

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELAGEM CHUVA-VAZÃO DA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

Paula Roberta Souza Carvalho¹ & Celso Bandeira de Melo Ribeiro²

Abstract: Understanding the rainfall-runoff process is fundamental to efficient watershed management and plays a crucial role in anticipating flood events, assessing water availability, and sustainably planning resource use. The objective of this work is to parameterize, calibrate, and validate the HEC-HMS model for the Minas Gerais portion of the Doce River basin, reproducing the main extreme events that occurred from 2019 to 2022. This model allows water resource managers to forecast runoff and aid decision-making. The following hydrological modeling methods were used: Deficit and Constant, for runoff separation; Clark Unit Hydrograph, for hydrograph formation; Recession, for base flow; and Muskingum-Cunge, for runoff propagation. The Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) product was used as transfer input data, and Hidroweb was used to obtain flow data from the fluvimetric stations. The closure period was from January 1, 2010, to December 31, 2017, and the validation period was from January 1, 2019, to December 31, 2022. The model was evaluated based on the Nash-Stucliffe Efficiency (NSE) index and the Percentage Bias (PBIAS), according to the HEC-HMS classification – adapted from Moriasi (2007) – and was generally rated as "good to very good." The performance of the HEC-HMS software in the Doce River basin simulations was considered adequate, confirming its capability in streamflow forecasting.

Resumo: A compreensão do processo chuva-vazão é fundamental para o gerenciamento eficiente de bacias hidrográficas e desempenha um papel crucial na antecipação de eventos de inundação, bem como na avaliação da disponibilidade hídrica e no planejamento sustentável do uso dos recursos. O objetivo do presente trabalho é parametrizar, calibrar e validar o modelo HEC-HMS para a porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce, reproduzindo os principais eventos extremos ocorridos no período 2019 a 2022, a fim de possibilitar os gestores de recursos hídricos realizar a previsão de vazão, auxiliando-os nas tomadas de decisão. Para isso, foram utilizados os seguintes métodos na modelagem hidrológica: *Deficit and Constant*, para separação do escoamento; *Clark Unit Hydrograph*, para formação do hidrograma; *Recession*, para a vazão de base; e *Muskingum-Cunge*, para propagação do escoamento. O produto *Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) foi utilizado como dados de entrada de precipitação e o Hidroweb utilizado para a obtenção dos dados de vazão das estações fluviométricas. O período de calibração foi de 01 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2017 e o de validação de 01 de janeiro de 2019 a 31 de dezembro de 2022. O modelo foi avaliado com base no índice de eficiência de *Nash-Stucliffe Efficiency* (NSE) e no Viés Percentual (PBIAS), de acordo com a classificação do HEC-HMS – adaptada de Moriasi (2007) – sendo classificado, de maneira geral, como “bom a muito bom”. O desempenho do software HEC-

1) Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora: Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro - Juiz de Fora/MG, paulasouza.carvalho@estudante.ufjf.br

2) Professor Doutor no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Juiz de Fora: Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro - Juiz de Fora/MG, celso.bandeira@ufjf.br

HMS nas simulações da bacia do rio Doce foi considerado adequado, confirmando sua capacidade na previsão de vazão.

Palavras-Chave – HEC-HMS; Modelagem Hidrológica; Previsão de Vazão.

INTRODUÇÃO

O modelo chuva-vazão é um modelo hidrológico baseado em representações matemáticas que busca compreender e prever como a precipitação é convertida em escoamento dentro de uma bacia hidrográfica, considerando os diversos processos do ciclo hidrológico. Trata-se, portanto, de uma ferramenta fundamental na análise hidrológica, permitindo avaliar a resposta da bacia aos eventos de precipitação (Guduru *et al.*, 2022; Teng *et al.*, 2017).

A compreensão do processo chuva-vazão é fundamental para o gerenciamento eficiente de bacias hidrográficas e desempenha um papel crucial na antecipação de eventos de inundação, bem como na avaliação da disponibilidade hídrica e no planejamento sustentável do uso dos recursos (Machado *et al.*, 2022). No entanto, a previsão da quantidade de escoamento gerado representa um desafio considerável, em razão da natureza não linear e multidimensional do sistema, que exige a quantificação das variações espaciais e temporais dos componentes do balanço hídrico (Joshi *et al.*, 2019).

Os modelos hidrológicos são empregados em softwares para simulação, utilizando variáveis de entrada com o propósito de representar de forma aproximada o sistema hidrológico real e prever as respostas em bacias hidrográficas, podendo variar sua complexidade, sendo mais simples ou mais detalhado com diversos componentes do balanço hídrico (USACE, 2024).

O *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) é um desses softwares – de acesso livre e gratuito – que utiliza a modelagem chuva-vazão e foi criado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, possibilitando a estimativa do escoamento superficial e a previsão de vazão de acordo com os dados de entrada de precipitação em diferentes pontos de uma bacia (Natarajan; Radhakrishnan, 2021).

A ocorrência de eventos extremos vem aumentando no Brasil devido, principalmente, ao uso e a ocupação do solo de maneira desordenada e acelerada, e tem despertado crescente preocupação, uma vez que estão associados a diversos impactos negativos, como perdas materiais e humanas.

De acordo com Dalagnol *et al.* (2020), são necessários diversos estudos a respeito dos processos hidrológicos em Minas Gerais com a finalidade de preencher as lacunas existentes e os interesses nessa área têm sido crescentes, principalmente, por parte dos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

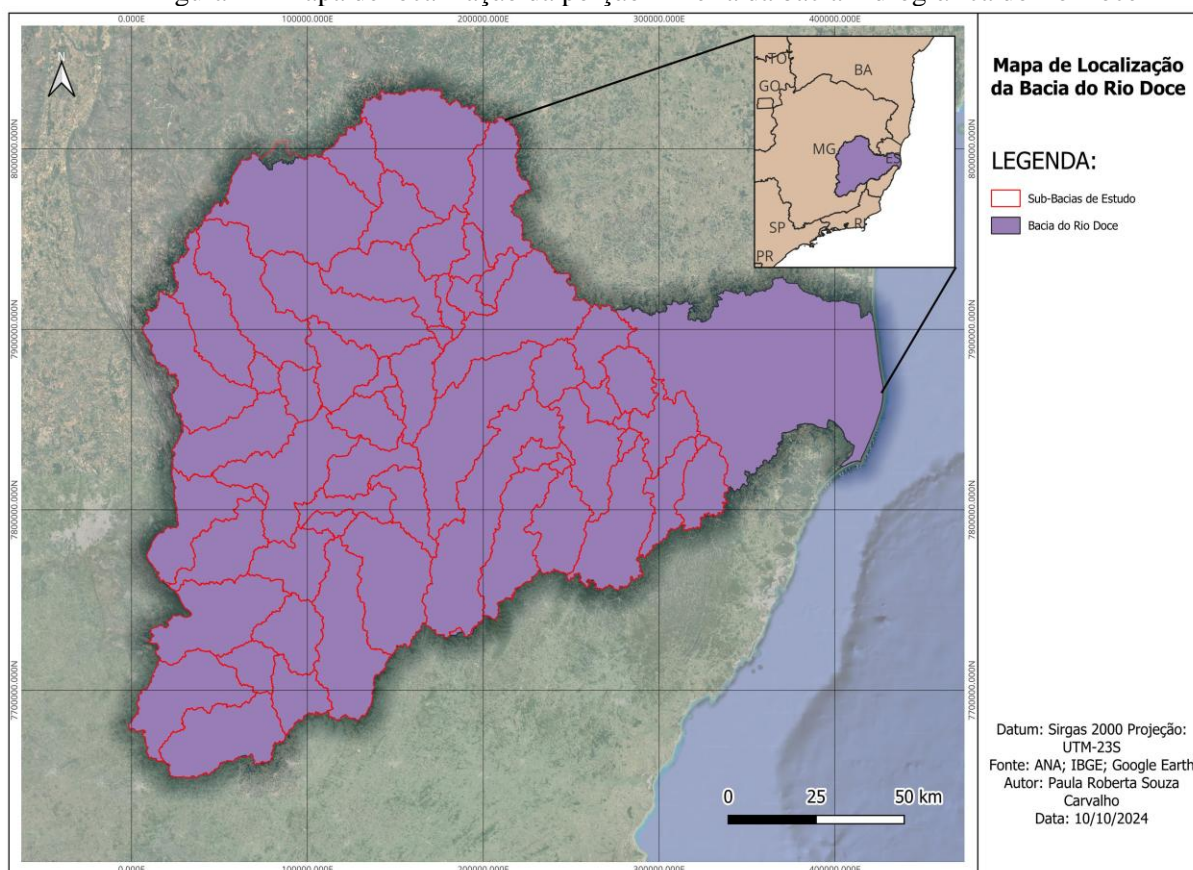
Sendo assim, o objetivo deste trabalho é parametrizar, calibrar e validar o modelo HEC-HMS para a porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce, reproduzindo os principais eventos extremos ocorridos no período 2019 a 2022, a fim de possibilitar os gestores de recursos hídricos realizar a previsão de vazão, e assim, auxiliá-los nas tomadas de decisão.

O presente trabalho integra o projeto de pesquisa intitulado “Caracterização Hidrológica e Modelagem Chuva-Vazão nas principais Bacias Hidrográficas de Minas Gerais”, desenvolvido com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado De Minas Gerais (FAPEMIG) e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), por meio do processo APQ-01226-22.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Doce, especificamente, no leste do estado de Minas Gerais, conforme demonstra a figura 1, e possui 73.596 km². Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2024a), a população que reside na porção mineira da bacia do rio Doce está distribuída em 203 municípios.

Figura 1 – Mapa de localização da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce



As etapas da simulação chuva-vazão da bacia hidrográfica do rio Doce no software HEC-HMS estão descritas resumidamente no fluxograma apresentado na figura 2.

A porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce foi dividida em 61 sub-bacias, conforme demonstra a figura 3, para que as variáveis de entrada do modelo não fossem generalizadas e representassem o mais próximo da realidade possível, melhorando assim, a confiabilidade do modelo.

Figura 2 – Fluxograma da simulação no HEC-HMS

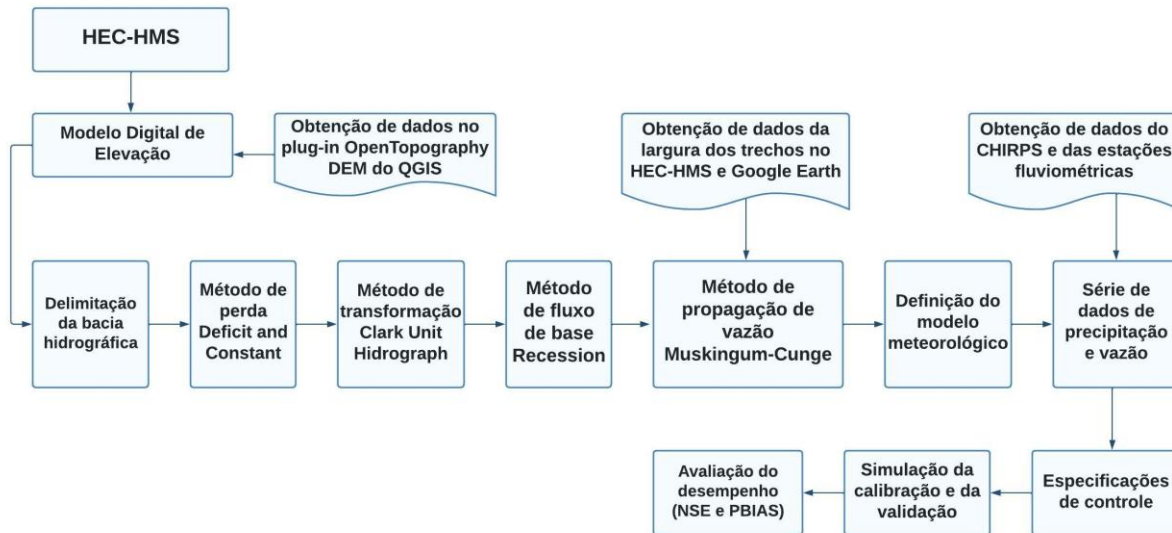


Figura 3 – Projeto da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce no HEC-HMS



A foz da bacia foi colocada na estação Colatina Ponte, situada no Espírito Santo (ES), apenas com a finalidade de abranger toda a área da bacia localizada no estado de Minas Gerais para realizar a simulação.

Utilizou-se o elemento *Source* para inserir os dados de defluências – obtidos no portal do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA (2024b) – das seguintes Usinas Hidrelétricas:

- UHE Aimorés: inaugurada em 5 de maio de 2006, abrange os municípios de Aimorés, Itueta, Resplendor (MG) e Baixo Guandu (ES) e possui potencial de geração de 330 MW, capaz de abastecer uma cidade com até 1 milhão de habitantes (Aliança Energia, 2024a);
- UHE Candonga: também conhecida como UHE Risoleta Neves, entrou em operação em 7 de setembro de 2004 e está localizada próxima a cabeceira do rio Doce, entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (MG) e possui três unidades geradoras com potência instalada de 140 MW/h (Candonga, 2024);
- UHE Mascarenhas: localizada no município de Baixo Guandu (ES), entrou em funcionamento no ano de 1974 e tem capacidade instalada de 198 MW, sendo a maior hidroelétrica do Estado, de acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (Paraty Energia, 2024);
- UHE Porto Estrela: localizada no rio Santo Antônio, no município de Joanésia (MG), foi inaugurada em outubro de 2001 e possui capacidade instalada de 112MW (Aliança, 2024b);
- UHE Sá Carvalho: inaugurada em 1951 e localizada no município de Antônio Dias (MG), possui dois barramentos (Antônio Dias e Severo), sendo que a Barragem Antônio Dias está instalada no rio Piracicaba e a Barragem Severo no ribeirão Severo. Atualmente, possui potência instalada de 78 MW (CEMIG, 2024).

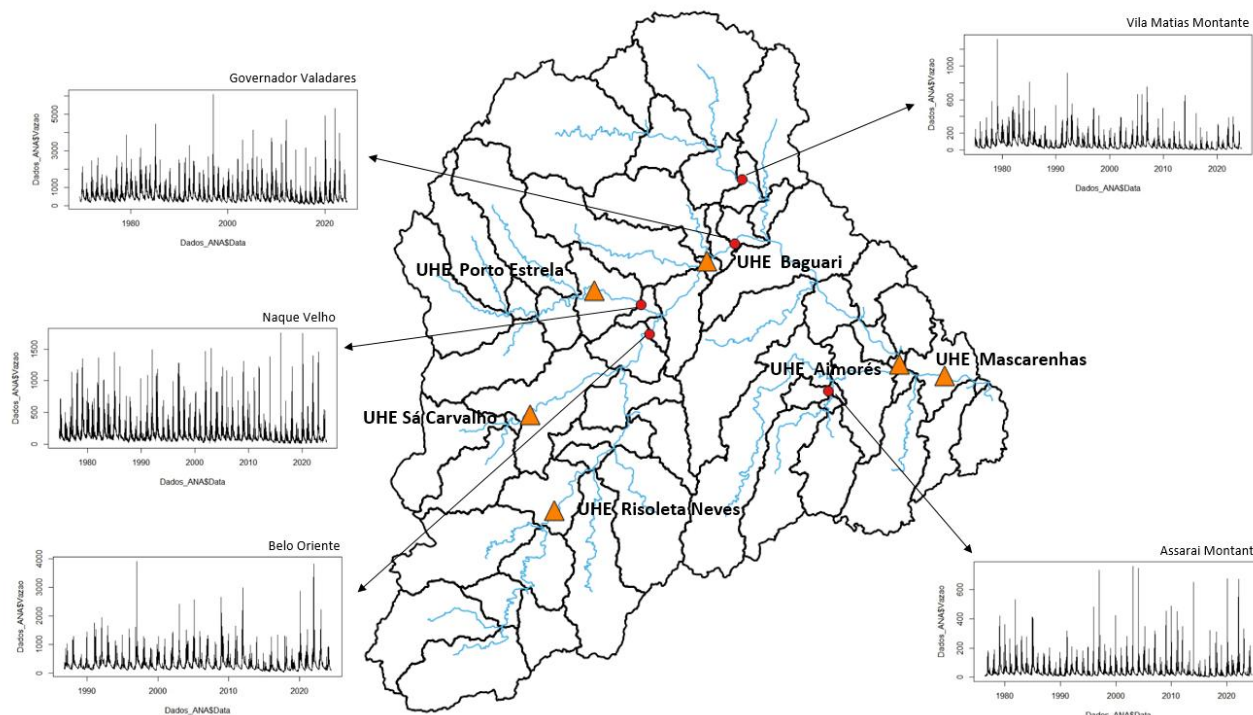
As estações fluviométricas da bacia do rio Doce foram todas analisadas, sendo escolhidas as que possuíam dados completos no período de calibração - 01 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2017 - e de validação - 01 de janeiro de 2019 a 31 de dezembro de 2022.

A tabela 1 apresenta as estações fluviométricas utilizadas na calibração e validação da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce com suas respectivas informações. Por sua vez, a figura 4 demonstra a localização das estações fluviométricas e das UHEs no mapa da bacia e o gráfico da série temporal de vazão de cada estação utilizada na calibração.

Tabela 1 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração e validação da porção mineira da bacia do rio Doce

Código da Estação	Nome da Estação	Rio	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)
56719998	Belo Oriente	Rio Doce	-19.3297	-42.3761	24200
56825000	Naque Velho	Rio Santo Antônio	-19.1881	-42.4228	10200
56850000	Governador Valadares	Rio Doce	-18.8831	-41.9508	40500
56891900	Vila Matias – Montante	Rio Suaçuí Grande	-18.5747	-41.9178	9770
56989400	Assarai Montante	Rio José Pedro	-19.5947	-41.4581	3190

Figura 4 – Série temporal das vazões nas estações fluviométricas utilizadas na calibração e validação da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce



O manual técnico do HEC-HMS apresenta uma tabela utilizada para avaliar o desempenho do modelo. Essa tabela é baseada nos critérios propostos por Moriasi *et al.* (2007) e considera indicadores como o NSE (Eficiência de Nash-Sutcliffe) e o PBIAS (Viés Percentual), conforme ilustrados na tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de desempenho HEC-HMS

Código de cor	Avaliação	NSE	PBIAS
Verde Escuro	Muito bom	$0,65 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 15$
Verde Claro	Bom	$0,55 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 20$
Laranja	Satisfatório	$0,40 < NSE \leq 0,55$	$\pm 20 \leq PBIAS < \pm 30$
Vermelho	Insatisfatório	$NSE \leq 0,40$	$PBIAS \geq \pm 30$

Fonte: Adaptado de USACE (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na tabela 3 que os valores encontrados do coeficiente de *Nash-Sutcliffe* e do PBIAS foram bem próximos no período de calibração (2010 a 2017) e de validação (2019 a 2022).

Tabela 3 – Valores encontrados do PBIAS/NSE no período de calibração e de validação para as estações fluviométricas da porção mineira da bacia do rio Doce

Código	Estação	Rio	Calibração 2010 a 2017		Validação 2019 a 2022	
			PBIAS (%)	NSE	PBIAS (%)	NSE
56719998	Belo Oriente	Rio Doce	-11,45	0,689	-11,48	0,691
56825000	Naque Velho	Rio Santo Antônio	0,54	0,933	0,54	0,933
56850000	Governador Valadares	Rio Doce	-10,50	0,776	-10,58	0,779
56891900	Vila Matias – Montante	Rio Suaçuí Grande	9,02	-4,615	9,07	-4,638
56989400	Assarai Montante	Rio José Pedro	-15,60	0,453	-15,65	0,442

De maneira geral, os avaliadores de desempenho do modelo (PBIAS e NSE) apresentaram bons resultado, podendo ser enquadrados como “satisfatório a muito bom”, de acordo com a classificação proposta no Manual de Referência Técnica do HEC-HMS.

Apenas a estação Vila Matias – Montante teve resultado insatisfatório do NSE na calibração e na validação, o que pode ser justificado pela presença da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Paiol que regulariza a vazão no rio Suaçuí Grande. Levando em consideração que a calibração foi realizada de forma manual, por tentativa e erro, e que a área da bacia é muita extensa, o que dificulta a calibração, os valores encontrados podem ser considerados eficazes.

As figuras 5 a 14 apresentam os hidrogramas do período de calibração e de validação para cada estação fluviométrica. Observa-se boa representação das vazões para as estações Belo Oriente, Governador Valadares e Naque Velho. Por sua vez, a estação Assarai Montante teve, de maneira geral, os valores subestimados, conforme indicado pelo PBIAS (-15,60%).

Figuras 5 - Hidrograma do período de calibração para a estação Belo Oriente

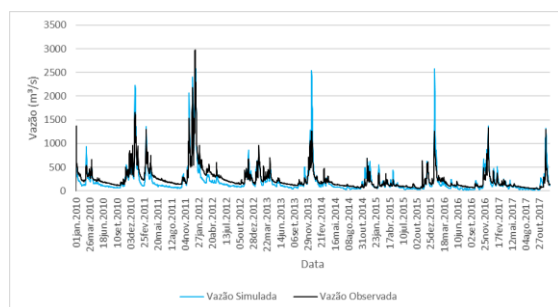


Figura 6 – Hidrograma do período de validação para a estação Belo Oriente

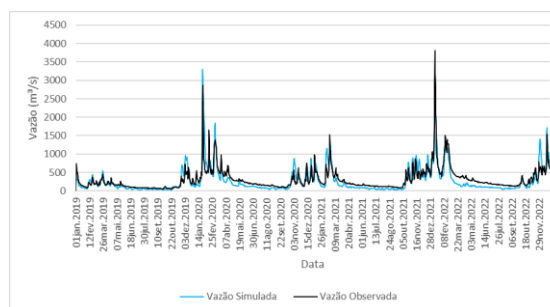


Figura 7 – Hidrograma do período de calibração para a estação Naque Velho

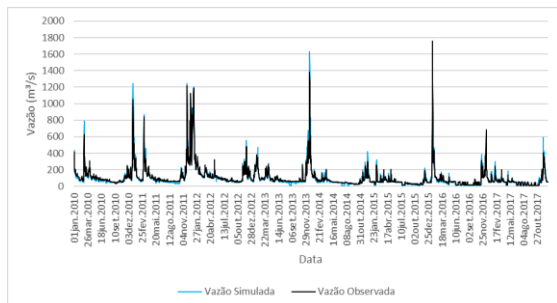


Figura 8 - Hidrograma do período de validação para a estação Naque Velho

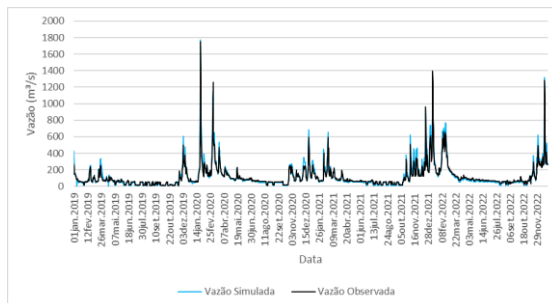


Figura 9 - Hidrograma do período de calibração para a estação Governador Valadares

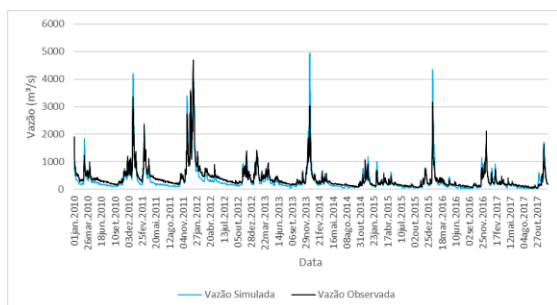


Figura 10 - Hidrograma do período de validação para a estação Governador Valadares

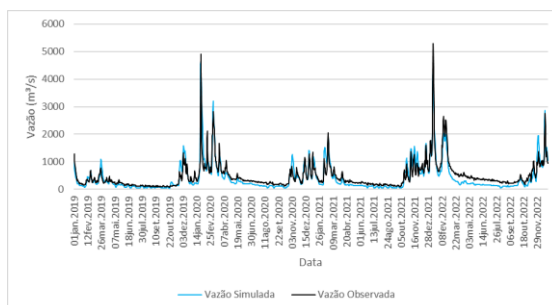


Figura 11 - Hidrograma do período de calibração para a estação Vila Matias – Montante

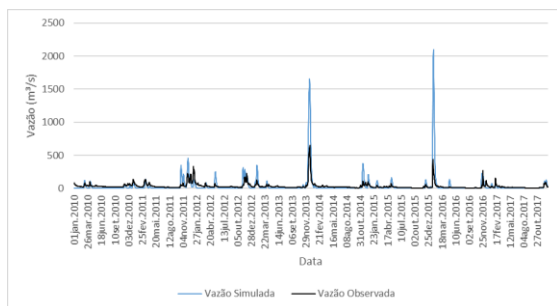


Figura 12 - Hidrograma do período de validação para a estação Vila Matias – Montante

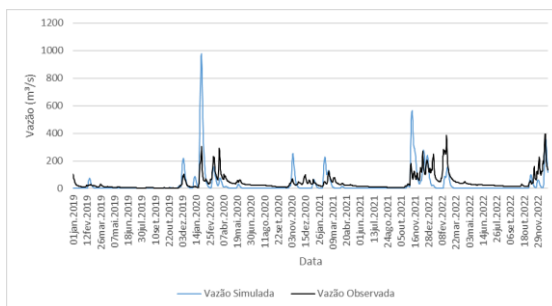


Figura 13 - Hidrograma do período de calibração para a estação Assarai Montante

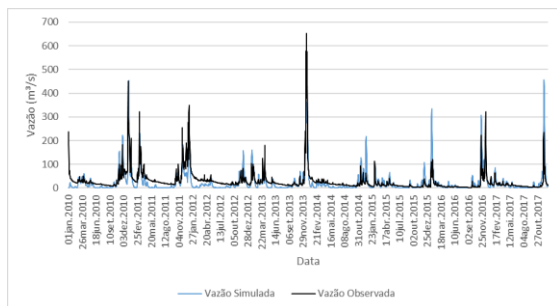
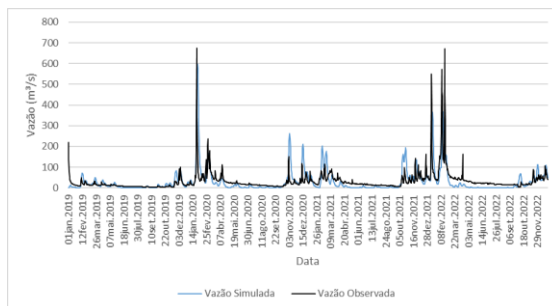


Figura 14 - Hidrograma do período de validação para a estação Assarai Montante



Tschiedel e Colossi (2017) realizaram um Estudo Hidrológico e Modelagem Chuva-Vazão na bacia do rio Doce utilizando o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH). Os coeficientes de eficiência avaliados variaram de 0,334 a 0,648 para as sub-bacias em períodos de altas vazões e de 0,158 a 0,744 nos períodos de baixas vazões, sendo que o ajuste do NSE na foz ficou em 0,533 e 0,700.

Paiva *et al.* (2022) aplicaram o Modelo de Grandes Bacias para as sub-bacias do rio Piracicaba e Piranga, localizadas na parte leste da bacia hidrográfica do rio Doce, e os valores do NSE variaram entre -0,659 e 0,618 na calibração e 0,474 e 0,754 na validação.

Assim, pode-se dizer que os valores encontrados no presente do trabalho apresentaram, de maneira geral, resultados adequados e estão de acordo com os encontrados na literatura.

CONCLUSÃO

A calibração e a validação da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce apresentaram resultados classificados como “bom a muito bom” para o coeficiente NSE e para o PBIAS, com exceção das estações Vila Matias Montante e Assarai Montante. É importante ressaltar que a bacia do rio Doce apresenta diversas UHEs e PCHs ao longo do rio principal e dos seus afluentes, o que acaba dificultando a calibração. Outro fator que prejudica a calibração é a ausência de estações na bacia do rio Doce com série de dados completos de vazão no período estudado no trabalho.

Assim, pode-se concluir que o software HEC-HMS juntamente com os modelos aplicados é capaz de simular com coerência os valores na porção mineira da bacia do rio Doce, possibilitando a previsão de vazão. Pretende-se agora dar continuidade nesse trabalho, para avaliar cenários de mudanças climáticas na bacia do rio Doce, a partir do modelo HEC-HMS devidamente calibrado.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (2024a). “*Bacia do Rio Doce*”. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/rio-doce/rio-doce-saiba-mais>. Acesso em: 10 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (2024b). “*Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR)*”. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>. Acesso em: 15 out. 2024.

ALIANÇA ENERGIA (2024a). “*UHE Aimorés*”. Disponível em: <https://aliancaenergia.com.br/noticias/uhe-aimores-completa-17-anos/>. Acesso em: 10 set. 2024

ALIANÇA ENERGIA (2024b). “*UHE Porto Estrela*”. Disponível em: <https://aliancaenergia.com.br/noticias/uhe-porto-estrela-comemora-22-anos/>. Acesso em: 11 set. 2024.

CANDONGA. “*UHE Candonga*”. Disponível em: <https://candonga.com.br/a-usina/caracteristicas-tecnicas/>. Acesso em: 11 set. 2024.

CEMIG (2024). “*UHE Sá Carvalho*”. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usina/uhe-sa-carvalho/>. Acesso em: 12 set. 2024.

DALAGNOL, R.; GRAMCIANINOV, C.B.; CRESPO, N.M.; LUIZ, R.; CHIQUETTO, J.B.; MARQUES, M.T.A.; DOLIF NETO, G.; ABREU, R.C.; LI, S.; LOTT, F.C.; ANDERSON, L.O.; SPARROW, S. “*Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change?*” Climate Resilience and Sustainability. DOI: 10.1002/cli2.15.

GUDURU, J.U.; JILO, N.B.; RABBA, Z.A.; NAMARA, W.G. “*Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki River watershed, rift valley basin, Ethiopia*”. J. Afr. Earth Sci. 2022. 197. 104743.

JOSHI, N.; BISTA, A.; POKHREL, I.; KALRA, A.; AHMAD, S. “*Rainfall-Runoff Simulation in Cache River Basin, Illinois, Using HEC-HMS*” in Anais do World Environmental and Water Resources Congress 2019; American Society of Civil Engineers, Pittsburgh. PA. USA. 2019.

MACHADO ET AL. “*Modelagem hidrológica como instrumento de manejo ambiental das bacias hidrográficas*”. Revista Educação Ambiental em ação, v. XXI, n. 79. Junho-Agosto/2022.

MORIASI, D. N.; ARNALD., J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, T. L.; VEITH, T. L. “*Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*”. American Society of Agricultural and Biological Engineering. v. 50. n. 3. p. 885-900. 2007. <http://doi.org/10.13031/2013.23153>.

NATARAJAN, S.; RADHAKRISHNAN, N. “*Simulation of rainfall–runoff process for an ungauged catchment using an event-based hydrologic model: A case study of koraiyar basin in Tiruchirappalli city, India*”. J. Earth Syst. Sci., vol. 130, no. 1, 2021. DOI: 10.1007/s12040-020-01532-8.

PAIVA, M.; SANTIGO, A.; DIAS, L.; CASTRO, A.; GOMES, P. “*Simulação e Calibração Do Modelo Hidrológico MGB-IPH Para As Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Piranga e Piracicaba – MG*” in Anais do I Simpósio Nacional De Mecânica Dos Fluidos e Hidráulica, Ouro Preto, Agosto, 2022.

PARATY ENERGIA. “*UHE Mascarenhas*”. Disponível em: <https://www.paratyenergia.com.br/mascarenhas/>. Acesso em: 12 set. 2024.

TENG, F.; HUANG, W.; CAI, Y.; ZHENG, C.; ZOU, S.; 2017. “*Application of hydrological model PRMS to simulate daily rainfall runoff in Zamask-Yingluoxia subbasin of the Heihe River Basin*”. Water (Switzerland) 9, 2. <https://doi.org/10.3390/w9100769>.

TSCHIEDEL, A; COLOSSI, B. “*Estudo Hidrológico e Modelagem Chuva-Vazão da Bacia Do Rio Doce*”. Águas subterrâneas, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28764>

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. “*HEC-HMS*”. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) pelo apoio financeiro concedido – processo APQ01226-22.