias.



Fonte: elaborado pela autora.

O teste de causalidade de Granger, com seleção do número de defasagens por AIC (que indicou 5 defasagens como ótimas em todas as séries) e diagnóstico de resíduos por Ljung-Box, indicou significância estatística ($p < 0,001$) na direção estação a montante → Governador Valadares para todas as seis séries correlatas.

Entretanto, ao testar também a direção inversa (Governador Valadares → estação a montante), conforme recomendado na literatura metodológica, observou-se significância estatística igualmente forte em ambas as direções para todas as estações. Esse resultado bidirecional indica que a precedência temporal de Granger aqui identificada não deve ser interpretada como evidência de propagação causal unidirecional da onda de cheia rio abaixo; é mais provável que reflita, ao menos parcialmente, forçantes climáticas regionais compartilhadas por toda a bacia (eventos de precipitação que atingem simultaneamente múltiplas sub-bacias) padrão de sincronia hidrológica já documentado na literatura como fonte de causalidade estatística aparentemente bidirecional entre pontos sem conexão física direta (Delforge et al., 2022), às quais se soma a autocorrelação temporal residual não plenamente removida pela primeira diferenciação como já demonstrado na Figura 9, e indicado pela autocorrelação residual significativa nos resíduos do modelo (Ljung-Box $p < 0,001$ em todos os casos).

O teste de Granger deve, portanto, ser interpretado neste estudo como evidência de precedência temporal estatística, não de causalidade hidrológica física, e seu papel na análise é estritamente confirmatório.

Diante desse conjunto de evidências, os resultados obtidos permitem hierarquizar as estações correlatas segundo sua associação bruta com Governador Valadares: Cachoeira dos Óculos, Ponte Nova, Nova Era, Naque Velho e Belo Oriente apresentaram correlação forte ($r > 0,80$ no lag ótimo) e defasagem fisicamente coerente de 1 a 2 dias, constituindo séries candidatas a variáveis explicativas em

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

estudos posteriores de previsão, muito embora a magnitude exata dessa associação, uma vez controlados sazonalidade e autocorrelação, seja mais modesta do que os coeficientes brutos indicam. Apenas Mário de Carvalho (r = 0,778) ficou abaixo do critério de corte adotado.

Limitações do Estudo

Um lag de 1 a 2 dias entre estação a montante e Governador Valadares não equivale a 24 horas de antecedência operacional precisa, pois a cota média diária agrega leituras ao longo do dia e pode ocultar picos intradiários. As defasagens aqui reportadas devem ser interpretadas como "defasagem em escala diária", não como tempo de resposta operacional em horas; validação com dados de resolução horária ou telemétrica é etapa necessária antes de aplicação em sistema de alerta de curto prazo.

Relacionada a essa limitação temporal está a escolha da própria variável hidrológica analisada. A opção pela cota, em vez da vazão, deve-se à ausência de curvas-chave atualizadas e publicamente disponíveis para todo o período histórico em todas as estações correlatas, e ao fato de os limiares operacionais do sistema de alerta (SGB/SACE) já serem expressos em cota. Ademais, este estudo tem caráter preliminar e exploratório, voltado à caracterização da associação espaço-temporal entre estações, não à construção de um modelo preditivo operacional; a conversão para vazão é extensão recomendada para etapa subsequente.

Também no que se refere ao uso futuro dessas estações, cabe ainda ressaltar que a recomendação das cinco estações correlatas como candidatas a variáveis explicativas em modelos futuros não foi acompanhada de teste de multicolinearidade entre elas. Estações geograficamente próximas, como Naque Velho e Belo Oriente, podem apresentar correlação elevada entre si, de modo que sua inclusão simultânea como preditoras poderia adicionar redundância, e não necessariamente informação independente, a modelos de previsão subsequentes.

Por fim, uma limitação de natureza distinta decorre da longa extensão temporal da série analisada. A série histórica de Governador Valadares abrange quase nove décadas (1938-2025), período no qual mudanças de uso e ocupação do solo na bacia, como urbanização e desmatamento, podem ter alterado a resposta hidrológica da bacia (tempo de concentração, coeficiente de escoamento superficial) e as próprias características sedimentológicas do canal, como já documentado para sub-bacias do Rio Doce, incluindo trechos dos rios Piracicaba e Santo Antônio (Rodrigues et al., 2026). Este estudo não incorporou variáveis de uso do solo nem testou a estabilidade temporal da relação chuva-vazão, tratando implicitamente a resposta da bacia como estacionária ao longo de todo o período analisado.

5. Conclusão

Este estudo caracterizou o regime histórico de cotas de Governador Valadares e identificou a estrutura de dependência espaço-temporal com estações fluviométricas a montante no Rio Doce. A distribuição sazonal revelou severa assimetria, com janeiro despontando como o mês de maior susceptibilidade e recorrência de eventos extremos de inundação. As séries telemétricas a montante exibiram forte associação com defasagem de um a dois dias e precedência temporal de Granger em relação ao nível d'água na estação de referência, destacando-se as estações de Cachoeira dos

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

Óculos, Ponte Nova, Nova Era, Naque Velho e Belo Oriente como as séries candidatas para composição de variáveis explicativas em estudos futuros de modelos de previsão de cotas.

Como desdobramento prático, os resultados sustentam a continuidade do desenvolvimento e da validação de modelos preditivos de curto prazo para o município com base em dados de postos a montante, ainda não testados ou validados fora da amostra neste estudo. Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação desses postos estrategicamente selecionados como variáveis de entrada (features) no desenvolvimento de modelos de previsão de inundações baseados em Aprendizado de Máquina (Machine Learning). Tais algoritmos orientados a dados devem incorporar a superação da autocorrelação serial, a evolução temporal da curva-chave nas estações de referência e as alterações morfológicas na calha decorrentes do assoreamento recente, garantindo maior precisão na antecipação de cotas extremas e na redefinição dos limiares operacionais de alerta.

Cabe ainda reconhecer que este estudo trabalhou exclusivamente com séries de cota das próprias estações fluviométricas, sem incorporar precipitação observada ou prevista, variável potencialmente relevantes para a propagação, atenuação e sincronização das ondas de cheia entre as estações a montante e Governador Valadares, e que não foram individualmente identificadas ou quantificadas neste estudo. Em modelos operacionais de previsão é importante incorporar essa variável para maior robustez preditiva.

Referências

ABASS, K. et al. Urban sprawl and green space depletion: Implications for flood incidence in Kumasi, Ghana. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 51, p. 101915, 1 dez. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Manual de Procedimentos para a Instalação, Operação e Manutenção de Estações Fluviométricas. Brasília, DF: ANA/Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, 2016.
AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Sistema de Informações Hidrológicas – HidroWeb. Brasília, DF: ANA, 2026. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/. Acesso em: 28 jul. 2026.

ALLEN, G. H.; DAVID, C. H.; ANDREADIS, K. M.; HOSSAIN, F.; FAMIGLIETTI, J. S. Global estimates of river flow wave travel times and implications for low-latency satellite data. Geophysical Research Letters, v. 45, n. 15, p. 7551-7560, 2018.

BARTLETT, M. S. On the theoretical specification and sampling properties of autocorrelated time-series. Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society, v. 8, n. 1, p. 27-41, 1946.

BLÖSCHL, G. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature, v. 573, n. 7772, p. 108-111, 2019.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (Sedec/MIDR); Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil (Ceped/UFSC). Atlas Digital de Desastres no Brasil. Brasília, DF: MIDR, 2026. Disponível em: https://atlasdigital.mdr.gov.br/. Acesso em: 19 ago. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 abr. 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 28 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional, 2013.

COELHO, A. L. N. Situação hídrico-geomorfológica da bacia do rio Doce com base nos dados da série histórica de vazões da estação de Colatina-ES. Caminhos de Geografia, p. 56–79, 2006.

CRED – CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. CRED Crunch, n. 58: Disaster Year in Review 2019. Análise e redação de Rémi Froment e Regina Below. Bruxelas: CRED, abr. 2020. Disponível em: https://www.emdat.be. Acesso em: 30 abr. 2025.

DAWSON, R. J. et al. Assessing the effectiveness of non-structural flood management measures in the Thames Estuary under conditions of socio-economic and environmental change. Global Environmental Change, v. 21, n. 2, p. 628–646, 1 maio 2011.

DELFORGE, D.; DE VIRON, O.; VANCLOOSTER, M.; VAN CAMP, M.; WATLET, A. Detecting hydrological connectivity using causal inference from time series: synthetic and real karstic case studies. Hydrology and Earth System Sciences, v. 26, p. 2181-2199, 2022.

EM-DAT. The International Disasters Database. Bruxelas: CRED/UCLouvain, 2026. Disponível em: https://www.emdat.be. Acesso em: 28 jul. 2026.

FANG, G. et al. Shifting in the global flood timing. Scientific Reports, v. 12, art. 18853, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-23748-y.

FREITAS, C. M. de et al. Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. Ciência & Saúde Coletiva, v. 19, n. 9, p. 3645–3656, set. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020. Brasília, DF: INMET, 2022.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. H.-O. Pörtner et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. Hydrological Sciences Journal, v. 59, n. 1, p. 1-28, 2014.

MARENGO, J. A. et al. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil: evidências e projeções. Revista Brasileira de Climatologia, v. 26, p. 1–16, 2020.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: SEMAD/IGAM, 2014.

MUNICH RE. Economic impact of weather disasters. Munique: Munich Re, 2025. Disponível em: https://www.munichre.com/en/insights/natural-disaster-and-climate-change/weather-disasters-in-industrialized-countries.html. Acesso em: 12 nov. 2025.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NATIONAL WEATHER SERVICE. Summary of Natural Hazard Statistics for 2011 in the United States. Silver Spring, MD: NOAA/NWS, 2012. Disponível em: https://www.weather.gov/media/hazstat/sum11.pdf. Acesso em: 28 jul. 2025.

NGUYEN, P. et al. Flood forecasting and inundation mapping using HiResFlood-UCI and near-real-time satellite precipitation data: the 2008 Iowa flood. Journal of Hydrometeorology, v. 16, n. 3, p. 1171–1183, 2015.

RAZAVI, S. et al. Anthropocene flooding: challenges for science and society. Hydrological Processes, v. 34, n. 8, p. 1996–2000, 15 abr. 2020.

REZENDE, P. S. Análise de risco de desastres por inundação: cenários temporais para a cidade de Governador Valadares (MG). 2020. 185 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

RODRIGUES, M. B.; SPAGNOL, I. T.; RABELLO, L. L. et al. Land use and land cover scenarios and their interrelations with sediment production and transport: Doce River basin. Environmental Monitoring and Assessment, v. 198, p. 61, 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM). Análise de Frequência de Vazões dos Sistemas de Alerta: Sistema de Alerta Bacia do Rio Doce, Rio Doce, estação fluviométrica Governador Valadares, código 56850000, município atendido Governador Valadares-MG. Autoria de Paula Kristhina Cordeiro Freire e Eber José de Andrade Pinto. Fortaleza: SGB/CPRM, 2022.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27

SUN, Q. et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. Journal of Climate, v. 34, n. 1, p. 243–258, 2021. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0892.1.

UNISDR – UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION; CRED – CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995-2015. Genebra: UNISDR, 2015. Disponível em: https://www.undrr.org/publication/human-cost-weather-related-disasters-1995-2015. Acesso em: 02 jun. 2025.

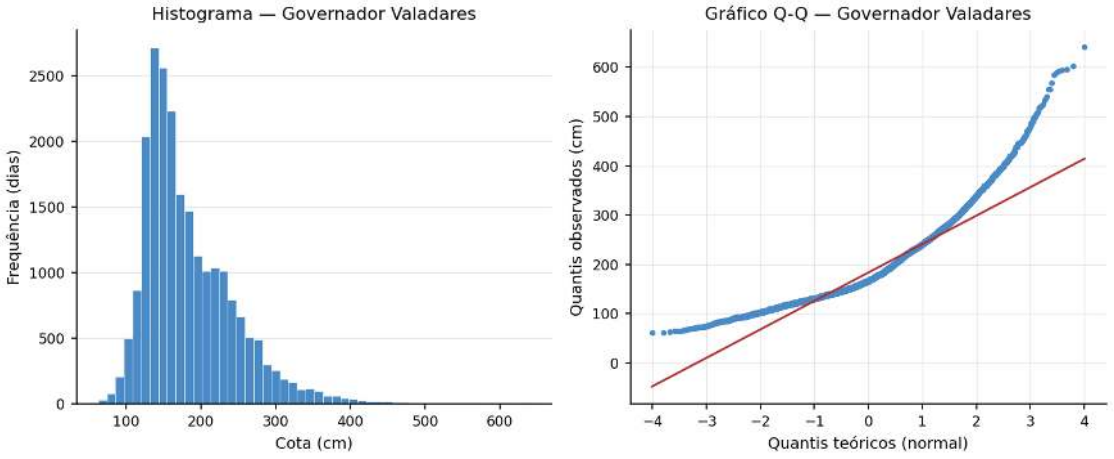
WMO. Manual on Flood Forecasting and Warning. Geneva: World Meteorological Organization, 2011. (WMO-No. 1072).

YUE, S.; WANG, C. Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. Water Resources Research, v. 38, n. 6, p. 4-1-4-7, 2002.

ZHAO, G. et al. Assessment of urban flood susceptibility using semi-supervised machine learning model. Science of the Total Environment, v. 659, p. 940–949, 1 abr. 2019.

Material Suplementar

Em complemento ao teste de Shapiro-Wilk, cuja sensibilidade a desvios modestos de normalidade cresce com o tamanho amostral, apresentam-se a seguir histogramas e gráficos quantil-quantil (Q-Q) para as sete séries de cota diária analisadas neste estudo, permitindo a inspeção visual direta da forma de cada distribuição. As sete séries apresentaram assimetria positiva e curtose elevada, compatíveis com o comportamento tipicamente assimétrico de cotas fluviométricas e com a rejeição da normalidade indicada pelo teste de Shapiro-Wilk (Tabela 3).

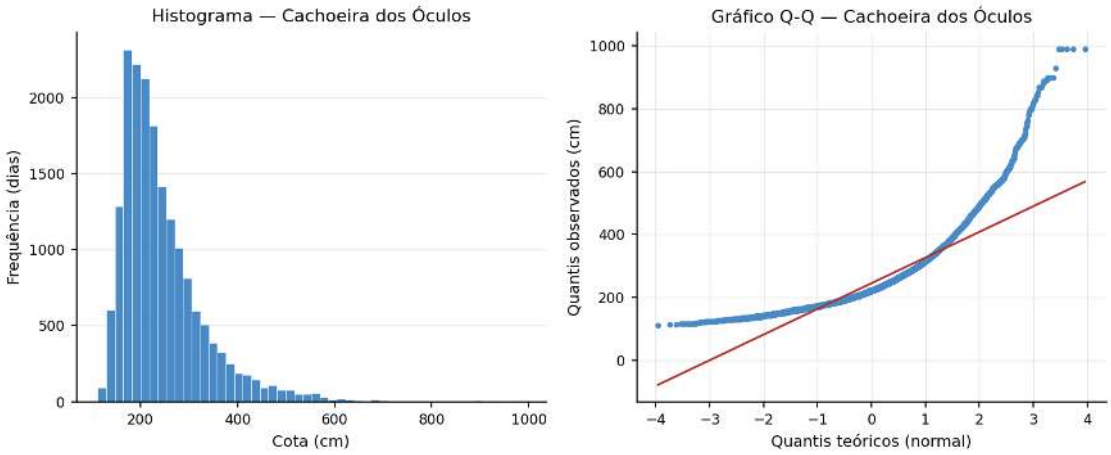


Histograma e gráfico Q-Q — Governador Valadares. N = 22.416; assimetria = 1,36; curtose = 2,87.

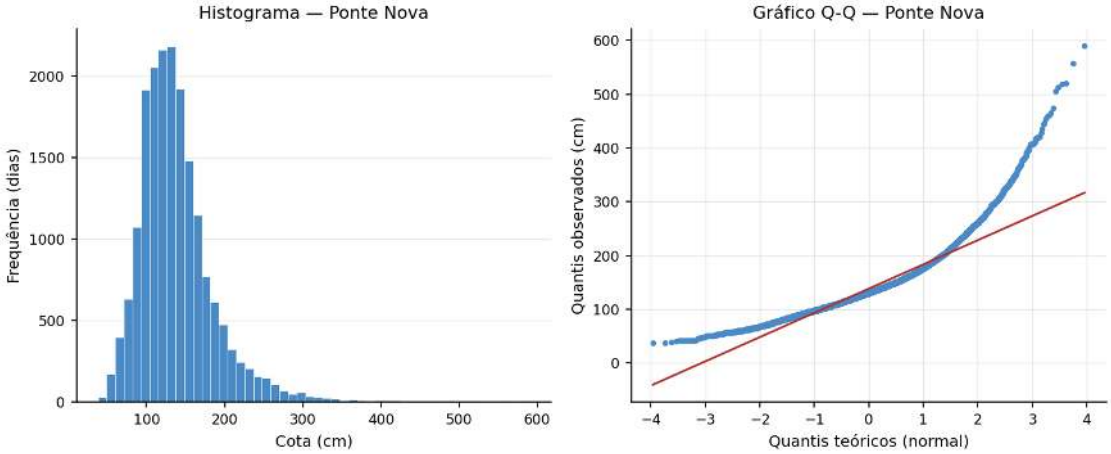
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

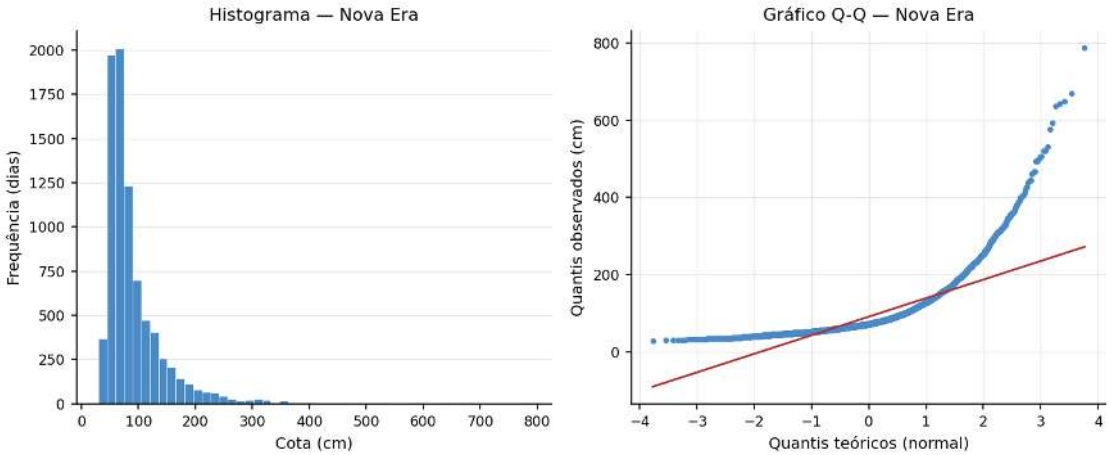
Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27



Histograma e gráfico Q-Q — Cachoeira dos Óculos. N = 18.139; assimetria = 2,07; curtose = 7,24.



Histograma e gráfico Q-Q — Ponte Nova. N = 18.536; assimetria = 1,62; curtose = 5,54.

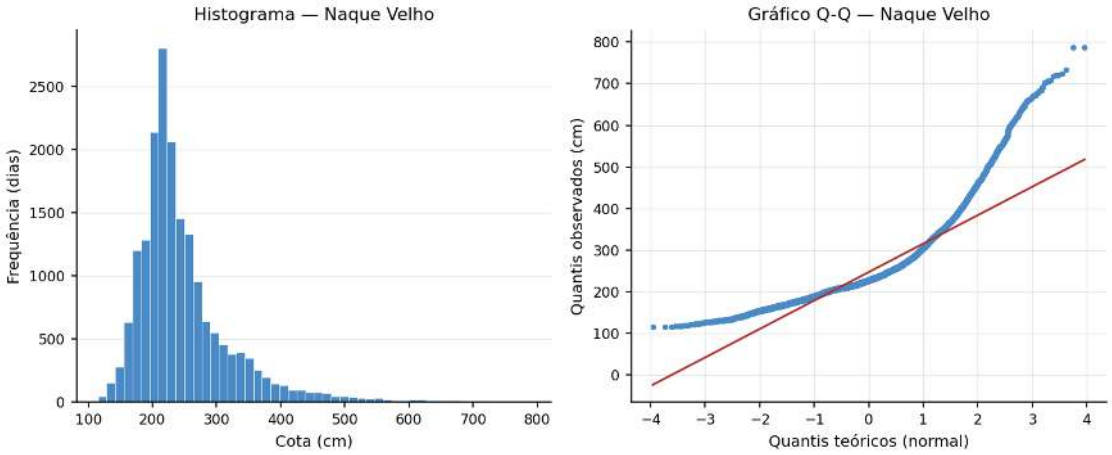


Histograma e gráfico Q-Q — Nova Era. N = 8.310; assimetria = 3,20; curtose = 16,70.

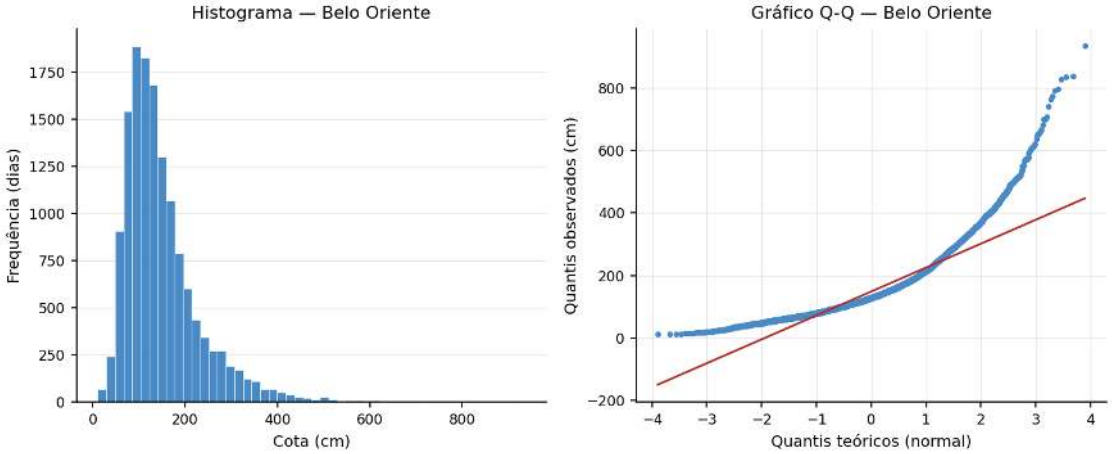
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

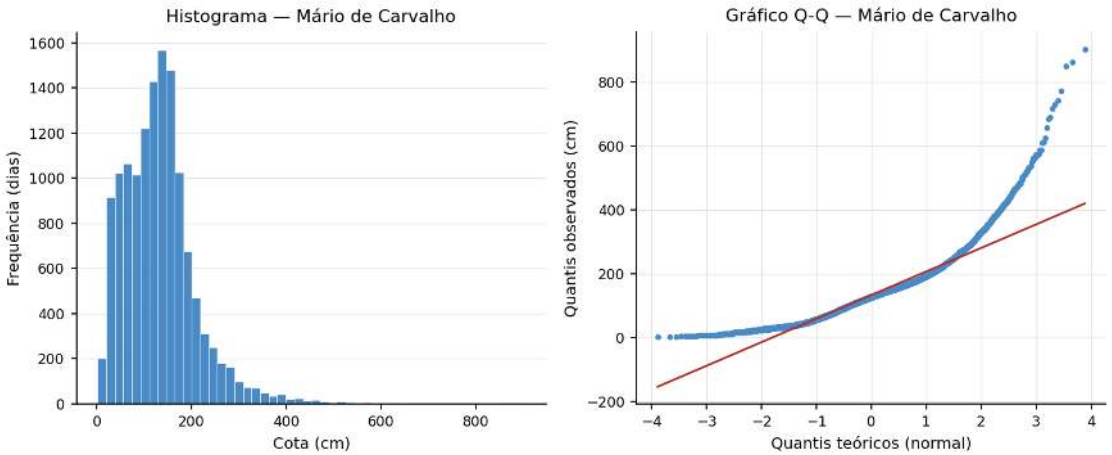
Received: 21/07/2026 - **Accepted:** 24/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8y63v150
Pages: 1-27



Histograma e gráfico Q-Q — Naque Velho. N = 18.505; assimetria = 1,99; curtose = 5,92.



Histograma e gráfico Q-Q — Belo Oriente. N = 14.150; assimetria = 1,93; curtose = 6,52.



Histograma e gráfico Q-Q — Mário de Carvalho. N = 13.483; assimetria = 1,60; curtose = 6,38.

CC BY