

# Resposta hidrológica da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco à modelagem chuva-vazão

Hydrological response of the minas gerais portion of the São Francisco river basin to rainfall-runoff modeling

Paula Roberta Souza Carvalho<sup>1</sup> , Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>1</sup> ,  
Welson de Avelar Soares Filho<sup>2</sup> , Leonardo Goliatt da Fonseca<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil.

E-mails: paulasouza.carvalho@estudante.ufjf.br, celso.bandeira@ufjf.br, leonardo.goliatt@ufjf.br

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais - IF Sudeste MG, Juiz de Fora, MG, Brasil

E-mail: welson.avelar@ifsudestemg.edu.br,

**Como citar:** Carvalho, P. R. S., Ribeiro, C. B. M., Soares Filho, W. A., & Fonseca, L. G. (2025). Resposta hidrológica da porção mineira da bacia hidrográfica do rio são francisco à modelagem chuva-vazão. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 22, e15. <https://doi.org/10.21168/rega.v22e15>

**RESUMO:** A previsão de vazão em eventos extremos provocados por um intenso volume de precipitação é um dos grandes desafios da atualidade e pode auxiliar os gestores de recursos hídricos na tomada de decisão, minimizando os riscos decorrentes desses eventos. O presente trabalho teve como objetivo realizar a implementação do modelo HEC-HMS na porção mineira da bacia do rio São Francisco. Os métodos utilizados na modelagem hidrológica foram: 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. Os dados de entrada de precipitação foram obtidos pelo produto CHIRPS e os dados de vazão, para calibração e validação, das estações fluviométricas, no Hidroweb. O período de calibração foi de 01 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2017 e o da validação de 01 de janeiro de 2019 a 31 de dezembro de 2022, reproduzindo os principais eventos extremos de cheia ocorridos nos últimos anos. Os resultados do modelo foram avaliados com base no índice de eficiência de Nash-Stucliff Efficiency e no PBIAS, sendo classificados como “satisfatório a muito bom”. Realizou-se, ainda, previsão de vazão utilizando o modelo ACCESS-CM2 considerando dois cenários SSP2-4.5 (moderado) e SSP5-8.5 (pessimista) para um período futuro de 10 anos (2025 a 2034) e os resultados indicaram que o tipo de cenário teve grande influência na magnitude do pico de descarga. O software HEC-HMS apresentou um bom desempenho e simulou os valores com coerência, confirmando sua capacidade na previsão de vazão.

**Palavras-chave:** Escoamento Superficial; Eventos Extremos; Modelagem Hidrológica; Previsão de Vazão; HEC-HMS.

**ABSTRACT:** Flow forecasting in extreme events caused by intense precipitation is one of the greatest challenges of our time and can help water resource managers in decision-making, minimizing the risks arising from these events. This study aimed to implement the HEC-HMS model in the Minas Gerais portion of the São Francisco River basin. The methods used in the hydrological modeling were: Deficit and Constant, for flow separation; Clark Unit Hydrograph, for hydrograph formation; Recession, for base flow; and Muskingum-Cunge, for flow propagation. The precipitation input data were obtained by the CHIRPS product and the flow data, for calibration and validation, from the fluviometric stations, in Hidroweb. The calibration period was from January 1, 2010 to December 31, 2017, and the validation period was from January 1, 2019 to December 31, 2022, reproducing the main extreme flood events that occurred in recent years. The model results were evaluated based on the Nash-Stucliff Efficiency Index and PBIAS, being classified as “satisfactory to very good”. Flow forecasting was also performed using the ACCESS-CM2 model considering two scenarios SSP2-4.5 (moderate) and SSP5-8.5 (pessimistic) for a future period of 10 years (2025 a 2034), and the results indicated that the type of scenario had a great influence on the magnitude of the peak discharge. The HEC-HMS software performed well and simulated the values coherently, confirming its capacity in flow forecasting.

**Keywords:** Surface Runoff; Extreme Events; Hydrological Modeling; Flow Prediction; HEC-HMS.

## INTRODUÇÃO

A Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, define a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento de recursos hídricos (Brasil, 1997). A gestão de recursos hídricos, por sua vez, pode ser definida como o conjunto de ações que tem como finalidade a preservação e a regulação do uso da água por meio de um planejamento estratégico.

Dentre as diversas ferramentas fundamentais para a gestão de recursos hídricos, pode-se destacar os modelos hidrológicos, que são representações matemáticas e computacionais que simulam o fluxo da água e de seus componentes na superfície terrestre. O estudo de previsão de vazões possibilita a compreensão da dinâmica da bacia hidrográfica e ajuda na previsão de inundações – um dos grandes desafios da atualidade –, na avaliação da disponibilidade de água e no planejamento de uso sustentável dos recursos hídricos, gastando menos recursos e utilizando menos tempo (Machado et al., 2022; Ferraz, 2021).

Esses modelos são utilizados para simulação em softwares a partir de variáveis de entrada, e tem como objetivo a aproximação do sistema real e a previsão das saídas em bacias hidrográficas (US Army Corps of Engineers, 2023; Scharffenberg & Harris, 2008). Podem variar em complexidade, desde abordagens simples que analisam processos fundamentais até modelos mais elaborados que consideram interações detalhadas entre os diferentes componentes do sistema hídrico.

O sistema Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), criado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, é um dos softwares disponíveis que simula a transformação da chuva em vazão em sistemas de bacias e sub-bacias hidrográficas, com base na representação dos processos do ciclo hidrológico. Assim, permite a estimativa do escoamento superficial e a previsão das vazões resultantes da precipitação de entrada em diversos pontos utilizando modelos matemáticos (US Army Corps of Engineers, 2023; Natarajan & Radhakrishnan, 2021).

O HEC-HMS vem sendo bastante utilizado por ser um software de acesso livre e gratuito. Ademais, possibilita a integração com modelos meteorológicos e sistemas de informação geográfica (GIS), o que facilita a análise de dados complexos e, ainda, permite análises espaciais e temporais com maior nível de detalhamento.

As simulações de vazões considerando dados futuros, de cenários de previsões climáticas, podem auxiliar no entendimento do comportamento das vazões em bacias hidrográficas e contribuir para o planejamento de ações e minimização de prejuízos. O NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2022) é um conjunto de dados fornecidos pela NASA (Center for Climate Simulation) que reúne cenários climáticos globais derivados de execuções do Modelo de Circulação Geral (GCM), no Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado - Fase 6 (CMIP6), com potencial para estudos de previsões futuras de vazões.

Carvalho et al. (2024) realizaram uma revisão sistemática utilizando o software StArt – State of the Art through Systematic Review – sobre a modelagem hidrológica com foco na modelagem chuva-vazão e no HEC-HMS, sendo extraídos 48 artigos dos 92 selecionados nas fontes de pesquisa. As áreas mais estudadas estão localizadas nos Estados Unidos com 10 estudos, seguido pela China com 6 trabalhos. Irã, Espanha e Paquistão aparecem na sequência e ficaram empatados com 5 artigos cada. O Brasil aparece com apenas um trabalho (Ferreira et al., 2021), mais especificamente na bacia hidrográfica do rio Grande, indicando que ainda existem grandes lacunas a serem preenchidas na modelagem chuva-vazão em áreas brasileiras.

Ferreira et al. (2021) analisaram o desempenho dos modelos hidrológicos HEC-HMS e SWAT utilizando como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Grande – localizada no sudeste do Brasil – e concluíram que apesar do SWAT apresentar melhores resultados estatisticamente, o HEC-HMS realizou uma simulação mais precisa da vazão.

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2022 indicou que as mudanças climáticas são incontestáveis e que os riscos relacionados à inundações estão cada vez mais intensos devido as alterações meteorológicas, podendo ocasionar desastres naturais. Os problemas causados por eventos extremos de precipitação têm despertado preocupação mundial, uma vez esses fenômenos resultam em diversos prejuízos (Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas, 2022).

No Brasil, a ocorrência de inundações em áreas urbanas vem crescendo, principalmente, pela urbanização acelerada e pela ocupação inadequada. Além disso, falta infraestrutura nos municípios e as alterações no uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas, bem como o desmatamento ciliar também contribuem para as inundações, favorecendo o aumento do volume de vazão e a velocidade

de propagação da onda de inundação em regiões onde os eventos hidrológicos constituem um risco de desastre natural (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas, 2023).

No estado de Minas Gerais, em janeiro de 2020, aconteceu um evento extremo de precipitação – com 320,9 mm em 3 dias na capital Belo Horizonte –, causando a morte de 56 pessoas, deixando inúmeras pessoas desabrigadas e um enorme prejuízo financeiro (Instituto Nacional de Meteorologia, 2021). Dalagnol et al. (2022), realizaram um estudo que sugere que a mudança climática causada pelo homem tornou esse evento com 70% a mais de chances de ocorrer e que o período de retorno é de aproximadamente 4 anos, o que exige uma melhoria no planejamento para mitigação. As lacunas de conhecimento sobre processos hidrológicos em bacias hidrográficas localizadas em Minas Gerais precisam ser supridas e os gestores de recursos hídricos têm demonstrado grande interesse por essa área (Dalagnol et al., 2022).

Nesse sentido, a previsão de vazões constitui uma ferramenta essencial para a compreensão do comportamento hidrológico em bacias hidrográficas, permitindo o mapeamento de áreas mais susceptíveis aos impactos causados por eventos extremos de seca e cheia. Em especial, a estimativa de vazões durante eventos hidrológicos extremos, associados a elevados volumes de precipitação, pode subsidiar a tomada de decisão por parte dos gestores de recursos hídricos, contribuindo para a redução dos riscos e impactos decorrentes desses eventos, uma vez que configuram sérios riscos à integridade da vida humana, ao patrimônio público e privado, bem como à infraestrutura urbana e rural, comprometendo, adicionalmente, a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos.

A utilização de modelos hidrológicos, aliados a técnicas de previsão baseadas em dados observacionais, tem se mostrado uma abordagem promissora para antecipar as respostas hidrológicas sob diferentes cenários. Ademais, a integração de tecnologias como o sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica (SIG) tem ampliado significativamente a capacidade de previsão e contribuído para a tomada de decisões em tempo real.

Apesar dos avanços na área, ainda é limitada a quantidade de estudos que abordam a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas situadas em Minas Gerais, evidenciando uma lacuna no conhecimento científico regional que restringem o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão hídrica nas bacias mineiras.

Sendo assim, tendo em vista os eventos extremos ocorridos recentemente em diversos municípios mineiros tanto de escassez como de cheia e o potencial dos estudos de modelagem hidrológica nas bacias hidrográficas localizadas em Minas Gerais, este trabalho tem como objetivo principal a implementação do modelo HEC-HMS para a porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco, como forma de auxiliar os gestores de recursos hídricos nas tomadas de decisões nessa bacia. Nesse contexto, propõe-se, ainda, realizar a previsão de vazão considerando o período de 2025 a 2034 para essa mesma área utilizando os dados do conjunto NEX-GDDP-CMIP6.

Para isso, pretende-se:

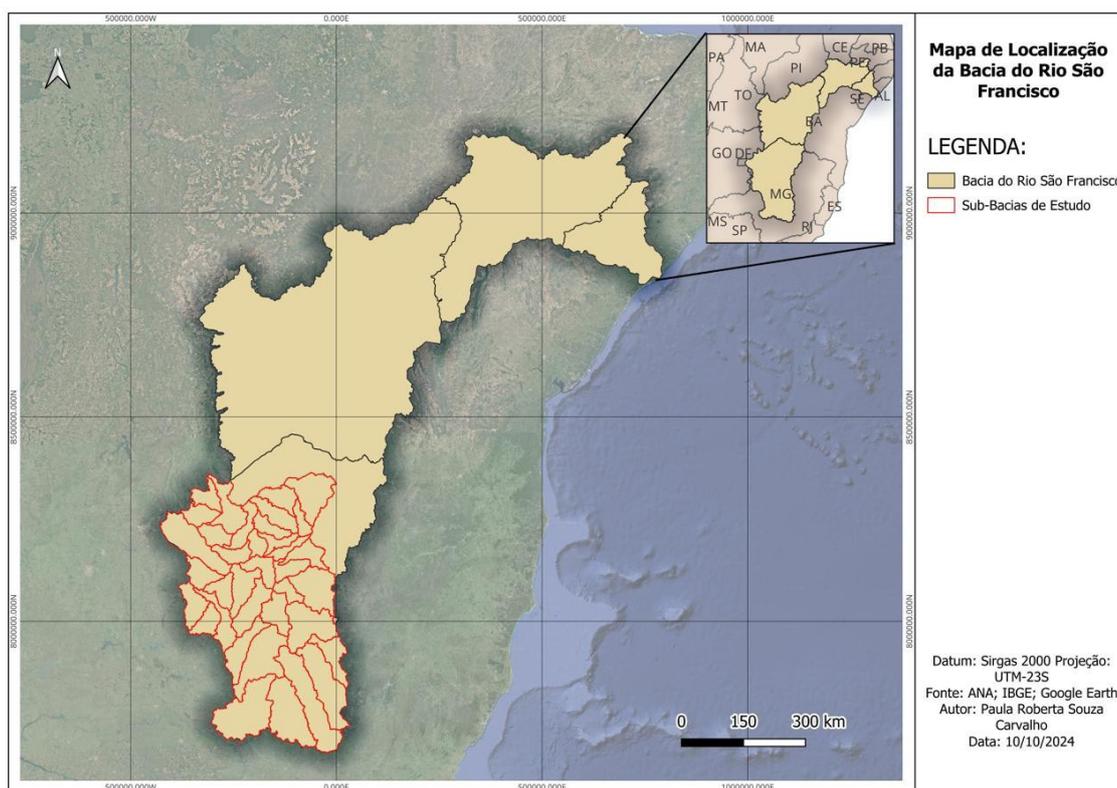
- Parametrizar o modelo HEC-HMS na porção da bacia do rio São Francisco localizada no estado de Minas Gerais;
- Calibrar e validar o modelo HEC-HMS em cada uma dessas bacias utilizando dados de precipitação estimados pelo CHIRPS e séries históricas de estações fluviométricas convencionais da rede hidrometeorológica nacional;
- Reproduzir o comportamento da vazão no período entre os anos de 2019 a 2022 em que ocorreram cheias consideráveis nesta bacia, utilizando o modelo HEC-HMS devidamente calibrado; e
- Realizar a previsão de vazão na parte da bacia do São Francisco situada em Minas Gerais para o período de 2025 a 2034 utilizando o modelo ACCESS-CM2 (NEX-GDDP-CMIP6) e considerando dois cenários: SSP2-4.5 (moderado) e SSP5-8.5 (pessimista).

O presente trabalho faz parte do Projeto de Pesquisa “Caracterização Hidrológica e Modelagem Chuva-Vazão nas Principais Bacias Hidrográficas de Minas Gerais” apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), processo APQ01226-22.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio São Francisco que é uma das 12 regiões hidrográficas brasileiras foi dividida, para fins de planejamento, em quatro zonas ou regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco, conforme demonstra a Figura 1 (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023a). A área de estudo possui 221.029 km<sup>2</sup> e está inserida no Alto São Francisco que abrange 106 municípios e possui a maior concentração da população da bacia (Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco, 2023).



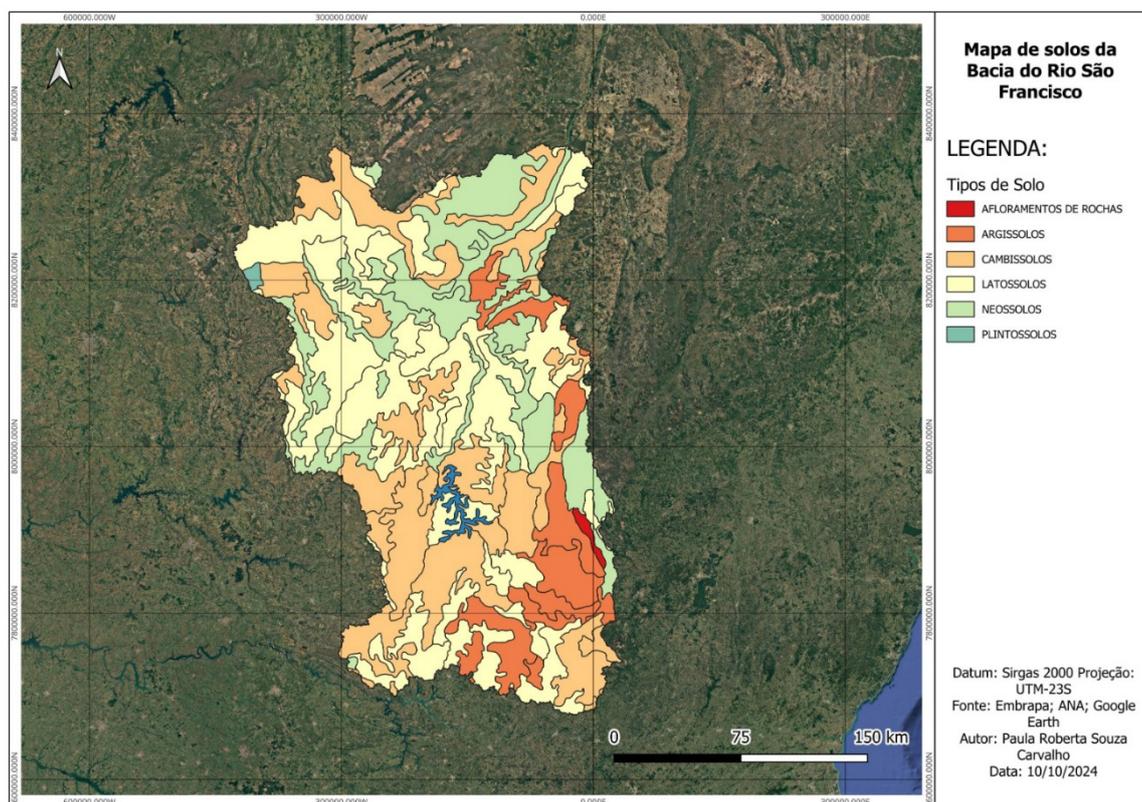
**Figura 1.** Mapa de localização da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco

O rio São Francisco possui 36 afluentes mais importantes, dentre os quais podem-se destacar: pela margem direita, os rios Pará, Paraopeba, Velhas e Verde Grande e, pela margem esquerda, os rios Abaeté, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Carinhanha, Corrente e Grande (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023a).

No que tange ao clima, apresenta uma transição do úmido para o árido e sua temperatura média anual pode variar de 18 a 27°C. Os valores mais altos da pluviosidade, cerca de 1.400 mm, ocorrem nas nascentes dos rios. O período mais chuvoso é de novembro a janeiro e o período mais seco vai de junho a agosto (Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco, 2023).

Diversas formas de relevo são encontradas no Alto São Francisco, tais como: relevos planos, suave ondulado, ondulado, forte ondulado, montanhoso e escarpado (Souza, 2017). As altitudes na porção mineira da bacia do rio São Francisco apresentam uma grande variação. A altitude máxima é encontrada na nascente do rio, localizada na Serra da Canastra, em Minas Gerais, com cerca de 1.200 m (Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco, 2023).

Conforme indicado na Figura 2, os solos que predominam na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco compreendem os tipos de Latossolos, Cambissolos e Argissolos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999).



**Figura 2.** Mapa de solos da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco

### Base de dados

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido através do plug-in OpenTopography DEM no software QGIS – software de acesso livre e gratuito. Esse complemento permite baixar dados de MDE Globais como STRM, Copernicus, ALOS, NASADEM, entre outros. No presente trabalho, utilizou-se o SRTM 30 m.

O mapa de solo da bacia hidrográfica (escala 1:5.000.000) foi obtido no site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), enquanto o mapa de uso e cobertura da terra foi obtido da coleção 9 do MapBiomas.

Os dados de precipitação, por sua vez, foram obtidos por meio do produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) (Funk et al., 2015) – conjunto de dados de precipitação coletados a partir de observações locais e remotas de alta resolução espacial (0.05°) – utilizando o Google Earth Engine (GEE) (Google Earth Engine, 2023).

Os dados hidrometeorológicos das estações fluviométricas convencionais, ou seja, registros diários dos observadores e de medições feitas em campo foram obtidos no Portal do HidroWeb (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023b) – ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) – que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH).

Foram analisadas todas as estações fluviométricas localizadas na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco e escolhidas as estações que possuíam dados completos no período da calibração (01 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2017) e da validação (01 de janeiro de 2019 a 31 de dezembro de 2022). Já os dados históricos de defluência do reservatório foram retirados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023c) para o período de calibração e validação.

### Modelo HEC-HMS

As etapas da simulação chuva-vazão no software HEC-HMS estão descritas resumidamente no fluxograma apresentado na Figura 3.

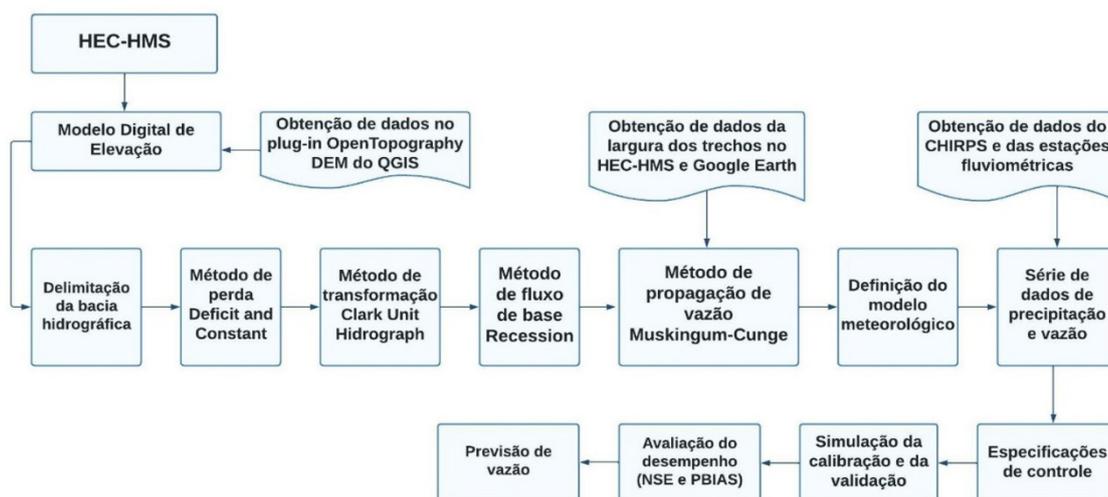


Figura 3. Fluxograma da simulação no HEC-HMS

Primeiramente, o projeto foi criado e realizou-se a delimitação e subdivisão da bacia hidrográfica utilizando os componentes Basin Model e Terrain Data e as ferramentas do GIS Preprocess Sinks, Preprocess Drainage, Identify Streams, Break Points Manager e Delineate Elements. Utilizou-se o elemento Source (fonte) para introduzir o fluxo no ponto da bacia com a presença de Usina Hidrelétrica (UHE) e representar a regularização das vazões.

Os métodos utilizados pelo software HEC-HMS no presente trabalho são:

1. Deficit and Constant: é utilizado para simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas e bastante útil para obter a resposta hidrológica de áreas que têm características específicas de armazenamento e evapotranspiração e indicado para eventos contínuos. O método é baseado no fato que a água disponível em uma bacia pode ser afetada por um "déficit" em relação a sua capacidade de infiltração e armazenamento. Já a constante se refere a um parâmetro de ajuste as condições da bacia como, por exemplo, a taxa de infiltração;
2. Clark Unit Hydrograph: modela como essa precipitação se transforma em escoamento ao longo do tempo, considerando que a água que cai na bacia não se transforma em escoamento instantaneamente, isto é, existe um tempo de concentração, onde a água percorre diferentes caminhos dentro da bacia antes de chegar ao ponto de saída. O hidrograma unitário representa a resposta da bacia a uma chuva uniforme de 1 unidade distribuída em um determinado tempo;
3. Recession: utilizado para simular a fase de recessão do escoamento em bacias hidrográficas, esse método tem a capacidade de redefinir automaticamente após cada evento de tempestade e, conseqüentemente, pode ser usado para simulação contínua; e
4. Muskingum-Cunge: o método de Muskingum-Cunge é muito difundido e utilizado para cálculos de propagação de vazão em rios. Esse método proposto por Cunge (1969) é baseado no intervalo de tempo adequado para a propagação de cheia e no cálculo da celeridade utilizando o coeficiente de Manning e considerando que o rio tem seção transversal simples.

Os dados de entrada necessários de cada sub-bacia para o método de perda Deficit and Constant (Déficit e Constante) são: Initial Deficit (Déficit Inicial em mm), Maximum Storage (Armazenamento máximo em mm), Constant Rate (Taxa constante em mm/hr) e Impervious (Impermeabilidade em %).

No método de transformação Clark Unit Hydrograph (Hidrograma Unitário de Clark), definiu-se o Time Area Method como Default (padrão) e utilizou-se os parâmetros de entrada Time of Concentration (Tempo de concentração em hr), Storage Coefficient (Coeficiente de armazenamento em hr).

O tempo de concentração ( $t_c$ ) controla o tempo de viagem do hidrograma e refere-se ao tempo necessário para que a água oriunda da precipitação atinja um ponto específico da bacia hidrográfica. Pode ser calculado por meio da equação de Dooge apresentada na Equação 1:

$$t_c = 21,88A^{0,77} I^{-0,17} \quad (1)$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em horas;

A = área de drenagem da sub-bacia, em km<sup>2</sup>; e  
I = declividade, em m/m.

O coeficiente de armazenamento, por sua vez, controla o amortecimento do hidrograma e pode ser definido como a razão entre o volume de água armazenado e o volume de água que pode ser potencialmente armazenado. A Equação 2 mostra como é calculado o coeficiente de armazenamento:

$$S = 125,5A^{0,23}L^{-0,7} \quad (2)$$

Onde:

S = coeficiente de armazenamento, em horas;

A = área de drenagem da sub-bacia, em km<sup>2</sup>; e

L = comprimento do rio principal, em km.

Quanto maior o coeficiente de armazenamento, menor o escoamento superficial, uma vez que mais água é retida no solo. A retenção de água influencia na quantidade de água que infiltra no solo e, conseqüentemente, na recarga de aquíferos. A capacidade de armazenamento de água no solo também afeta a evapotranspiração, já que solos irrigados tendem a liberar mais umidade para a atmosfera.

No método de fluxo de base Recession (Recessão), definiu-se o Initial Type (Tipo inicial) como Discharge Per Area (Descarga por área) – o tipo de descarga inicial depende do tamanho da sub-bacia – e o Threshold Flow (Fluxo limite) como Ratio to Peak (Relação ao pico) – limiar de descarga depende do tamanho da sub-bacia –, assim, foram necessários os dados de entrada Initial Discharge (Descarga inicial em m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>), Recession Constant (Constante de recessão) e Ratio to Peak.

A constante de recessão descreve a taxa na qual o fluxo de base recua entre os eventos de tempestade, sendo definida como a razão entre o fluxo de base no momento atual e o fluxo de base um dia antes. Pode variar de 0 a 1, sendo que uma constante de recessão mais próxima de 0 apresenta uma curva de recessão mais íngreme, enquanto a constante de recessão mais próxima de 1 tem como resultado uma curva de recessão mais plana. A razão entre o pico também pode variar de 0 a 1, assim, uma relação de 0,1 significa que o limite seria de 10m<sup>3</sup>/s se o pico de fluxo fosse de 100 m<sup>3</sup>/s.

Para os trechos dos rios utilizou-se os seguintes dados de entrada no método Muskingum-Cunge: Length (comprimento em mm), Slope (declividade em m/m), Manning's n (coeficiente de Manning) e Index Celerity (fluxo de celeridade em m/s) – uma vez que foi o método de índice escolhido. Ademais, definiu-se o Shape (forma) da seção como retangular e calculou o parâmetro Width (largura em m) com ajuda da ferramenta Google Earth.

Em seguida, adicionou-se o componente Time-Series Data Manager e escolheu o tipo Precipitation Gage para incluir os valores referentes aos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS e o tipo Discharge Gage para incluir os dados de vazão das estações fluviométricas utilizadas para calibração.

O componente Meteorologic Models (modelos meteorológicos) foi criado, na sequência, para ligar cada sub-bacia a uma determinada estação. Por fim, adicionou-se o Control Specifications (especificações de controle) e definiu-se a data e o horário de início e de fim do evento e o tempo de intervalo para criar e realizar a simulação utilizando a ferramenta Compute.

O resultado do modelo foi avaliado com base no índice de eficiência de Nash-Stucliffe Efficiency (NSE) – Equação 3 – utilizado para comparar os dados simulados com os dados observados. O valor de NSE varia de -∞ a 1, sendo quanto mais próximo de 1, mais bem representado o modelo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum i(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum i(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

Onde:

$Q_{obs}$  = vazão observada em um determinado período de tempo;

$Q_{sim}$  = vazão simulada em um determinado período de tempo; e

$\overline{Q_{obs}}$  = vazão média das séries históricas observadas que compõem todo o período de simulação.

Para avaliação dos métodos realizou-se ainda uma comparação com base no viés percentual – Percent Bias (PBIAS). O viés percentual mede a tendência do modelo de subestimar ou superestimar os valores assumidos por uma variável e é calculado pela Equação 4:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum i(Qobs - Qsim).(100)}{\sum i(Qobs)} \right] \quad (4)$$

Onde:

$Qobs$  = vazão observada em um determinado período de tempo; e

$Qsim$  = vazão simulada em um determinado período de tempo.

Se o valor do erro de viés for positivo indica que o modelo está superestimando os valores, por outro lado, se o valor for negativo, significa que o modelo está subestimando os valores.

O manual de referência técnica do HEC-HMS fornece uma tabela para avaliação do desempenho do modelo baseado – adaptada de Moriasi et al. (2007) – na avaliação do NSE e do PBIAS, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** 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 (US Army Corps of Engineers, 2023).

É importante salientar que os valores de referência são para dados de fluxo contínuo em intervalos de tempos diários e mensais na escala da bacia hidrográfica. Entretanto, os valores aceitáveis das estatísticas resumidas variam de acordo com cada projeto, dependendo da etapa de tempo, da incerteza nos dados observados e das condições de limite e do escopo do projeto.

A calibração foi realizada de montante para jusante manualmente, por tentativa e erro, alterando um parâmetro por vez a fim de observar os parâmetros mais sensíveis aos índices de eficiência NSE e PBIAS.

Em seguida, realizou-se a previsão de vazão para a parte da bacia hidrográfica do São Francisco localizada em Minas Gerais utilizando o Accessible Community Climate Model 2 (ACCESS-CM2) que simula interações entre o clima, a superfície terrestre e os recursos hídricos – cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 fazem parte dos Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) utilizados em modelagens climáticas para analisar os impactos das mudanças do clima sob diferentes condições socioeconômicas. O SSP2-4.5 é um cenário de mitigação moderada das mudanças climáticas, onde as emissões de gases de efeito estufa são controladas, podendo ser considerado moderado. Assim, as simulações neste cenário podem prever chuvas intensas que apesar de frequentes, não são tão severas. Por sua vez, o cenário SSP5-8.5 é considerado pessimista, onde há um aumento de gases do efeito estufa, ocasionando um aquecimento global mais acentuado. As simulações neste cenário representam um aumento na frequência e na intensidade de eventos extremos, podendo resultar em inundações.

Por fim, obteve-se a curva de permanência para as estações calibradas localizadas na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco – Santo Hipólito, Pirapora Barreira e Manga – utilizando os dados da série histórica de vazão obtidos no Hidroweb e do ACCESS-CM2 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

### Modelo HEC-HMS da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco

A porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco foi delimitada considerando a foz da bacia na estação fluviométrica Manga (cód. 44500000) com a finalidade de realizar a modelagem apenas na área que está localizada em Minas Gerais, pertencente ao Alto São Francisco. Assim, a bacia hidrográfica foi discretizada em 36 sub-bacias para representar o modelo da melhor forma possível, conforme indicado na Figura 4.



**Figura 4.** Projeto da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco no HEC-HMS

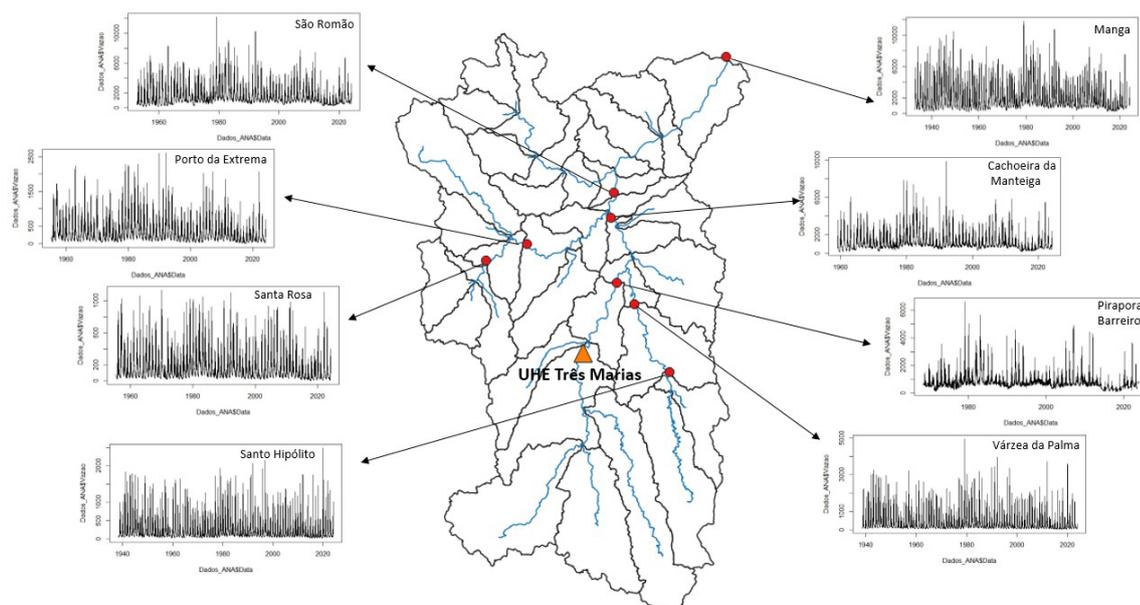
A Tabela 2 apresenta as estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Por sua vez, a Figura 5 indica a localização de cada estação fluviométrica no mapa da bacia e sua respectiva série temporal de dados de vazão.

**Tabela 2.** Estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia do rio São Francisco

Código da Estação	Nome da Estação	Rio	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )
41135000	Pirapora Barreiro	Rio São Francisco	-17,3692	-44,9431	62200
41818000	Santo Hipólito	Rio das Velhas	-18,3061	-44,2258	16600
41990000	Várzea da Palma	Rio das Velhas	-17,5961	-44,7133	26500
42210000	Cachoeira da Manteiga	Rio São Francisco	-16,6572	-45,0808	107000
42395000	Santa Rosa	Rio Paracatu	-17,255	-46,4728	12800
42690001	Porto da Extrema	Rio Paracatu	-17,0303	-46,0136	30100
43200000	São Romão	Rio São Francisco	-16,3719	-45,0664	15400
44500000	Manga	Rio São Francisco	-14,7572	-43,9322	202000

Conforme já citado, a simulação da calibração foi realizada utilizando os dados monitorados do período de 01 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2017. Por sua vez, a simulação da validação foi feita na data de 01 de janeiro de 2019 até o dia 31 dezembro 2022, compreendendo um período bastante chuvoso – janeiro e fevereiro de 2020 – na região da bacia do rio São Francisco.

Os resultados das variáveis calibradas para cada uma das sub-bacias da simulação estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5 e dos trechos na Tabela 6.



**Figura 5.** Série temporal das vazões nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco

**Tabela 3.** Parâmetros do método Deficit and Constant calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	Déficit Inicial (mm)	Armazenamento Máximo (mm)	Taxa Constante (mm/hr)	Impermeável (%)
Sub-bacia 1	10	100	4,6	15
Sub-bacia 2	10	100	4,6	1
Sub-bacia 3	10	100	4,6	25
Sub-bacia 4	10	100	4,6	15
Sub-bacia 5	10	100	4,6	5
Sub-bacia 6	10	100	4,6	15
Sub-bacia 7	10	100	4,6	2
Sub-bacia 8	10	100	4,6	15
Sub-bacia 9	10	100	4,6	15
Sub-bacia 10	10	100	4,6	5
Sub-bacia 11	10	100	4,6	5
Sub-bacia 12	10	100	4,6	15
Sub-bacia 13	10	100	1	40
Sub-bacia 14	10	100	1	0
Sub-bacia 15	10	100	4,6	10
Sub-bacia 16	10	100	1	2
Sub-bacia 17	10	100	1	5
Sub-bacia 18	10	100	1	5
Sub-bacia 19	10	100	4,6	15
Sub-bacia 20	10	100	4,6	5
Sub-bacia 21	10	100	1	30
Sub-bacia 22	10	100	4,6	2
Sub-bacia 23	10	100	4,6	25
Sub-bacia 24	10	100	4,6	5

**Tabela 3.** Continuação...

Sub-bacia	Déficit Inicial (mm)	Armazenamento Máximo (mm)	Taxa Constante (mm/hr)	Impermeável (%)
Sub-bacia 25	10	100	1	15
Sub-bacia 26	10	100	4,6	5
Sub-bacia 27	10	100	4,6	5
Sub-bacia 28	10	100	4,6	12
Sub-bacia 29	10	100	4,6	2
Sub-bacia 30	10	100	4,6	5
Sub-bacia 31	10	100	4,6	5
Sub-bacia 32	10	100	1,2	45
Sub-bacia 33	10	100	4,6	5
Sub-bacia 34	10	100	4,6	20
Sub-bacia 35	10	100	1	25
Sub-bacia 36	10	100	1,2	10

**Tabela 4.** Parâmetros do método Clark Unit Hydrograph calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	Tempo de concentração (hr)	Coefficiente de armazenamento (hr)
Sub-bacia 1	3473,8	147,00625	265,0514621	24,88
Sub-bacia 2	4328,4	165,85986	284,1747763	24,05
Sub-bacia 3	3609,6	159,77241	265,466813	23,68
Sub-bacia 4	11049,9	360,22671	365,7685286	17,34
Sub-bacia 5	3522,6	143,03243	267,8165526	25,45
Sub-bacia 6	3265,9	165,30680	253,3255985	22,60
Sub-bacia 7	4303,7	210,47830	272,2558924	20,33
Sub-bacia 8	4273,4	178,77510	279,1079946	22,76
Sub-bacia 9	4682,8	137,24314	303,0966999	27,97
Sub-bacia 10	9577,2	226,10208	373,3561858	23,24
Sub-bacia 11	6465,9	229,22538	317,0739345	21,03
Sub-bacia 12	3654,5	153,23517	268,7174357	24,45
Sub-bacia 13	6319,0	277,70657	304,0209397	18,29
Sub-bacia 14	2254,9	162,28825	218,3135552	21,02
Sub-bacia 15	12887,4	510,91638	367,1095003	14,06
Sub-bacia 16	13360,0	296,93129	408,579386	20,74
Sub-bacia 17	15438,4	369,65900	417,684191	18,39
Sub-bacia 18	14966,9	506,74995	390,8736979	14,64
Sub-bacia 19	6506,1	248,55199	313,536342	19,90
Sub-bacia 20	3728,4	140,78829	274,862335	26,07
Sub-bacia 21	12174	327,09653	386,8833683	18,97
Sub-bacia 22	3799,7	177,54428	266,2946233	22,26
Sub-bacia 23	5006,9	256,37079	280,1321289	18,34
Sub-bacia 24	2569,3	122,88067	241,4677779	26,32
Sub-bacia 25	5419,4	164,42063	312,071954	25,48
Sub-bacia 26	2541,8	123,50788	240,1967839	26,16
Sub-bacia 27	3476,7	145,56939	265,585259	25,06
Sub-bacia 28	5805,4	205,57852	309,038284	22,14
Sub-bacia 29	3173,0	136,93580	258,4890537	25,61
Sub-bacia 30	2324,8	111,17157	235,7471639	27,59
Sub-bacia 31	2479,1	108,46480	243,0573603	28,49
Sub-bacia 32	5503,3	322,28186	280,0933051	15,97
Sub-bacia 33	4981,0	191,64256	293,7132007	22,45
Sub-bacia 34	9322,7	196,58764	378,141953	25,48

**Tabela 4.** Continuação...

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	Tempo de concentração (hr)	Coefficiente de armazenamento (hr)
Sub-bacia 35	3926,0	142,93805	280,0217747	26,10
Sub-bacia 36	10857	234,88120	390,5207795	23,30

**Tabela 5.** Parâmetros do método Recession calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	Descarga Inicial (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Constante de Recessão	Relação ao Pico
Sub-bacia 1	0	0,8	0,8
Sub-bacia 2	0	0,8	0,8
Sub-bacia 3	0	0,8	0,8
Sub-bacia 4	0	0,6	0,6
Sub-bacia 5	0	0,8	0,8
Sub-bacia 6	0	0,8	0,8
Sub-bacia 7	0	0,6	0,6
Sub-bacia 8	0	0,6	0,6
Sub-bacia 9	0	0,5	0,5
Sub-bacia 10	0	0,6	0,6
Sub-bacia 11	0	0,8	0,8
Sub-bacia 12	0	0,5	0,5
Sub-bacia 13	0	0,8	0,8
Sub-bacia 14	0	0,8	0,8
Sub-bacia 15	0	0,6	0,6
Sub-bacia 16	0	0,8	0,8
Sub-bacia 17	0	0,8	0,8
Sub-bacia 18	0	0,8	0,8
Sub-bacia 19	0	0,8	0,8
Sub-bacia 20	0	0,8	0,8
Sub-bacia 21	0	0,8	0,8
Sub-bacia 22	0	0,8	0,8
Sub-bacia 23	0	0,5	0,5
Sub-bacia 24	0	0,6	0,6
Sub-bacia 25	0	0,8	0,8
Sub-bacia 26	0	0,8	0,8
Sub-bacia 27	0	0,6	0,6
Sub-bacia 28	0	0,8	0,8
Sub-bacia 29	0	0,8	0,8
Sub-bacia 30	0	0,8	0,8
Sub-bacia 31	0	0,8	0,8
Sub-bacia 32	0	0,6	0,6
Sub-bacia 33	0	0,8	0,8
Sub-bacia 34	0	0,8	0,8
Sub-bacia 35	0	0,8	0,8
Sub-bacia 36	0	0,9	0,9

**Tabela 6.** Parâmetros do método Muskingum-Cunge calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco

Trecho	Comprimento (m)	Declividade (m/m)	Coefficiente de Manning	Índice de Celeridade (m <sup>3</sup> /s)	Largura (m)
Reach-1	158,14022	0,00008	0,025	1,5	90
Reach-2	90,88431	0,00009	0,025	1,5	450
Reach-3	64,98758	0,00008	0,025	1,5	500

**Tabela 6.** Continuação...

Trecho	Comprimento (m)	Declividade (m/m)	Coefficiente de Manning	Índice de Celeridade (m <sup>3</sup> /s)	Largura (m)
Reach-4	31,78721	0,00013	0,025	1,5	400
Reach-5	46,50696	0,00009	0,025	1,5	385
Reach-6	27,78229	0,00018	0,025	1,5	385
Reach-7	142,00494	0,00021	0,025	1,5	400
Reach-8	126,01883	0,00045	0,025	1,5	320
Reach-9	114,68646	0,00016	0,04	1,5	140
Reach-10	268,78909	0,00021	0,025	1,5	310
Reach-12	10,000000	0,00025	0,025	1,5	212
Reach-13	67,714000	0,00024	0,025	1,5	267
Reach-14	101,75859	0,00021	0,025	1,5	180
Reach-15	53,83727	0,00017	0,025	1,5	234
Reach-16	104,71859	0,00018	0,025	1,5	100
Reach-18	104,55461	0,0004	0,025	1,5	203
Reach-19	39,36021	0,00028	0,04	1,5	150
Reach-20	74,26196	0,00018	0,025	1,5	100
Reach-21	31,52337	0,00006	0,025	1,5	290
Reach-22	12,20259	0,00001	0,025	1,5	380
Reach-23	32,14247	0,00012	0,025	1,5	550
Reach-24	51,21881	0,00008	0,025	1,5	450
Reach-25	133,16565	0,00008	0,025	1,5	600
Reach-26	30,81678	0,00016	0,025	1,5	100
Reach-27	79,06439	0,00016	0,025	1,5	180
Reach-28	77,86121	0,00013	0,025	1,5	190
Reach-29	68,74604	0,00013	0,04	1,5	110
Reach-30	153,67218	0,00026	0,025	1,5	110

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estações fluviométricas calibradas com os respectivos períodos de calibração e validação e os valores de NSE/PBIAS estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7.** Valores encontrados do PBIAS/NSE no período de calibração e validação para as estações fluviométricas da porção mineira da bacia do rio São Francisco

Código	Estação	Rio	Calibração		Validação	
			2010 a 2017		2019 a 2022	
			PBIAS (%)	NSE	PBIAS (%)	NSE
41135000	Pirapora Barreiro	Rio São Francisco	8,33	0,826	13,48	0,844
41818000	Santo Hipólito	Rio das Velhas	-4,46	0,542	-12,05	0,656
41990000	Várzea da Palma	Rio das Velhas	-10,18	0,612	7,90	0,648
42210000	Cachoeira da Manteiga	Rio São Francisco	0,29	0,824	5,05	0,831
42395000	Santa Rosa	Rio Paracatu	-11,32	0,494	-2,18	0,563
42690001	Porto da Extrema	Rio Paracatu	-11,88	0,431	-6,04	0,437
43200000	São Romão	Rio São Francisco	-1,12	0,727	1,69	0,761
44500000	Manga	Rio São Francisco	0,93	0,613	0,58	0,570

Os resultados da calibração e validação estão apresentados nos hidrogramas calculados a partir dos dados de entrada, conforme indicado nas Figuras de 6 a 21.

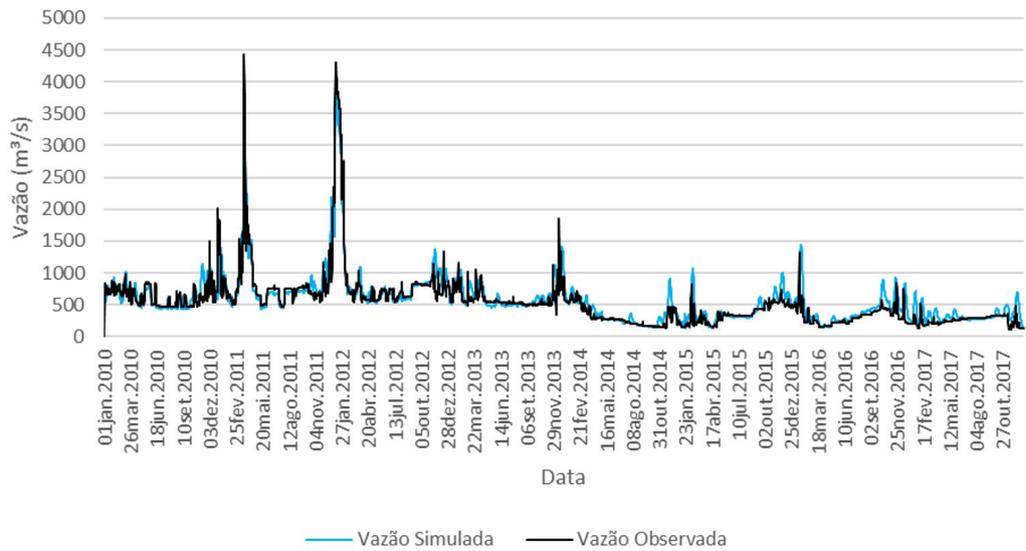


Figura 6. Hidrograma do período de calibração para a estação Pirapora Barreiro

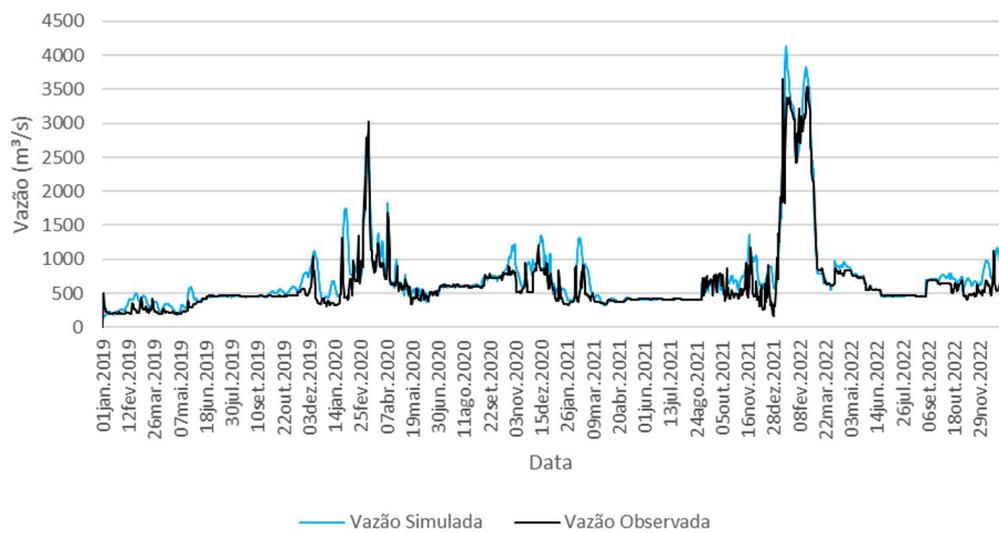


Figura 7. Hidrograma do período de validação para a estação Pirapora Barreiro

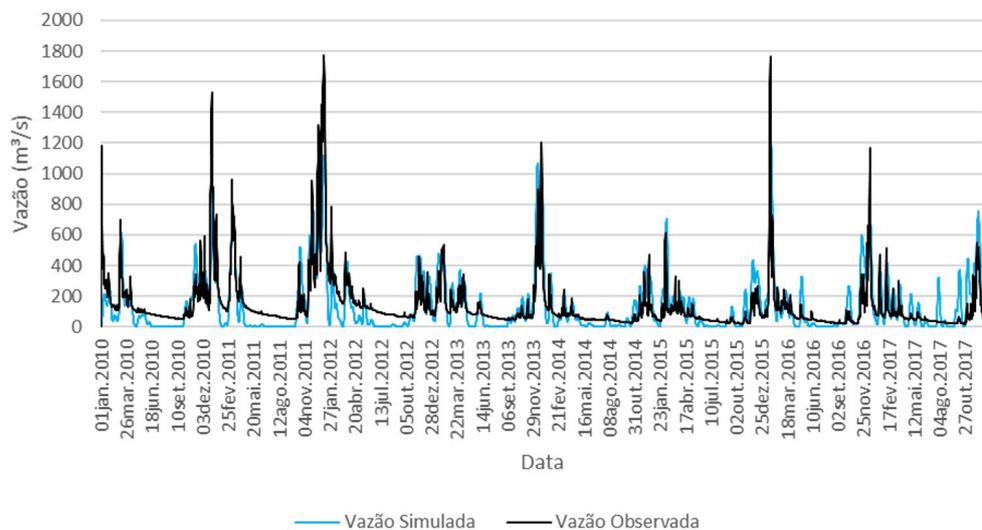
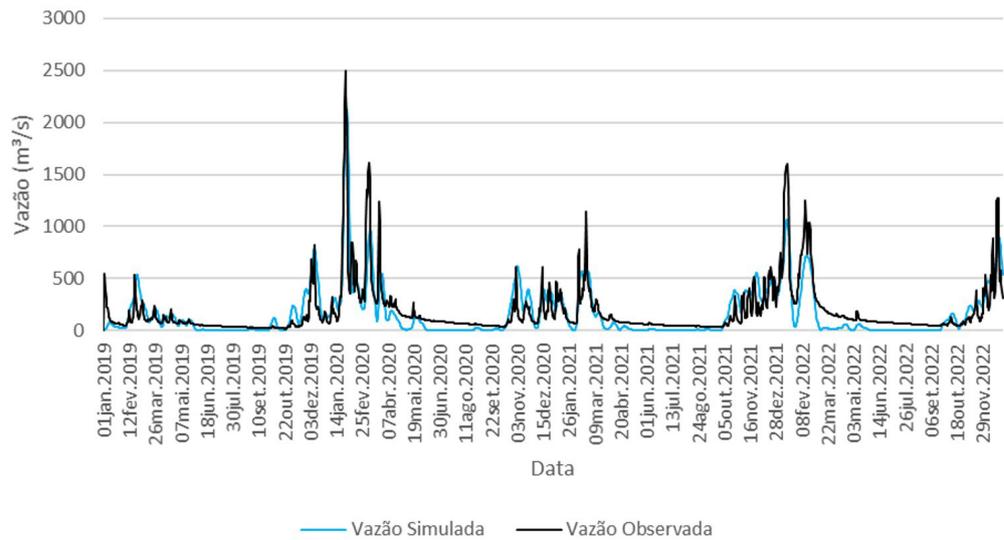
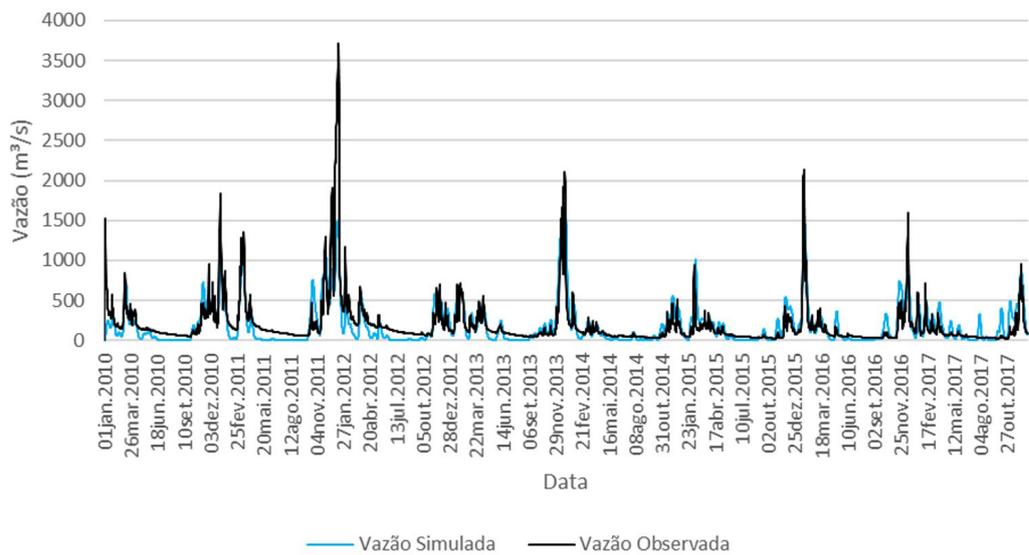


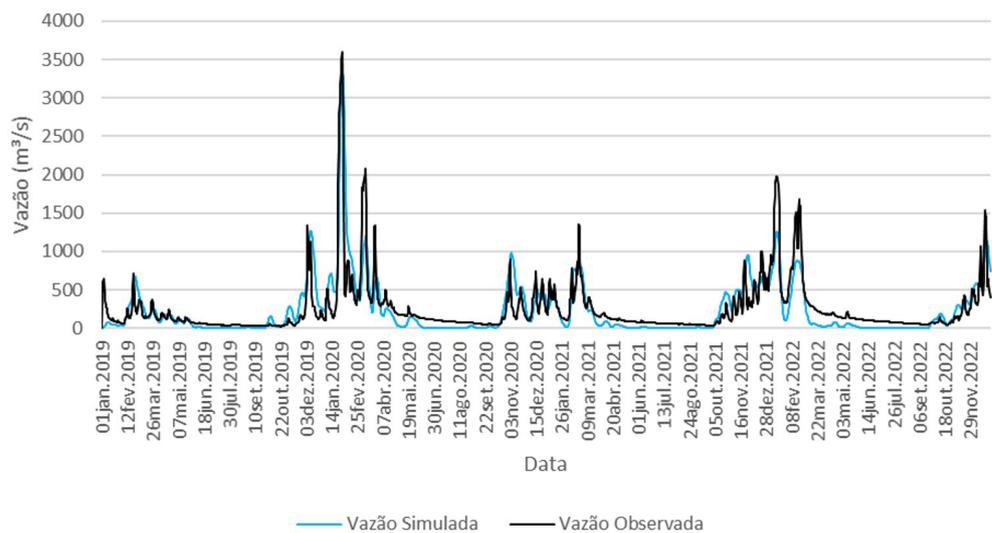
Figura 8. Hidrograma do período de calibração para a estação Santo Hipólito



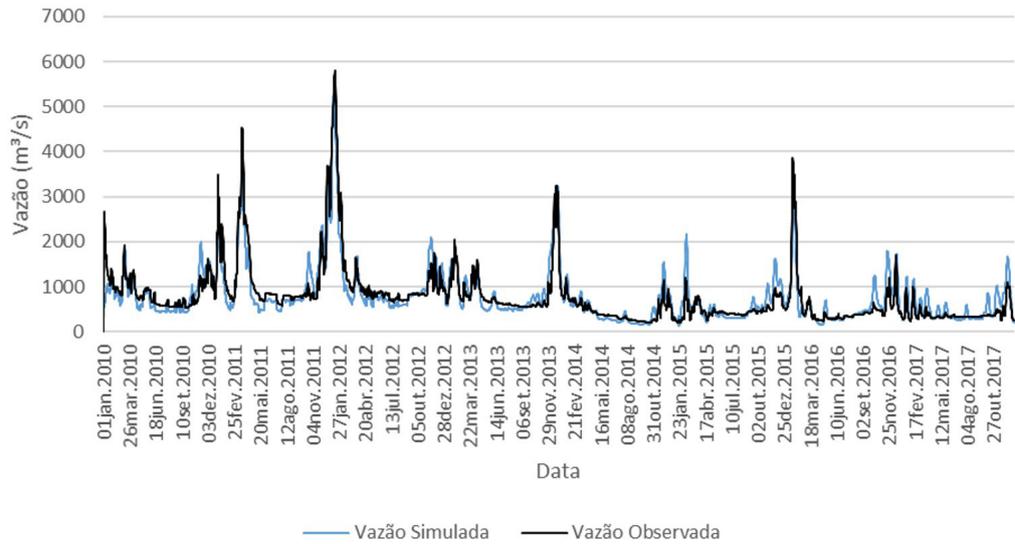
**Figura 9.** Hidrograma do período de validação para a estação Santo Hipólito



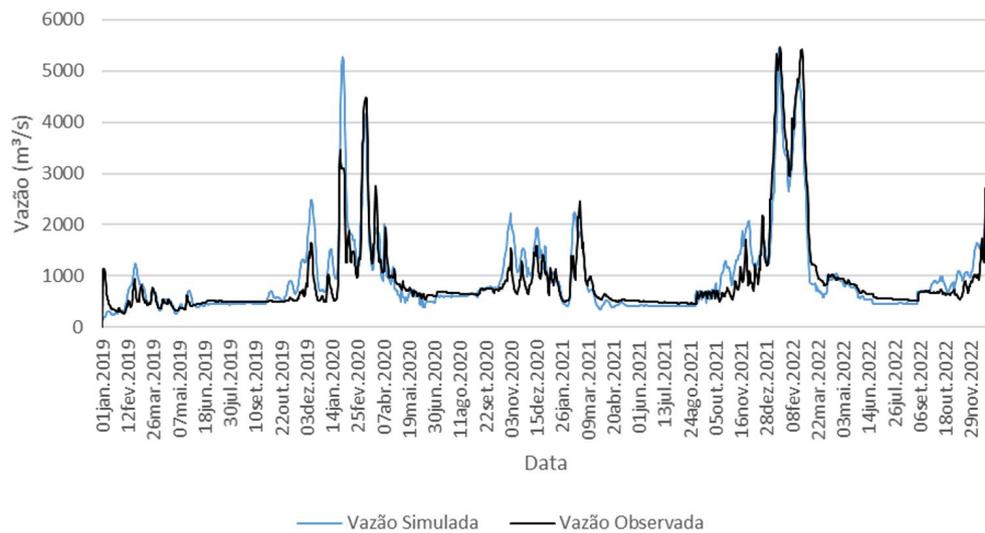
**Figura 10.** Hidrograma do período de calibração para a estação Várzea da Palma



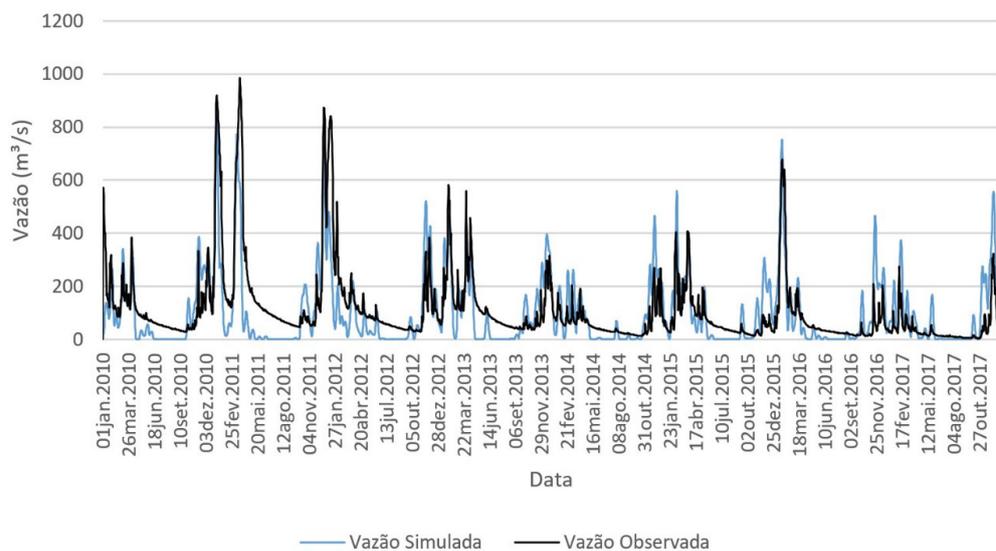
**Figura 11.** Hidrograma do período de validação para a estação Várzea da Palma



**Figura 12.** Hidrograma do período de calibração para a estação Cachoeira da Manteiga



**Figura 13.** Hidrograma do período de validação para a estação Cachoeira da Manteiga



**Figura 14.** Hidrograma do período de calibração para a estação Santa Rosa

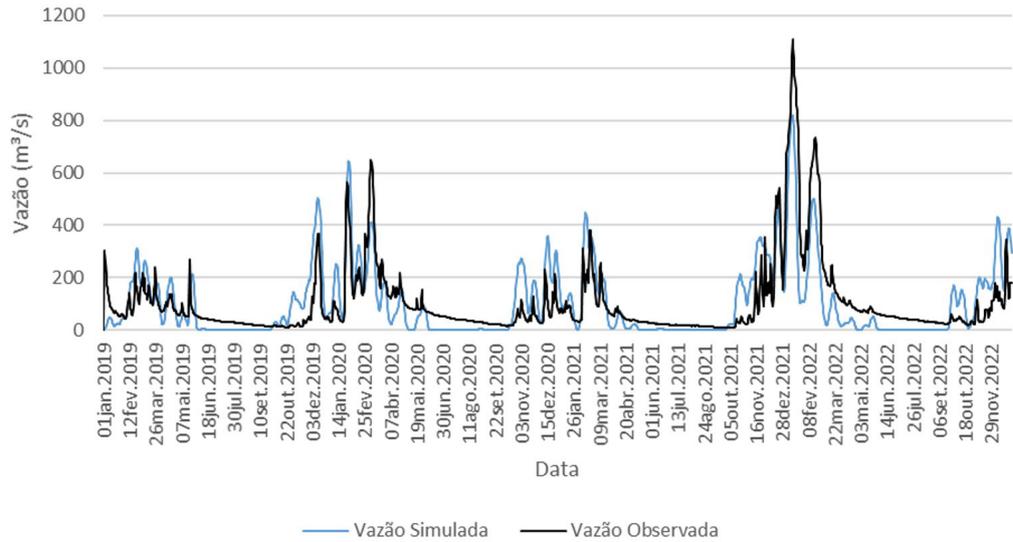


Figura 15. Hidrograma do período de validação para a estação Santa Rosa

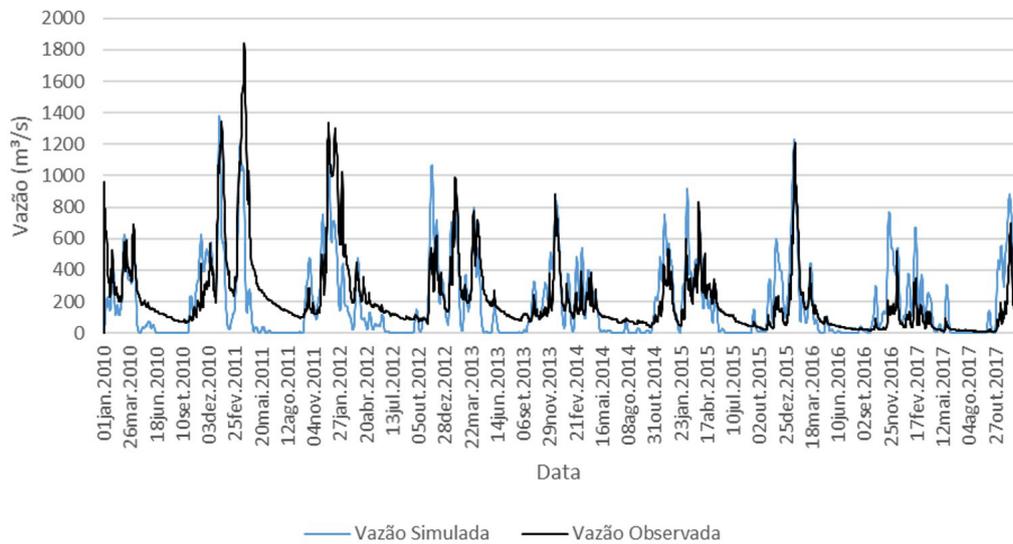


Figura 16. Hidrograma do período de calibração para a estação Porto da Extrema

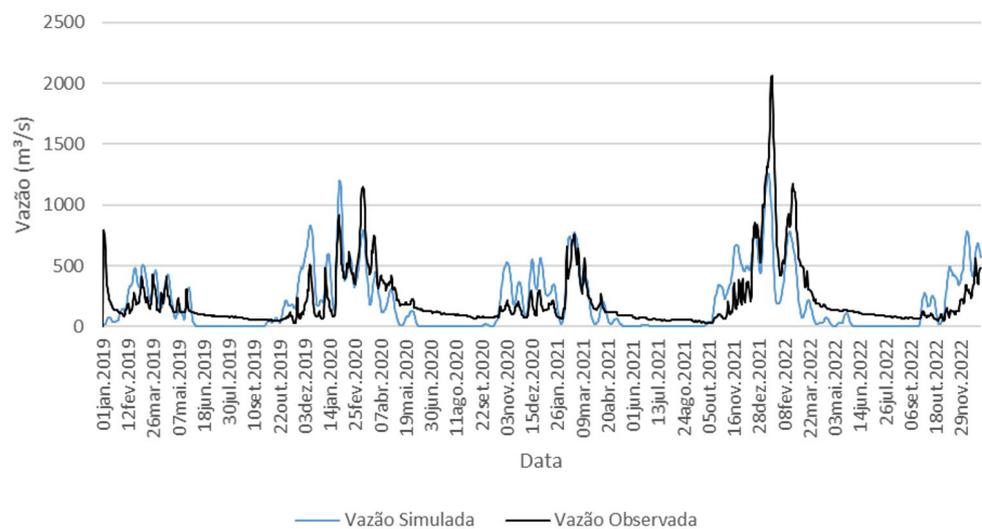


Figura 17. Hidrograma do período de validação para a estação Porto da Extrema

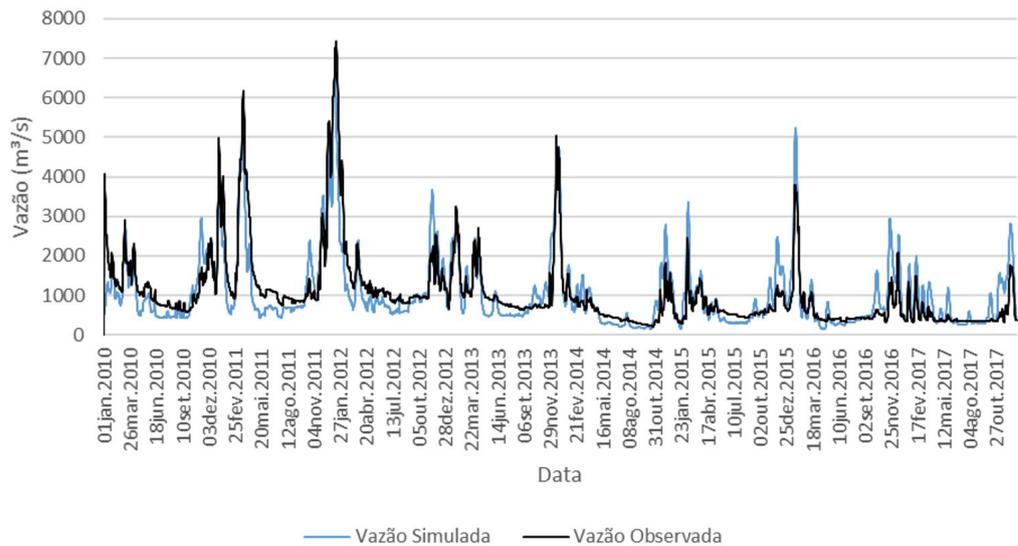


Figura 18. Hidrograma do período de calibração para a estação São Romão

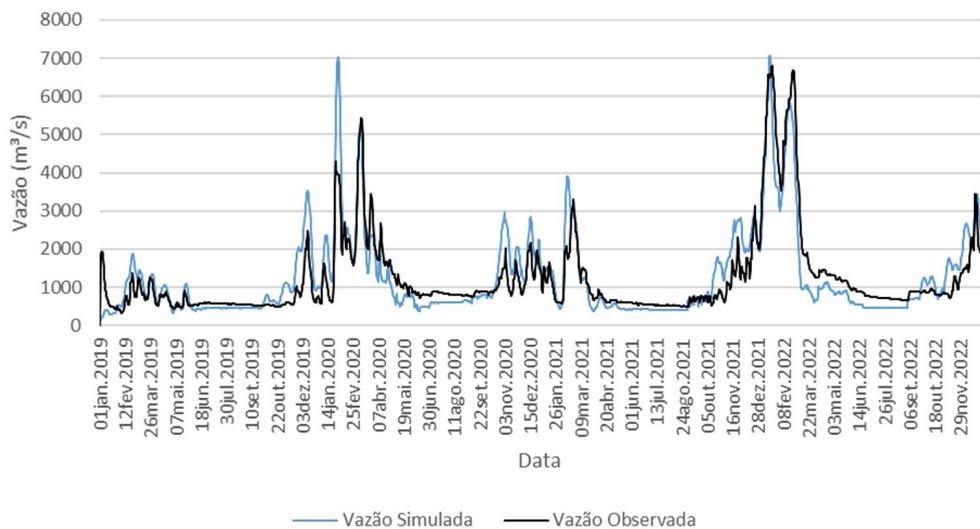


Figura 19. Hidrograma do período de validação para a estação São Romão

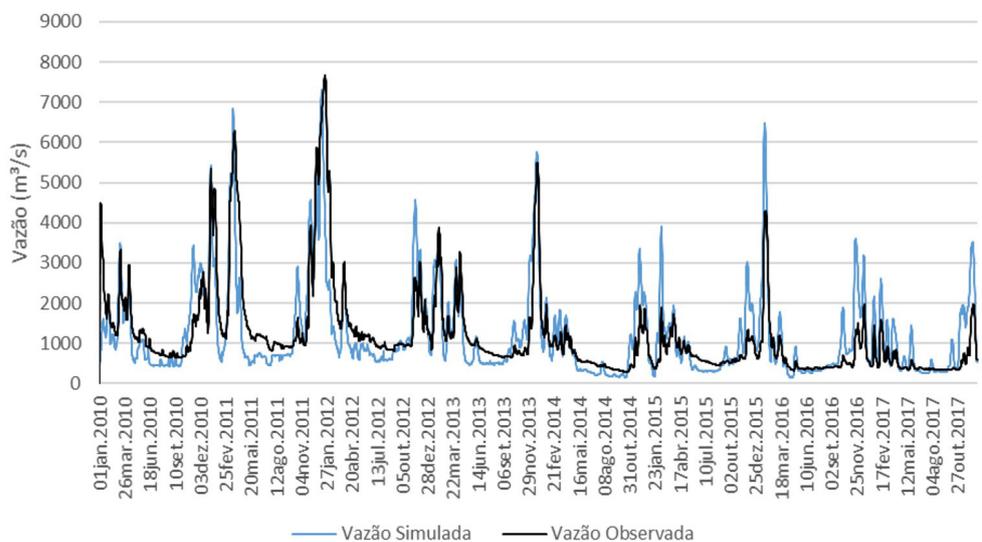
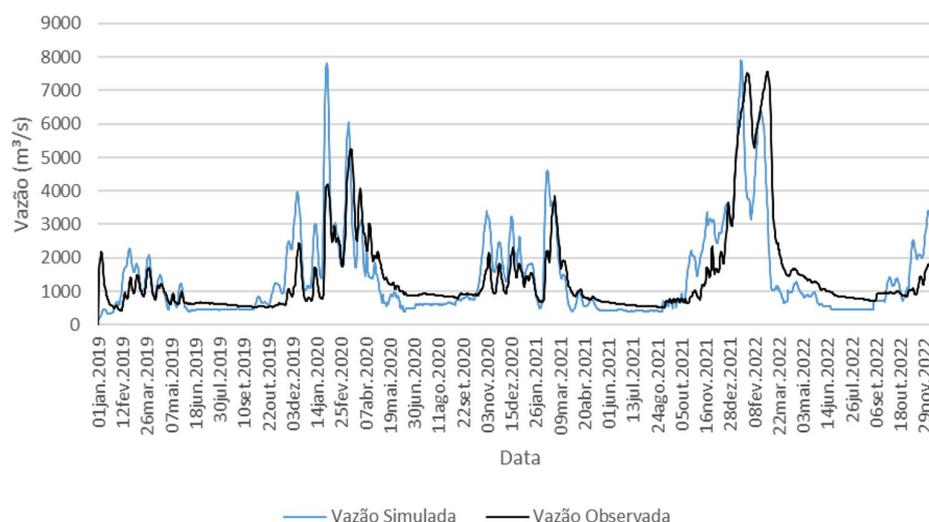


Figura 20. Hidrograma do período de calibração para a estação Manga



**Figura 21.** Hidrograma do período de validação para a estação Manga

A calibração e validação do modelo nas sub-bacias pertencentes ao Alto São Francisco apresentaram resultados classificados como “bom a muito bom” de acordo com a classificação de desempenho do USACE (US Army Corps of Engineers, 2023) na maioria das áreas analisadas. As sub-bacias localizadas próximas à calha principal do rio São Francisco tiveram um bom desempenho, graças ao aumento das vazões e a presença de rios perenes, que facilitam a calibração do modelo.

No entanto, observou-se maior dificuldade na sub-bacia do rio das Velhas, pelo fato dos rios da margem direita serem intermitentes. Por sua vez, os valores satisfatórios encontrados nas estações localizadas no rio Paracatu podem ser explicados pela demanda de irrigação na sub-bacia.

De modo geral, observou-se um aumento do NSE na maioria das sub-bacias na validação, com exceção da estação Manga. As estações apresentaram valores desse coeficiente variando entre 0,437 e 0,844, indicando que o ajuste do modelo continua sendo bom. O PBIAS, por sua vez, apresentou somente resultados classificados como “muito bom” tanto na calibração quanto na validação.

Rocha et al. (2023) realizaram a calibração do Modelo HEC-HMS para as sub-bacias do Alto São Francisco utilizando como dados de entrada as precipitações do satélite Global Precipitation Measurement (GPM) e das estações fluviométricas com dados obtidos no Hidroweb. Obtiveram valores de coeficiente de NSE entre 0,636 e 0,982 (calibração) e 0,263 e 0,994 (validação), utilizando os métodos Soil Moisture Accounting (SMA), Clark Unit Hydrograph e Muskingum-Cunge.

A título de comparação, os valores obtidos de NSE no presente trabalho, foram de 0,431 a 0,826 para a calibração e 0,437 a 0,844 para a validação, ou seja, não apresentaram nenhum resultado insatisfatório, indicando que os métodos utilizados podem representar com coerência as vazões da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

### **Previsão de vazão para a porção mineira da bacia do rio São Francisco**

Considerando que a porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco apresentou bons resultados de calibração e validação, o passo seguinte foi realizar a previsão de vazão desta bacia no período de 01 de janeiro de 2025 a 31 de dezembro de 2034.

As Figuras 22 a 29 demonstram os gráficos dos resultados da vazão ( $m^3/s$ ) durante esse período de 10 anos para as estações que foram utilizadas na calibração e validação na simulação da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco no HEC-HMS considerando os cenários SSP2-4.5 (moderado) e SSP5-8.5 (pessimista).

Os hidrogramas demonstram que apesar do comportamento das vazões ter sido semelhante nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, o tipo de cenário influenciou a intensidade do pico de descarga e a data em que ocorreu o maior pico.

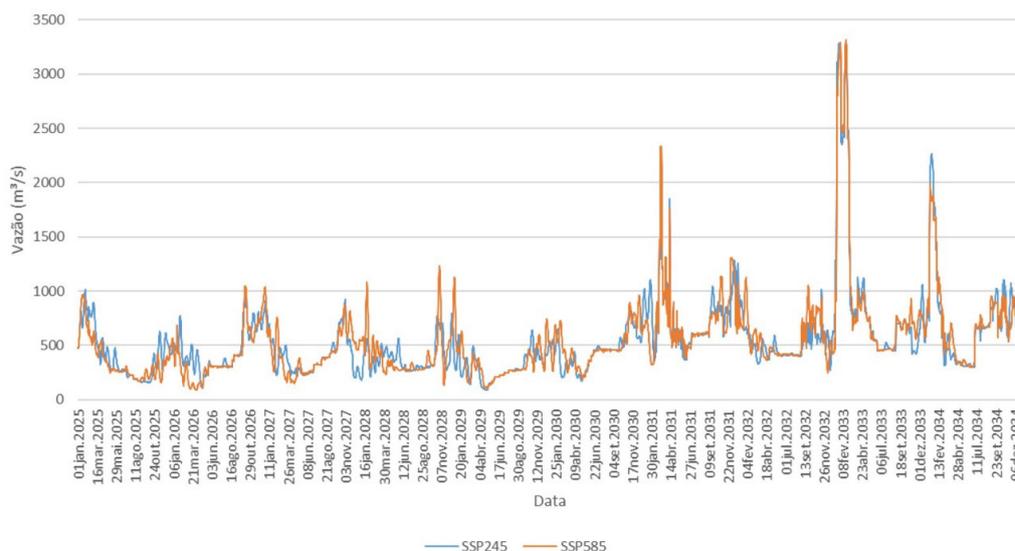


Figura 22. Previsão de vazão para a Estação Pirapora Barreiro nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

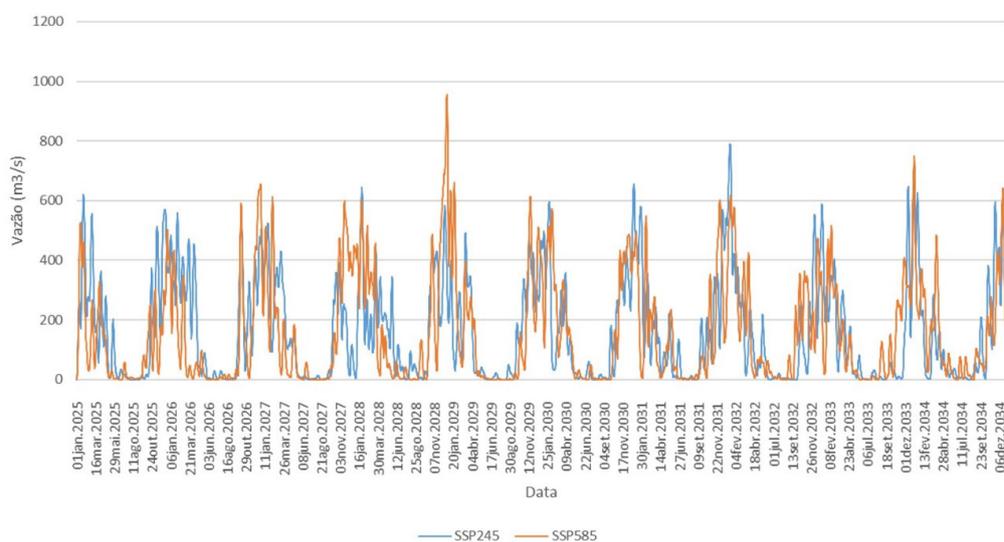


Figura 23. Previsão de vazão para a Estação Santo Hipólito nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

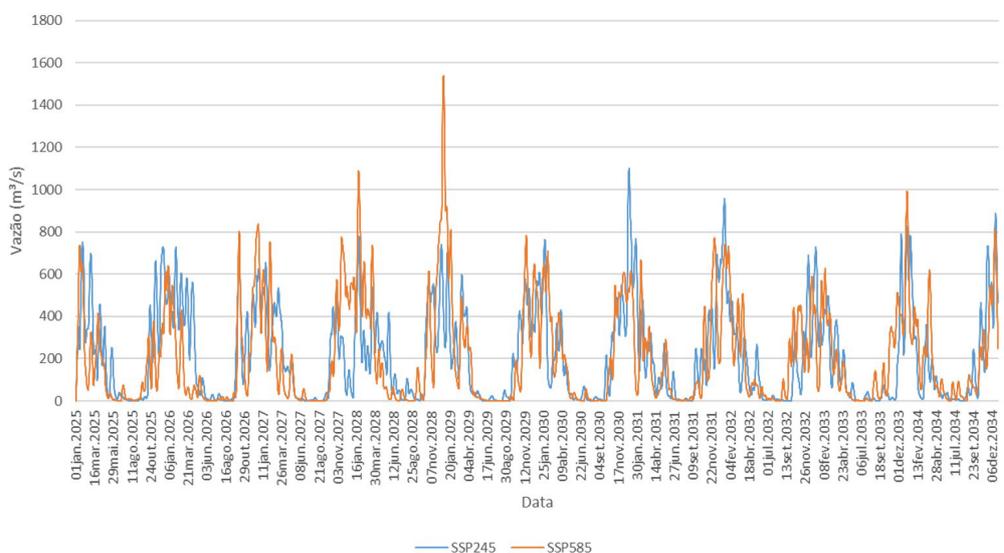


Figura 24. Previsão de vazão para a Estação Várzea da Palma nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

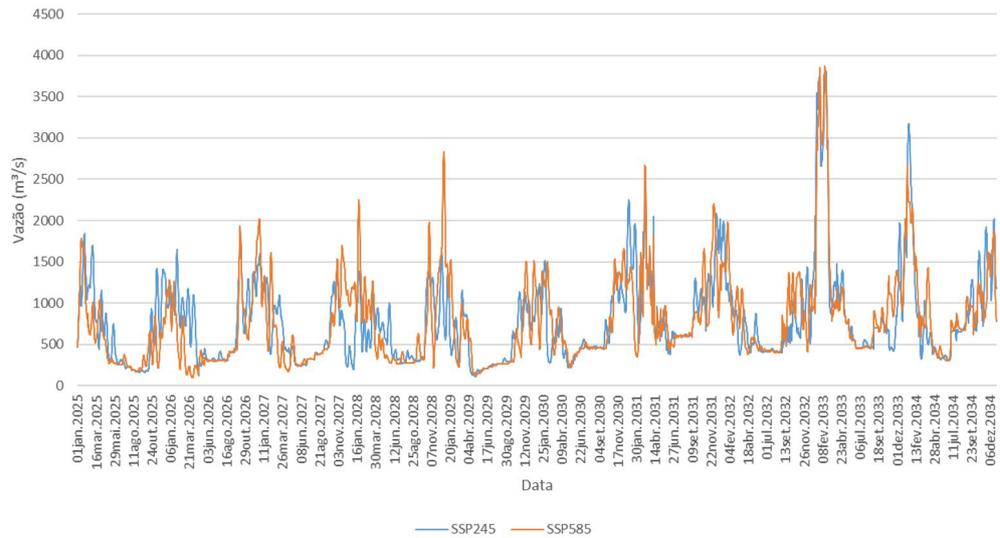


Figura 25. Previsão de vazão para a Estação Cachoeira da Manteiga nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

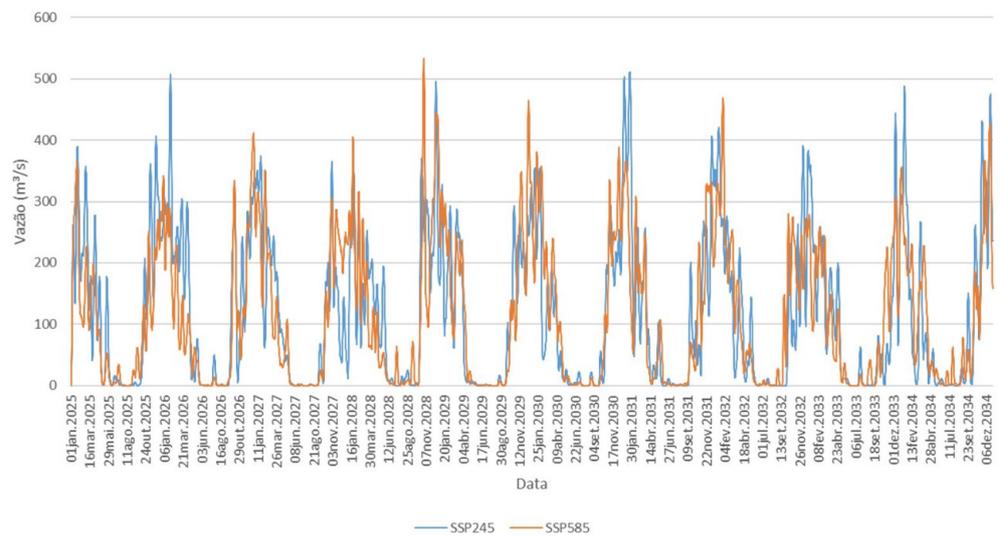


Figura 26. Previsão de vazão para a Estação Santa Rosa nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

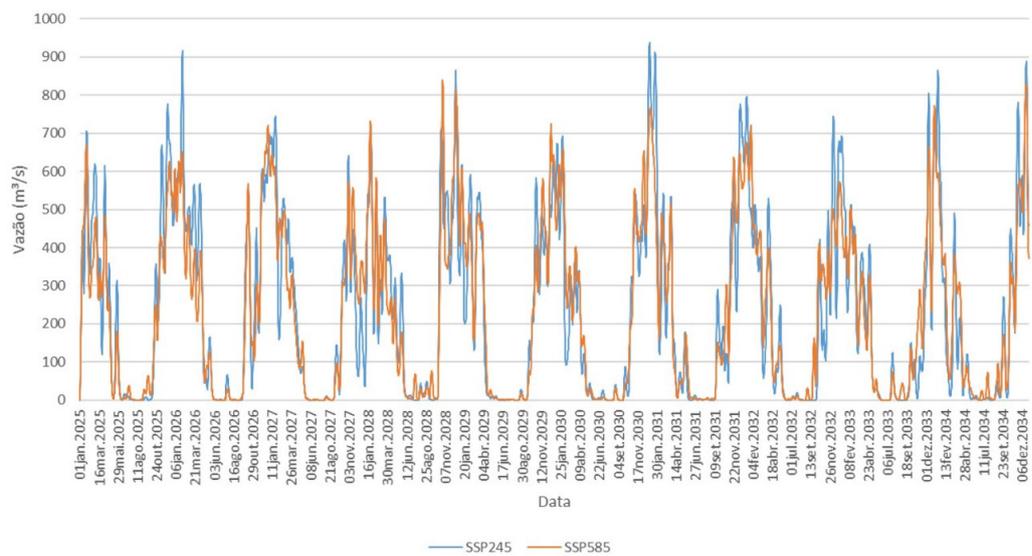
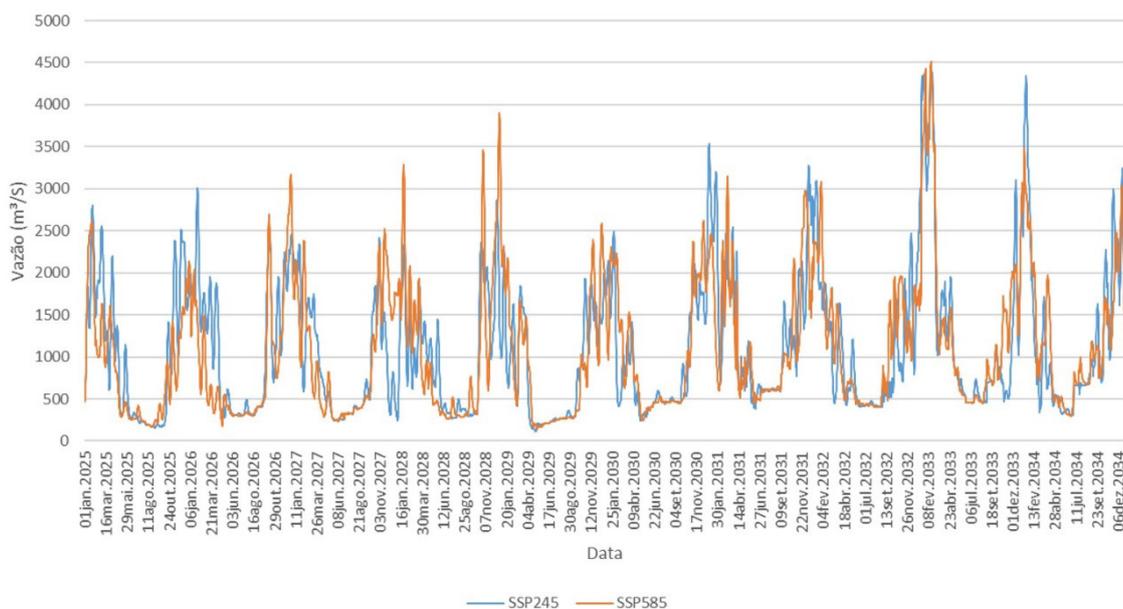
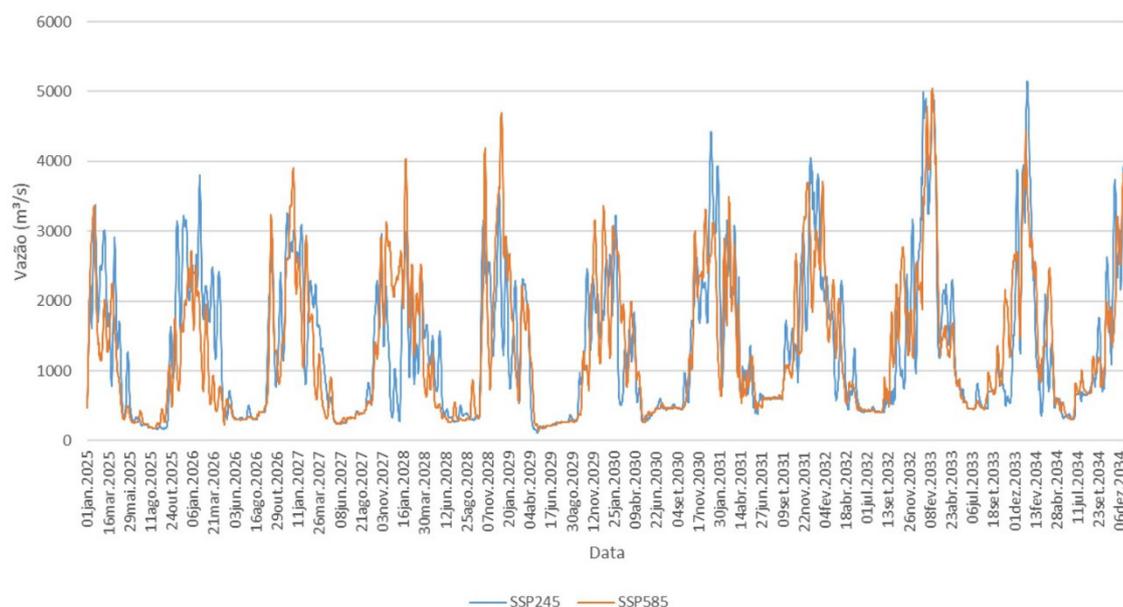


Figura 27. Previsão de vazão para a Estação Porto da Extrema nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5



**Figura 28.** Previsão de vazão para a Estação São Romão nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5



**Figura 29.** Previsão de vazão para a Estação Manga nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

A Tabela 8 indica os valores da intensidade do pico de descarga e a data do pico de descarga para as estações fluviométricas calibradas na porção mineira da bacia do São Francisco. As estações localizadas mais próximas à cabeceira da bacia tiveram um aumento da intensidade do pico de descarga no cenário pessimista (SSP5-8.5). Por sua vez, as estações fluviométricas localizadas mais próximas à foz da bacia apresentaram uma intensidade do pico de descarga maior no cenário moderado (SSP2-4.5) com exceção da estação São Romão.

**Tabela 8.** Intensidade do Pico de Descarga e Data do Pico de Descarga nas estações fluviométricas localizadas na porção mineira da bacia do rio São Francisco para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

Estação	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	Intensidade do Pico de Descarga	Data do Pico de Descarga	Intensidade do Pico de Descarga	Data do Pico de Descarga
Pirapora Barreiro	3311,2 m <sup>3</sup> /s	18 fev. 2033	3313,7 m <sup>3</sup> /s	18 fev. 2033
Santo Hipólito	789,8 m <sup>3</sup> /s	12 jan. 2032	957,0 m <sup>3</sup> /s	25 dez. 2028

Tabela 8. Continuação...

Estação	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	Intensidade do Pico de Descarga	Data do Pico de Descarga	Intensidade do Pico de Descarga	Data do Pico de Descarga
Várzea da Palma	1100,8 m <sup>3</sup> /s	31 dez. 2030	1539,9 m <sup>3</sup> /s	27 dez. 2028
Cachoeira da Manteiga	3806,9 m <sup>3</sup> /s	23 fev. 2033	3866,3 m <sup>3</sup> /s	18 fev. 2033
Santa Rosa	511,1 m <sup>3</sup> /s	24 jan. 2031	533,4 m <sup>3</sup> /s	30 out. 2028
Porto da Extrema	939,2 m <sup>3</sup> /s	02 jan. 2031	838,7 m <sup>3</sup> /s	29 out. 2028
São Romão	4466,3 m <sup>3</sup> /s	18 fev. 2033	4512,3 m <sup>3</sup> /s	17 fev. 2033
Manga	5153,8 m <sup>3</sup> /s	16 jan. 2034	5042,4 m <sup>3</sup> /s	17 fev. 2033

De modo geral, no cenário SSP5-8.5 (pessimista) a data do pico de descarga antecipou em relação ao cenário SSP2-4.5 (moderado), com exceção da estação Pirapora Barreira em que a data do pico se manteve nos dois cenários. Tal fato está relacionado com a amplificação das chuvas pelo efeito das mudanças climáticas nesses locais no cenário pessimista SSP5-8.5.

### Curva de permanência para a porção mineira da bacia do rio São Francisco

Obteve-se a curva de permanência – que expressa a relação entre a vazão e a frequência com que esta vazão é superada ou igualada – para as seguintes estações calibradas: Santo Hipólito, localizada mais próxima da cabeceira da bacia; Pirapora Barreira, situada na parte central da bacia; e Manga, na foz da bacia do projeto (Figura 30).



Figura 30. Localização das estações fluviométricas utilizadas na obtenção da curva de permanência

As Figuras 31 a 33 demonstram os gráficos para estas estações considerando as vazões obtidas na série histórica de cada estação fluviométrica – Santo Hipólito (1938-2024), Pirapora Barreira (1968-2023) e Manga (1932-2024) – e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 de cada estação. Nas estações

Santo Hipólito, Pirapora Barreiro e Manga, a curva de permanência teve um comportamento bem próximo para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

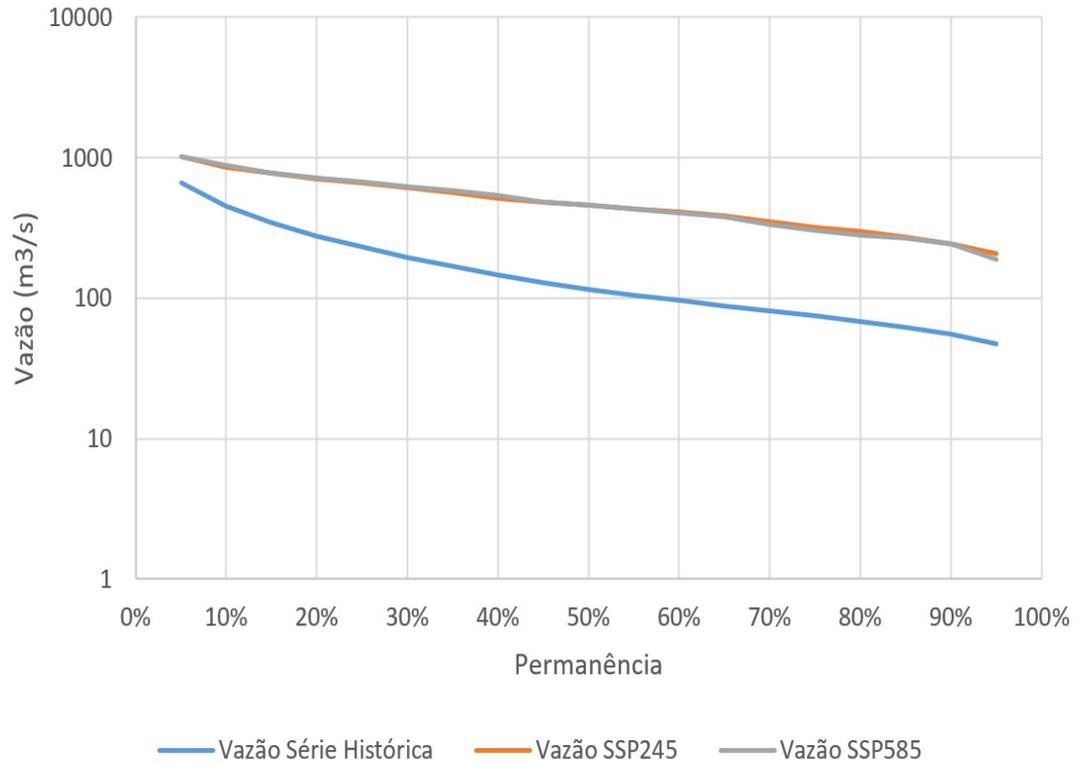


Figura 31. Curva de Permanência da Estação Santa Hipólito considerando as vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

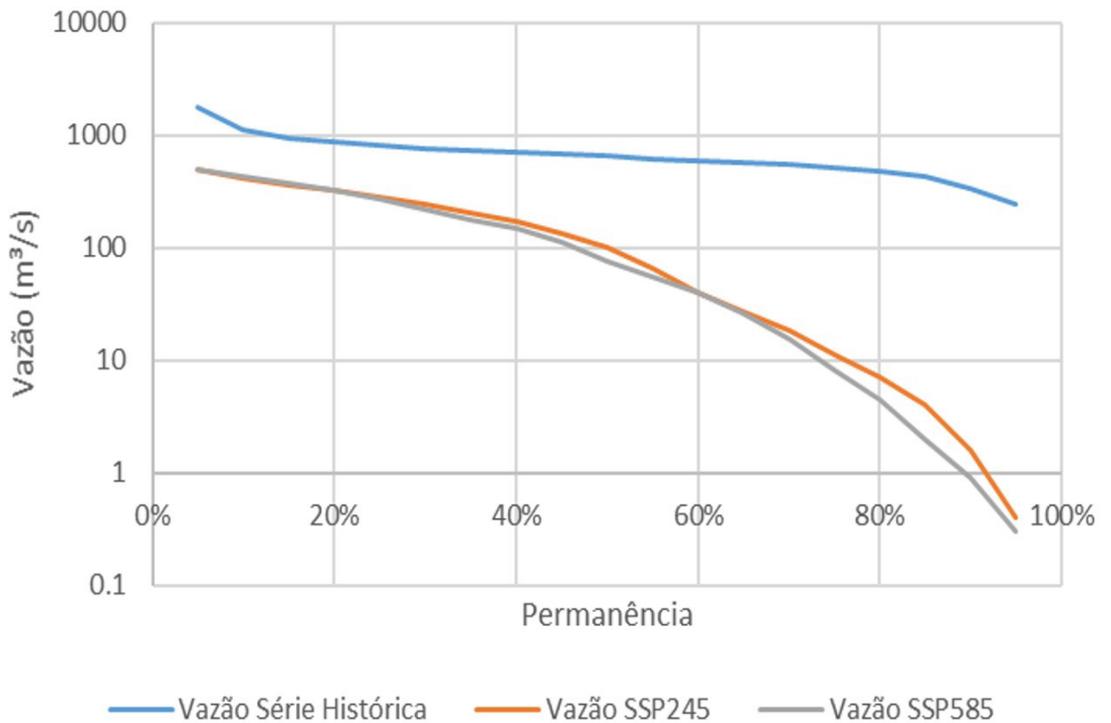
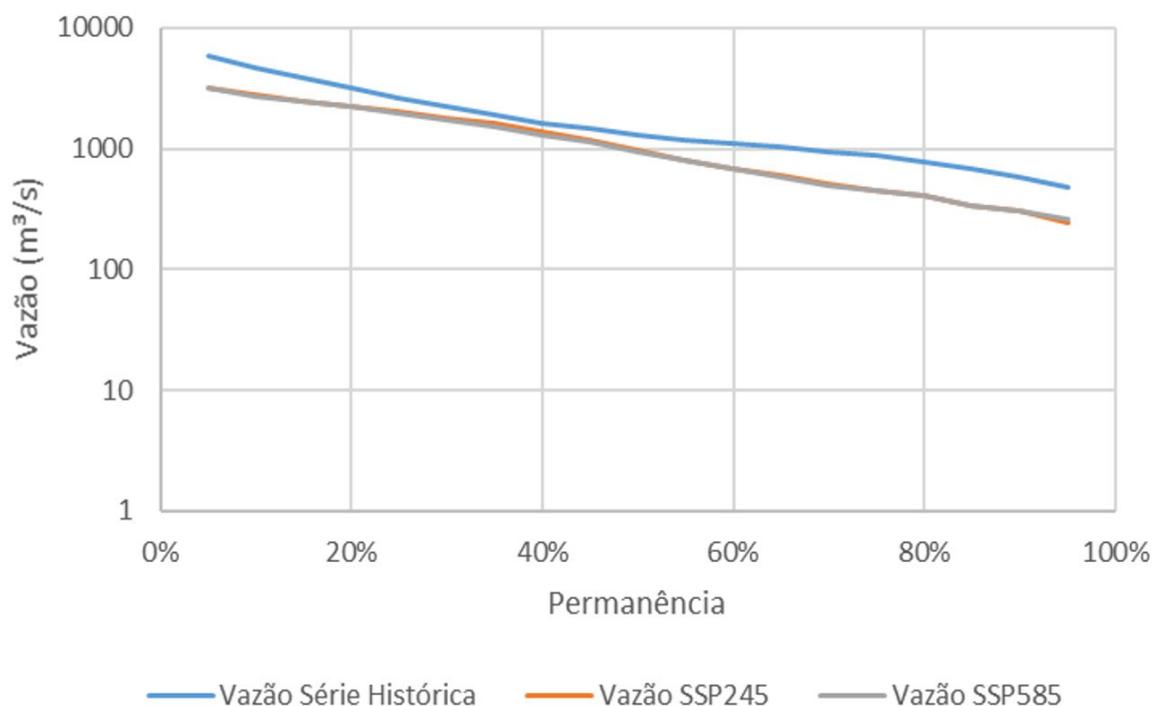


Figura 32. Curva de Permanência da Estação Pirapora Barreiro considerando as vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5



**Figura 33.** Curva de Permanência da Estação Manga considerando as vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

Ao se comparar as vazões obtidas na série histórica com as dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, observa-se uma diferença maior nas estações Santo Hipólito e Pirapora Barreiro. Já na estação Manga, os valores de vazões da série histórica ficaram próximos aos dos dois cenários futuros simulados. Ademais, com base nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, pode-se dizer que a disponibilidade hídrica tende a diminuir nas estações Pirapora Barreiro e Manga.

Cabe destacar que, de acordo com os cenários futuros fornecidos pelo modelo ACCESS-CM2 as vazões futuras, projetadas para o horizonte de 2025 a 2034, tendem a permanecerem maiores do que o período histórico observado, na estação fluviométrica de Santo Hipólito, em ambos os cenários: moderado, SSP2-4.5 e pessimista, SSP5-8.5. Já para as estações de Pirapora Barreiro e Manga, o comportamento se inverte, ou seja, as vazões tendem a permanecerem menor do que o observado na série histórica dessas estações, para ambos os cenários: moderado, SSP2-4.5 e pessimista, SSP5-8.5, o que pode ser explicado pela previsão de chuva para cada localização das estações.

O resultado da previsão de vazão nessa porção da bacia hidrográfica do São Francisco vai ao encontro do estudo de Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil, lançado pela ANA em 31 de janeiro de 2024, que indica um cenário de redução da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio São Francisco no cenário de curto prazo (2015 a 2040), podendo afetar a geração hidrelétrica, a agricultura e o abastecimento de água (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024).

## CONCLUSÕES

A calibração e a validação da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco apresentaram, em sua grande maioria, resultados enquadrados como “bom a muito bom”, de acordo com a classificação proposta no Manual Técnico do HEC-HMS – adaptada de Moriasi et al. (2007).

Pode-se destacar também como ponto positivo do estudo, os resultados obtidos da previsão de vazão na bacia do rio São Francisco utilizando o modelo ACCESS-CM2 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 que apontaram um bom desempenho do HEC-HMS na previsão de vazão e que o tipo de cenário teve grande influência na intensidade e na data do pico de descarga.

A curva de permanência mostrou uma diminuição nos valores de vazão nos dois cenários futuros quando comparados com a série histórica das estações fluviométricas Pirapora Barreiro e Manga, indicando que a disponibilidade hídrica de parte da bacia do São Francisco poderá sofrer uma redução. Um outro ponto forte do presente trabalho é que os resultados encontrados podem ser corroborados

com o estudo de Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil, confirmando a capacidade do HEC-HMS para estudos de previsão de vazão.

Por sua vez, salienta-se que o estudo apresenta certas limitações pelos fatos da bacia hidrográfica do rio São Francisco abrigar a Usina Hidrelétrica de Três Marias, além de registrar diversas retiradas de água ao longo de seu curso. Essas intervenções podem influenciar diretamente o regime de vazões, o que pode comprometer parte da acurácia da previsão de vazões obtida por meio de modelagem, principalmente, em trechos mais impactados por atividades antrópicas.

Assim, de maneira geral, pode-se concluir que o software HEC-HMS, aliado aos modelos adotados, é uma ferramenta que demonstrou capacidade na simulação hidrológica na porção mineira da bacia do rio São Francisco, uma vez que apresentou resultados coerentes de vazão, evidenciando o seu potencial para a resposta hidrológica dessa região.

## 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, processo APQ01226-22.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2023a). *Região Hidrográfica São Francisco*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <https://www.gov.br/ana/pt-br/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/sao-francisco>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2023b). *HIDROWEB v3.3.8361.0*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2023c). *Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR)*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2024). *Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil*. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA.
- Brasil. (1997). Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei N° 9.433/1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1o da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990. *Diário Oficial da União: seção 1*. Brasília.
- Carvalho, P. R. S., Soares Filho, W. A., Fonseca, L. G., & Ribeiro, C. B. M. (2024). Modelagem Hidrológica: uma revisão sistemática utilizando o StArt. *In Anais do 21º Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas*. Poços de Caldas.
- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas – CEMADEN. (2023). *Inundação*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <http://www2.cemaden.gov.br/inundacao/>
- Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco – CBHSF. (2023). *A Bacia*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>
- Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computational method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 205-230.
- 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. (2022). Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: can we blame climate change? *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1), e15. <http://dx.doi.org/10.1002/cli2.15>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMPRAPA. (1999). *Base de dados de solo*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/bases-de-dados-de-solos>
- Ferraz, C. M. L. (2021). *Proposta metodológica para avaliação e mapeamento de riscos a inundações e escorregamentos: contribuições da análise geomorfológica em Teófilo Otoni, Minas Gerais*. *Revista Vozes dos Vales*, UFVJM, MG, Brasil, n.º. 20, Ano X, 10/2021.
- Ferreira, R. G., Dias, R. L. S., de Siqueira Castro, J., dos Santos, V. J., Calijuri, M. L., & da Silva, D. D. (2021). Performance of hydrological models in fluvial flow simulation. *Ecological Informatics*, 66, 101453.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1-21. <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

- Google Earth Engine. (2023). *CHIRPS Daily: Climate Hazards Center InfraRed Precipitation With Station Data (Version 2.0 Final)*. Recuperado em 15 maio de 2023, de [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG\\_CHIRPS\\_DAILY](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY)
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. (2021). *Análise das Chuvas na Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo em dezembro de 2021*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <https://portal.inmet.gov.br/noticias/an%C3%A1lise-das-chuvas-na-bahia-minas-gerais-e-espir%C3%ADto-santo-em-dezembro-de-2021>
- Machado, C., Faccioli, G., Netto, A., Almeida, C., Foppel, E., Cunha, M., & da Silva, M. (2022). Modelagem hidrológica como instrumento de manejo ambiental das bacias hidrográficas. *Revista Educação Ambiental em Ação*, XXI(79).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- Natarajan, S., & Radhakrishnan, N. (2021). 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. *Journal of Earth System Science*, 130, 1-19. <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-020-01532-8>
- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC. (2022). *Climate Change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. In Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 167). Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Rocha, B., de Moura, M. M., Garcia, C. S., Machado, B. S., Leitões, G., & Silva, J. M. M. (2023). Calibração do modelo HEC-HMS para as sub-bacias do Alto São Francisco. *In Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Scharffenberg, W., & Harris, J. (2008). Hydrologic engineering center hydrologic modeling system, HEC-HMS: interior flood modeling. *In World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'A* (pp. 1-3).
- Souza, D. A. (2017). *Zoneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco-MG* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Memani, R. (2022). NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6). *Nature, Scientific Data*, 9, 262. <http://dx.doi.org/10.7917/OFSG3345>
- US Army Corps of Engineers – USACE. (2023). *HEC-HMS*. Recuperado em 15 maio de 2023, de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

#### **Contribuições dos autores:**

Paula Roberta Souza Carvalho: conceptualização, coleta e análise de dados, metodologia, execução, escrita e revisão.

Celso Bandeira de Melo Ribeiro: coleta de dados, análise formal, revisão e supervisão.

Welson de Avelar Soares Filho: análise formal e revisão.

Leonardo Golliatt da Fonseca: análise formal e revisão.