

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Paula Roberta Souza Carvalho**

**Resposta Hidrológica das Porções Mineiras das Bacias Hidrográficas do  
Doce e São Francisco à Modelagem Chuva-Vazão**

**Paula Roberta Souza Carvalho**

**Resposta Hidrológica das Porções Mineiras das Bacias Hidrográficas  
Doce e São Francisco à Modelagem Chuva-Vazão**

Dissertação apresentada ao F  
Pós-Graduação em Engenharia  
Universidade Federal de Ju  
como requisito parcial à obten  
de Mestre em Engenharia C  
concentração: Saneamento  
Ambiente. Linha de  
Monitoramento e Gestão d  
Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Carvalho, Paula Roberta Souza.

Resposta Hidrológica das Porções Mineiras das Bacias Hidrográficas dos rios Doce e São Francisco à Modelagem Chuva-Vazão / Paula Roberta Souza Carvalho. -- 2024.

142 f. : il.

Orientador: Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

1. Modelagem Hidrológica. 2. Previsão de Vazão. 3. HEC-HMS. 4. Eventos Extremos. 5. escoamento Superficial. I. Ribeiro, Celso Bandeira de Melo, orient. II. Título.

**Paula Roberta Souza Carvalho**

**Resposta Hidrológica das Porções Mineiras das Bacias Hidrográficas dos rios Doce e São Francisco à Modelagem Chu**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento e Meio Ambiente.

28 de outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro** - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Profª. Dra. Clívia Dias Coelho**

Universidade Federal de São João Del Rei

**Dr. Ricardo Guimarães Andrade**

Embrapa Gado de Leite

Juiz de Fora, 29/10/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Celso Bandeira de Melo Ribeiro, Professor(a)**, em 30/10/2024, às 09:10, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clivia Dias Coelho, Usuário Externo**, em 30/10/2024, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Guimarães Andrade, Usuário Externo**, em 30/10/2024, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2067003** e o código CRC **54C0E3BA**.





## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me permitido concluir e realizar o que um dia foi um sonho.

Agradeço também a minha família. A minha mãe Regina, por a mim, ser minha maior incentivadora e me apoiar incondicionalmente. Carlos, por me ensinar a importância da perseverança. A minha vó Maria pela sabedoria e amor. A minha irmã Ana Júlia, por me inspirar a ser melhor. Ao meu primo Deyvid, por me encorajar a fazer o mestrado.

Agradeço a todos os meus amigos que sempre me motivaram. Pérola, Olívia e Pâmela, por estarem ao meu lado me incentivando e momentos. À Cristina e Priscila, pelo apoio e companhia em Juiz de Fora.

Agradeço ao meu professor orientador, Prof. Dr. Celso Bandeira Ribeiro, pela orientação e suporte durante todo o processo. O seu apoio foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos professores e colegas, em especial Pedro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Juiz de Fora, pelos ensinamentos e trocas de conhecimento no mestrado.

Gostaria de expressar minha gratidão a Prof. Dra. Clívia Coelho e Ricardo Andrade, membros da banca examinadora, por enriquecer meu trabalho com suas valiosas sugestões.

Por fim, agradeço ao Prof. Dr. Leonardo Goliatt e ao colega Vitor pela contribuição na realização da pesquisa “Caracterização Hidrológica e de Chuva-Vazão nas Principais Bacias Hidrográficas de Minas Gerais” e à FAPEMIG pelo Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Instituto de Gestão das Águas (IGAM) pelo apoio financeiro concedido, processo

“A sociedade que respeita as dinâmicas ambientais está sujeita a catástrofes, a sociedade que não respeita está fadada a elas” (Aline Balta).

## RESUMO

A previsão de vazão em eventos extremos provocados por um intenso precipitação é um dos grandes desafios da atualidade e pode auxiliar os recursos hídricos na tomada de decisão, minimizando os riscos decorrentes de eventos. O presente trabalho teve como objetivo realizar a implementação do modelo HEC-HMS nas porções mineiras das bacias hidrográficas dos municípios de São Francisco. Os métodos utilizados na modelagem hidrológica foram: *Constant*, para separação do escoamento; *Clark Unit Hydrograph*, para a geração do hidrograma; *Recession*, para a vazão de base; e *Muskingum-C*, para a propagação do escoamento. Os dados de entrada de precipitação foram obtidos pelo produto CHIRPS e os dados de vazão, para calibração e validação, foram das estações fluviométricas, no Hidroweb. 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 2018 a 31 de dezembro de 2022, reproduzindo os principais eventos extremos ocorridos nos últimos anos. Os resultados do modelo foram avaliados com o índice de eficiência de *Nash-Stucliffe Efficiency* e no PBIAS, sendo classificados como “satisfatório a muito bom”. Realizou-se, ainda, a previsão de vazão com o modelo ACCESS-CM2 considerando dois cenários SSP245 (otimista) e SSP585 (pessimista) para um período de 10 anos e os resultados indicaram que o cenário SSP585 teve grande influência na magnitude do pico de descarga. O modelo HEC-HMS apresentou um bom desempenho e simulou os valores com precisão, confirmando sua capacidade na previsão de vazão.

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

## ABSTRACT

Flow forecasting in extreme events caused by an intense volume of offers is today's greatest challenges and can help water resource managers in decision making, minimizing the risks arising from these events. The present work aimed to implement the HEC-HMS model in the Minas Gerais portions of the Doce and São Francisco river basins. The methods used in hydrological modeling were: Definition of a Constant for runoff separation; Clark Unit Hydrograph for hydrograph formation; Recession for base flow; and Muskingum-Cunge for runoff propagation. The precipitation data were obtained from the CHIRPS product and data from the hydrometric stations in Hidroweb. 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 from January 1, 2019 to December 31, 2022, reproducing the extreme flood events that occurred in recent years. The model results were evaluated based on the Nash-Stucliffe Efficiency Index and PBIAS and were classified as "satisfactory to very good". Flow forecasting was also performed using the AC2017 CM2 model considering two scenarios SSP245 (optimistic) and SSP585 (pessimistic) for a period of 10 years and the results indicated that the type of scenario had a significant influence on the magnitude of the peak discharge. The HEC-HMS model performed well and simulated the values coherently and confirming its capability for flow prediction.

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

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Ciclo hidrológico.....
- Figura 2 – Gráfico do ano de publicação dos artigos extraídos sistemática.....
- Figura 3 – Gráfico das plataformas que retornaram os artigos e revisão sistemática.....
- Figura 4 – Nuvem de palavras dos autores dos artigos extraídos sistemática.....
- Figura 5 – Gráfico dos locais estudados nos artigos extraídos sistemática.....
- Figura 6 – Mapa de localização da porção mineira da bacia hidrográfica Doce .....
- Figura 7 – Mapa de hipsometria da bacia hidrográfica Doce.....
- Figura 8 – Mapa de solos da porção mineira da bacia hidrográfica Doce.....
- Figura 9 – Mapa de localização da porção mineira da bacia hidrográfica São Francisco.....
- Figura 10 – Mapa de hipsometria da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....
- Figura 11 – Mapa de solos da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....
- Figura 12 – Fluxograma da simulação no HEC-HMS.....
- Figura 13 – Projeto da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce no HEC-HMS.....
- Figura 14 – Série temporal das vazões nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce.....

	Francisco.....
Figura 17	– Hidrograma do período de calibração para a estação Belo Oriente.....
Figura 18	– Hidrograma do período de validação para a estação Belo Oriente.....
Figura 19	– Hidrograma do período de calibração para a estação Naque Velha.....
Figura 20	– Hidrograma do período de validação para a estação Naque Velha.....
Figura 21	– Hidrograma do período de calibração para a estação Governador Valadares.....
Figura 22	– Hidrograma do período de validação para a estação Governador Valadares.....
Figura 23	– Hidrograma do período de calibração para a estação Vila Montante.....
Figura 24	– Hidrograma do período de validação para a estação Vila Montante.....
Figura 25	– Hidrograma do período de calibração para a estação Assis Montante.....
Figura 26	– Hidrograma do período de validação para a estação Assis Montante.....
Figura 27	– Hidrograma do período de calibração para a estação Pimenta Barreiro.....
Figura 28	– Hidrograma do período de validação para a estação Pimenta Barreiro.....
Figura 29	– Hidrograma do período de calibração para a estação Hipólito.....
Figura 30	– Hidrograma do período de validação para a estação Hipólito.....
Figura 31	– Hidrograma do período de calibração para a estação Várzea Palma.....
Figura 32	– Hidrograma do período de validação para a estação Várzea Palma.....

Figura 35	–	Hidrograma do período de calibração para a estaçã Rosa.....
Figura 36	–	Hidrograma do período de validação para a estaçã Rosa.....
Figura 37	–	Hidrograma do período de calibração para a estaçã Extrema.....
Figura 38	–	Hidrograma do período de validação para a estaçã Extrema.....
Figura 39	–	Hidrograma do período de calibração para a es Romão.....
Figura 40	–	Hidrograma do período de validação para a es Romão.....
Figura 41	–	Hidrograma do período de calibração para Manga.....
Figura 42	–	Hidrograma do período de validação para Manga.....
Figura 43	–	Previsão de vazão para a Estação Pirapora Barreiro n SSP245 e SSP585.....
Figura 44	–	Previsão de vazão para a Estação Santo Hipólito n SSP245 e SSP585.....
Figura 45	–	Previsão de vazão para a Estação Várzea da Palma n SSP245 e SSP585.....
Figura 46	–	Previsão de vazão para a Estação Cachoeira da M cenários SSP245 e SSP585.....
Figura 47	–	Previsão de vazão para a Estação Santa Rosa nos cená e SSP585.....
Figura 48	–	Previsão de vazão para a Estação Porto da Extrema n SSP245 e SSP585 .....



- curva de permanência.....
- Figura 52 – Curva de Permanência da Estação Santa Hipólito considerando as vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP245 e SSP585.....
- Figura 53 – Curva de Permanência da Estação Pirapora Barreiro considerando as vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP245 e SSP585.....
- Figura 54 – Curva de Permanência da Estação Manga considerando as vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP245 e SSP585.....
- Figura 55 – Mapa sobre cenário de redução na disponibilidade hídrica em 2040.....

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 – Classificação utilizada para os modelos hidrológicos.....
- Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos principais softwares de modelagem chuva-vazão.....

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Classificação de desempenho HEC-HMS.....
- Tabela 2 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 3 – Parâmetros do método *Deficit and Constant* calibrados para a porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 4 – Parâmetros do método *Clark Unit Hydrograph* calibrados para a porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 5 – Parâmetros do método *Recession* calibrados para a porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 6 – Parâmetros do método *Muskingum-Cunge* calibrados para a porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 7 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 8 – Parâmetros do método *Deficit and Constant* calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 9 – Parâmetros do método *Clark Unit Hydrograph* calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 10 – Parâmetros do método *Recession* calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 11 – Parâmetros do método *Muskingum-Cunge* calibrados para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 12 – Valores encontrados do PBIAS/NSE no período de calibração e validação para as estações fluviométricas da porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 13 – Valores encontrados do PBIAS/NSE no período de calibração e validação para as estações fluviométricas da porção mineira da bacia do rio São Francisco.....

- Tabela 16 – Parâmetros de entrada do método *Clark Unit Hydrograph* para a porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 17 – Parâmetros de entrada do método *Recession* para a porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 18 – Parâmetros de entrada do método *Muskingum-Cunge* para a porção mineira da bacia do rio Doce.....
- Tabela 19 – Parâmetros de entrada do método *Deficit and Constant* para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 20 – Parâmetros de entrada do método *Clark Unit Hydrograph* para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 21 – Parâmetros de entrada do método *Recession* para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....
- Tabela 22 – Parâmetros de entrada do método *Muskingum-Cunge* para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACCESS-CM2	<i>Accessible Community Climate Model 2</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBH-Doce	Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Doce
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations</i>
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e da Parnaíba
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ES	Espírito Santo
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GIS	Sistemas de Informação Geográfica
GPM	<i>Global Precipitation Measurement</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
HBV	<i>Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning</i>
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
NSE	<i>Nash-Stucliffe Efficiency</i>
PBIAS	<i>Percent Bias</i>
RSU	Resumo Científico

SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SSPs	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
StArt	<i>State of the Art through Systematic Review</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
UFScar	Universidade Federal de São Carlos
UHE	Usina Hidrelétrica
UPGRHs	Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>
4.1	CICLO HIDROLÓGICO.....
4.2	BACIA HIDROGRÁFICA .....
4.3	MODELOS HIDROLÓGICOS .....
<b>4.3.1</b>	<b>Modelo chuva-vazão .....</b>
4.3.1.1	<i>Modelo HEC-HMS .....</i>
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>
5.1	ÁREAS DE ESTUDO.....
<b>5.1.1</b>	<b>Porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce.....</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....</b>
5.2	BASE DE DADOS.....
5.3	MODELO HEC-HMS .....
<b>5.3.1</b>	<b>Modelo HEC-HMS da porção mineira da bacia hidrográfica Doce.....</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Modelo HEC-HMS da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS .....</b>
6.1	SIMULAÇÃO NA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA DO RIO DOCE.....
6.2	SIMULAÇÃO NA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.....
<b>6.2.1</b>	<b>Previsão de vazão para a porção mineira da bacia do rio São Francisco.....</b>

<b>APÊNDICE A – ARTIGO MODELAGEM HIDROLÓGICA: u</b>	
<b>  sistemática utilizando o StArt.....</b>	
<b>APÊNDICE B – PARÂMETROS DE ENTRADA DA PORÇÃ</b>	
<b>  DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE .....</b>	
<b>APÊNDICE C – PARÂMETROS DE ENTRADA DA PORÇÃ</b>	
<b>  DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO .....</b>	



## 1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, define a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e 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 para o 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 (USACE, 2023; Scharffenberg; et al., 2008). Podem variar em complexidade, desde abordagens simples que abordam 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.

complexos e, ainda, permite análises espaciais e temporais com maior detalhamento.

O Sexto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicou que as mudanças climáticas são incontestáveis e que os eventos relacionados à inundações estão cada vez mais intensos devido às mudanças meteorológicas, podendo ocasionar desastres naturais (IPCC, 2022).

Os problemas causados por eventos extremos de precipitação têm despertado preocupação mundial, uma vez esses fenômenos resultam em danos materiais e de vidas humanas, como danos à infraestrutura urbana, à agricultura, ao turismo, além de impactos ambientais.

No Brasil, vários estados têm enfrentado prejuízos devido à ocorrência frequente de eventos extremos de cheia, como é o caso de São Paulo, Rio de Janeiro, Bahia, Rio Grande do Sul e Minas Gerais. Por outro lado, atualmente vivemos uma onda de seca em várias regiões do país, afetando desde a produção agrícola até os sistemas de saúde pública.

Nesse sentido, as simulações de vazões considerando dados de diferentes cenários de previsões climáticas, podem auxiliar no entendimento do comportamento das vazões em bacias hidrográficas e contribuir para o planejamento e a 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 de vazões globais derivados de execuções do Modelo de Circulação Geral (GCM), do Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado - Fase 6 (CMIP6), com o objetivo de estudos de previsões futuras de vazões.

Sendo assim, tendo em vista os eventos extremos ocorridos recentemente em diversas cidades de Minas Gerais, propõe-se implementar o modelo HEH em algumas das porções mineiras das bacias hidrográficas dos rios Doce e São Francisco, com o objetivo de auxiliar os gestores de recursos hídricos nas tomadas de decisão.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral implementar o modelo HEC-HMS nas porções mineiras das bacias hidrográficas, a saber: rios Doce e São Francisco.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por sua vez, os objetivos específicos são:

1. Parametrizar o modelo HEC-HMS nas porções das bacias do rio Doce e São Francisco localizadas no estado de Minas Gerais (MG);
2. Calibrar e validar o modelo HEC-HMS em cada uma dessas bacias utilizando dados de precipitação estimados pelo CHIRPS e séries históricas de esfluviométricas convencionais da rede hidrometeorológica nacional;
3. Reproduzir o comportamento da vazão no período entre os anos de 2015 a 2022 em que ocorreram cheias consideráveis nestas bacias mineiras utilizando o modelo HEC-HMS devidamente calibrado; e
4. 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 ACOS2 CM2 (NEX-GDDP-CMIP6) e considerando dois cenários: SSP245 (otimista) e SSP585 (pessimista).

### 3 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a ocorrência de inundações em áreas urbanas vem aumentando principalmente, pela urbanização acelerada e pela ocupação inadequada das áreas, falta de infraestrutura nos municípios e as alterações no uso e ocupação do solo, nas bacias hidrográficas, bem como o desmatamento ciliar também contribui para as inundações, favorecendo o aumento do volume de vazão e a velocidade de propagação da onda de inundação em regiões onde os eventos de chuva constituem um risco de desastre natural (CEMADEN, 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 causando enorme prejuízo financeiro (INMET, 2021). Dalagnol *et al.* (2020), realizou um estudo que sugere que a mudança climática causada pelo homem aumentou o evento com 70% a mais de chances de ocorrer e que o período de recorrência é de aproximadamente 4 anos, o que exige uma melhoria no planejamento e na mitigação.

Ainda há diversas lacunas de conhecimento sobre processos hidrológicos em bacias hidrográficas localizadas em Minas Gerais que precisam ser supridas. Os gestores de recursos hídricos têm demonstrado grande interesse por essas lacunas (Dalagnol *et al.*, 2020).

O presente trabalho, 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) sob o número APQ01226-22, busca suprir algumas dessas lacunas.

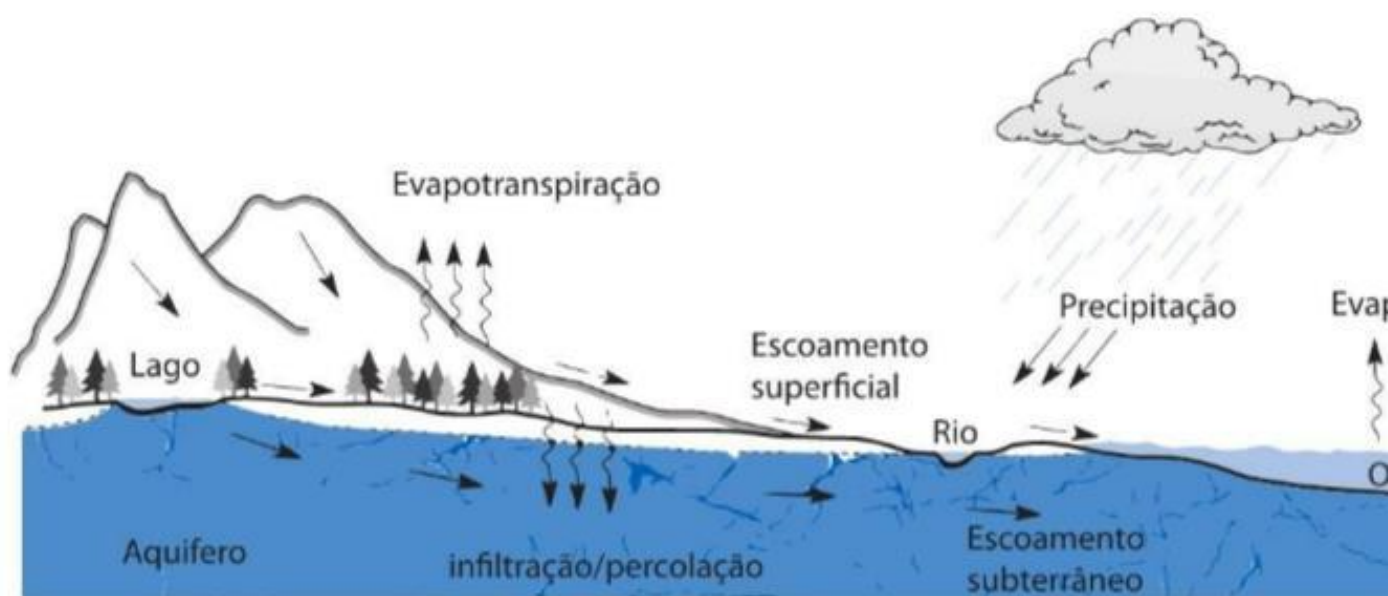
## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é considerado elemento fundamental da hidrologia e representa a água em todas as suas fases, sendo definido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2023) como “sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficialmente ou subterraneamente, ao oceano”. Esse movimento pode ser causado pela força da gravidade e pela energia do sol (MMA, 2023).

O ciclo hidrológico é composto pelos seguintes mecanismos: precipitação; escoamento superficial; escoamento subterrâneo; infiltração; e evapotranspiração, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Ciclo hidrológico



Fonte: Collischonn e Dornelles (2015).

A precipitação compreende a chegada da água – em estado líquido ou sólido – à superfície terrestre, resultando dela os demais processos hidrológicos.

Por sua vez, a infiltração pode ser definida como a água que perpodendo formar lençóis subterrâneos d'água ou ficar retida nos meios p evapotranspiração é a evaporação da água do solo juntamente com a das plantas. Assim, a evapotranspiração é o processo de movimentação para a atmosfera, podendo ocorrer com a água presente nos solos e (Revista Agropecuária, 2021; Von Sperling, 2005).

Conforme Mendiondo e Tucci (1997), o ciclo hidrológico deve ser baseado na dinâmica – mudança das variáveis no tempo e no espaço – ocorrência e nas características do sistema envolvido – como, por exemplo, cobertura.

## 4.2 BACIA HIDROGRÁFICA

De acordo com Collischonn e Dornelles (2015), a fase terrestre do ciclo hidrológico tem maior foco nos estudos, sendo a bacia hidrográfica fundamental da análise.

A bacia hidrográfica pode ser definida como uma área que capta a chuva e tem seu escoamento convergido para o ponto de saída conhecido como exutório ou foz e pode-se subdividir em sub-bacias (Collischonn; Dornelles, 2015).

O conceito de bacia hidrográfica, no ponto de vista dos estudos hidrológicos, abrange o “conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo quantitativo dos recursos hídricos e dos fluxos de sedimentos e nutrientes (Schiavetti; Camargo, 2002).

A delimitação de uma bacia hidrográfica ocorre a partir do curso principal de um ponto ou seção transversal desse curso d'água - e pelo mapa de relevo que identifica os divisores de água.

Diversos elementos que caracterizam a bacia hidrográfica são a sua extensão, a variação do regime hidrológico, sendo os mais importantes o clima e a cobertura

### 4.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

Um modelo pode ser definido como uma representação simplificada do mundo real. Os modelos hidrológicos são ferramentas utilizadas na simulação do processo do ciclo da água para a gestão integrada dos recursos hídricos com, por exemplo, planejamento e gestão de rios, operação e utilização dos reservatórios e gestão ambiental de águas de bacias hidrográficas (Li *et al.*, 2022).

Os estudos hidrológicos detalhados são considerados um desafio devido à ausência de dados e a complexidade dos sistemas hidrológicos (Joshi *et al.*, 2019). Assim, a modelagem hidrológica surgiu como uma alternativa para a estimação de dados quantitativos de vazão. Os diversos métodos existentes são baseados nas características fisiográficas da bacia hidrográfica e/ou fatores climáticos.

Segundo Moreira (2005), a classificação utilizada para os modelos hidrológicos são: estocásticos ou determinísticos; empíricos ou conceituais; discretos ou contínuos; e estacionários ou dinâmicos (Quadro 1).

Quadro 1 – Classificação utilizada para os modelos hidrológicos

Classificação	Relação
Estocásticos ou Determinísticos	Em relação ao tipo das variáveis
Empíricos ou Conceituais	Dependendo do tipo de relação entre as variáveis
Discretos ou Contínuos	De acordo com a existência ou não de variáveis espaciais
Estacionários ou Dinâmicos	Relacionados a dependência temporal

Fonte: elaborado pela autora.

Os modelos podem ser estocásticos, se ao menos uma das variáveis relacionadas apresentarem o comportamento aleatório e distribuição de probabilidade, ou determinísticos, se produzirem respostas iguais para o mesmo dado de entradas, inclusive se uma variável de entrada apresentar comportamento aleatório (Tucci, 2005).

Os modelos podem ser denominados discretos quando o objetivo é a modelagem de apenas um determinado período de uma série histórica e contínuos quando o objetivo é realizar a modelagem de um período longo, abrangendo diversos comportamentos hidrológicos (Tucci, 2005).

Em relação a existência ou não de relações espaciais, os modelos podem ser concentrados ou distribuídos. Os modelos concentrados são representados por uma única célula homogênea em toda a bacia, sendo atribuídos valores médios para cada parâmetro. Por sua vez, os modelos distribuídos permitem a distribuição espacial dos parâmetros como, por exemplo, dos dados de pluviometria, fazendo com que os resultados sejam mais representativos (Almeida; Valdés Serra, 2017).

Por fim, podem ser classificados como estacionários se os parâmetros do modelo não se alterarem com o tempo ou dinâmicos em caso de alteração dos parâmetros ao longo do tempo (Tucci, 2005).

O tipo de modelo empregado deve ser de acordo com o objetivo do estudo, os dados disponíveis e a dimensão das bacias hidrográficas. Alguns estudos são realizados para entender o fenômeno para definir as vazões e níveis de projetos, enquanto outros estudos se destinam ao sistema de alertas.

A modelagem hidrológica pode ser utilizada para diversas finalidades, como: fornecimento de dados para projetos de engenharia; simulação de escoamento em cursos d'água de bacias hidrográficas para avaliar o impacto das atividades humanas; previsão de vazões para o gerenciamento das barragens; avaliação do impacto de obras hidráulicas nos cursos d'água, entre outras aplicações.

#### **4.3.1 Modelo chuva-vazão**

O modelo chuva-vazão é uma abordagem que utiliza um modelo hidrológico para entender e prever como a precipitação se transforma em escoamento em uma bacia hidrográfica, integrando diferentes componentes



multidimensional, pois envolve a quantificação das mudanças espaciais e temporais dos componentes do balanço hídrico. A compreensão do escoamento requer avaliação aprofundada dos processos e interações entre fluxos, descargas e armazenamentos em reservatórios (Gumindoga *et al.*, 2016).

A representação matemática deste modelo tornou-se, em 1980, uma importante ferramenta para hidrólogos e gestores de recursos hídricos, devido ao rápido desenvolvimento da tecnologia computacional, seja para previsão hidrológica ou para fins de projeto (Jeníček, 2007). De acordo com Guduru *et al.* (2016), o entendimento detalhado dos processos chuva-vazão é extremamente importante para uma bacia hidrográfica com geração de vazões variáveis.

Os modelos de chuva-vazão podem ser classificados com base na natureza dos parâmetros do modelo e de acordo com os princípios físicos aplicados no modelo. Os dados de entrada necessários para simulação do processo chuva-vazão são classificados em meteorológicos – chuva –, hidrológicos – vazão – e fisiográficos – cobertura da terra, tipo de solo e modelo digital de elevação (Guduru *et al.*, 2016).

Há modelos que exigem poucas variáveis de entrada como, por exemplo, os modelos concentrados e os empíricos. Por sua vez, outros modelos demandam mais dados de entrada como é o caso dos distribuídos.

Pode-se citar alguns modelos do tipo chuva-vazão mais utilizados, como o SWMM - *Storm Water Management Model (United States Environmental Protection Agency, 1971)*; HBV Model - *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (BERGSTRÖM, 1976)*; SMAP - *Soil Moisture Accounting Procedure (LBRAGA; CONEJO, 1981)*; TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979); HEC-HMS - *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (USACE, 1997)*; TOPMO (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003), entre outros.

O Quadro 2 apresenta algumas vantagens e desvantagens desses modelos utilizados na modelagem chuva-vazão.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos principais softwares u  
 modelagem chuva-vazão

Software	Vantagens	Desvantagens
SWWM	Pode ser adaptado para diferentes tipos de sistemas de drenagem. A interface gráfica facilita a entrada de dados e a visualização dos resultados da simulação.	Pode apresentar lim área de grande esc topografia mais com
HBV Model	Pode ser utilizado em vários tipos de bacias hidrográficas e condições climáticas, possibilitando simulações em diversas escalas.	Como o modelo sim alguns processos h o resultado pode se preciso. Além disso de simulação e aná ser significativo se a bacia for extensa.
SMAP	Permite a representação da dinâmica do solo e pode ser ajustado para diversas condições climáticas e tipos de solo.	Requer a definição parâmetros que são determinar de forma Possui algumas lim espaciais como, por representação da u solo.
TOPMODEL	Modelo mais simples que permite uma simulação mais ágil e exige uma menor demanda computacional. Além disso, leva em consideração o escoamento lateral, sendo importante para representar o movimento da água em terrenos inclinados.	Não é tão eficaz em urbanas em que o u influencia significati escoamento. Adem simplificação de alg processos acarreta precisão.

Continua

Software	Vantagens	Desvantagens
HEC-HMS	Permite a simulação de uma gama de processos hidrológicos, como: escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração. Possibilita analisar simultaneamente o escoamento e o armazenamento de reservatórios, proporcionando um melhor entendimento do comportamento hidrológico.	A configuração e a calibração do modelo podem ser complexas, exigindo um conhecimento técnico maior. Além disso, a precisão da simulação depende da qualidade dos dados de entrada como a precipitação.
TOPMO	Pode ser aplicado em áreas montanhosas, onde o escoamento lateral possui uma grande influência. Ademais, é fácil de ser implementado, não exigindo grande experiência.	Alguns processos hidrológicos, como, por exemplo, a evapotranspiração não são representados adequadamente.

Fonte: elaborado pela autora.

#### 4.3.1.1 Modelo HEC-HMS

O modelo HEC-HMS foi desenvolvido para simular os processos de escoamento de bacias hidrográficas dendríticas, pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos – responsável por produzir várias ferramentas de software para modelagem hidrológica, como PRECIP (1989), HEC-IF (1989), HEC-IFH (1989), HEC-1 (1998), entre outras.

O desempenho dos modelos HEC-HMS depende da qualidade das medições de vazão, das estimativas e dos padrões de precipitação, dos parâmetros atribuídos ao modelo.

O HEC-HMS divide a bacia em sub-bacias com base na similaridade do solo, do uso e cobertura da terra, entre outras características (Rauf et al., 2018). É um software de acesso livre, descrito pela equação do balanço hídrico, capaz de simular o escoamento levando em conta os parâmetros de entrada. O HEC-HMS é dividido em três modelos: o modelo de bacia, o modelo meteorológico e o modelo de especificações de controle (Joshi et al., 2019).

O modelo da bacia, elemento central do HEC-HMS, tem como objetivo representar a estrutura física da bacia hidrográfica, permitindo o usuário conectar diversos componentes hidrológicos, tais como: sub-bacias, reservatórios, fontes, entre outros.

Já o modelo meteorológico tem como objetivo representar a precipitação ocorrida em cada uma das sub-bacias. Por sua vez, o modelo de especificações de controle possui informações temporais do modelo como, por exemplo, o horário de início e término e intervalo de tempo.

Carvalho et al. (2024) realizaram uma revisão sistemática de literatura em software StArt – *State of the Art through Systematic Review* – sobre a modelagem hidrológica com foco na modelagem chuva-vazão e no HEC-HMS (AP, 2024), sendo extraídos 48 artigos dos 92 selecionados nas fontes de pesquisa.

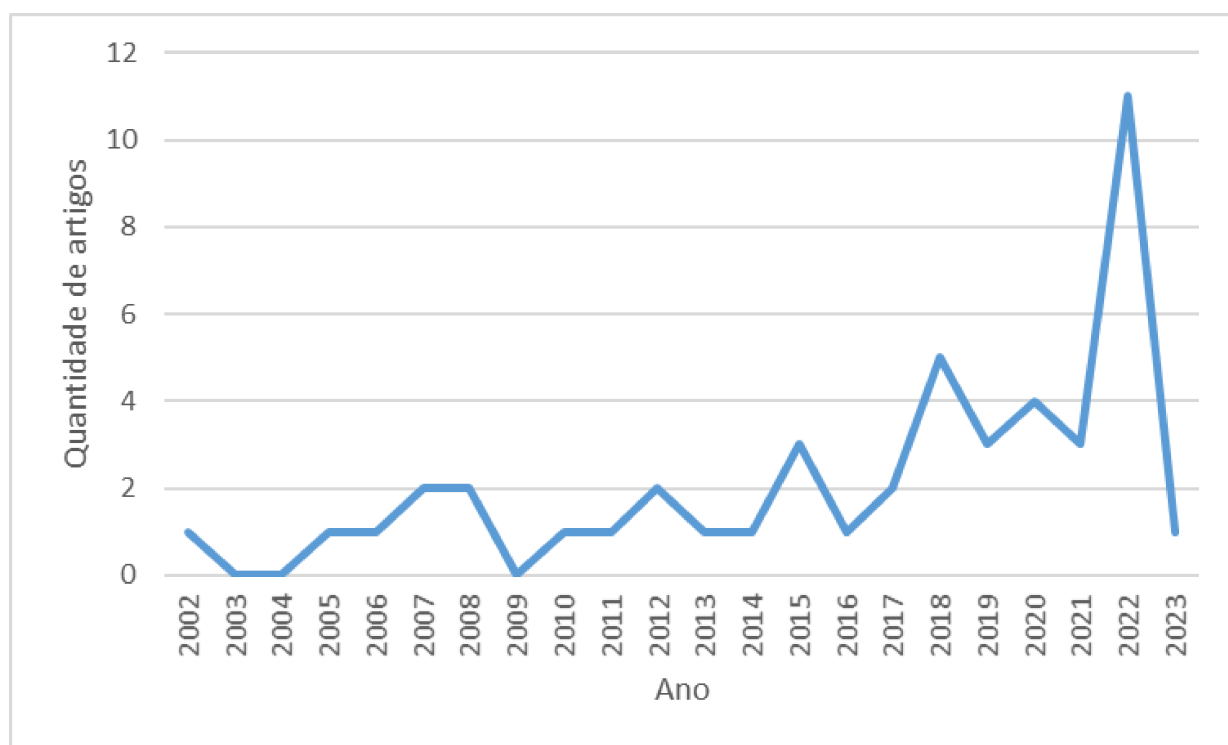
Os artigos avaliados nesse trabalho confirmaram a capacidade do HEC-HMS na previsão de vazões como, por exemplo, Ghumman et al. (2019) utilizaram o HEC-HMS para simular chuva-vazão em uma bacia do Afeganistão para prever as vazões, avaliando as mudanças climáticas.

Tassew et al. (2019) também usaram o HEC-HMS para prever as inundações do Lago Tana, localizado na bacia hidrográfica de Gilgel Ayyem. Por sua vez, Sardoii et al. (2012), usaram o software HEC-HMS juntamente com o sistema de informações geográficas GIS para simular o modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica de Amirkabir – localizada no Irã – e concluíram que a perda de escoamento de *Green and Ampt* pode ser aplicado em áreas

Assim, a partir do trabalho “Modelagem Hidrológica: uma revisão sistemática utilizando o StArt” realizou-se uma revisão bibliométrica mais detalhada com o objetivo de avaliar de forma quantitativa a produção acadêmica na área de modelagem hidrológica com ênfase na modelagem chuva-vazão e no HEC-HMS.

Analisando a Figura 2 que demonstra os anos de publicação dos artigos extraídos, pode-se observar que houve um crescente interesse na área, sendo o ano com mais publicações na área com, 11 artigos, seguidos pelo ano de 2020 com 5 e 4 artigos publicados, respectivamente (Carvalho *et al.*, 2024).

Figura 2 – Gráfico do ano de publicação dos artigos extraídos na revisão sistemática

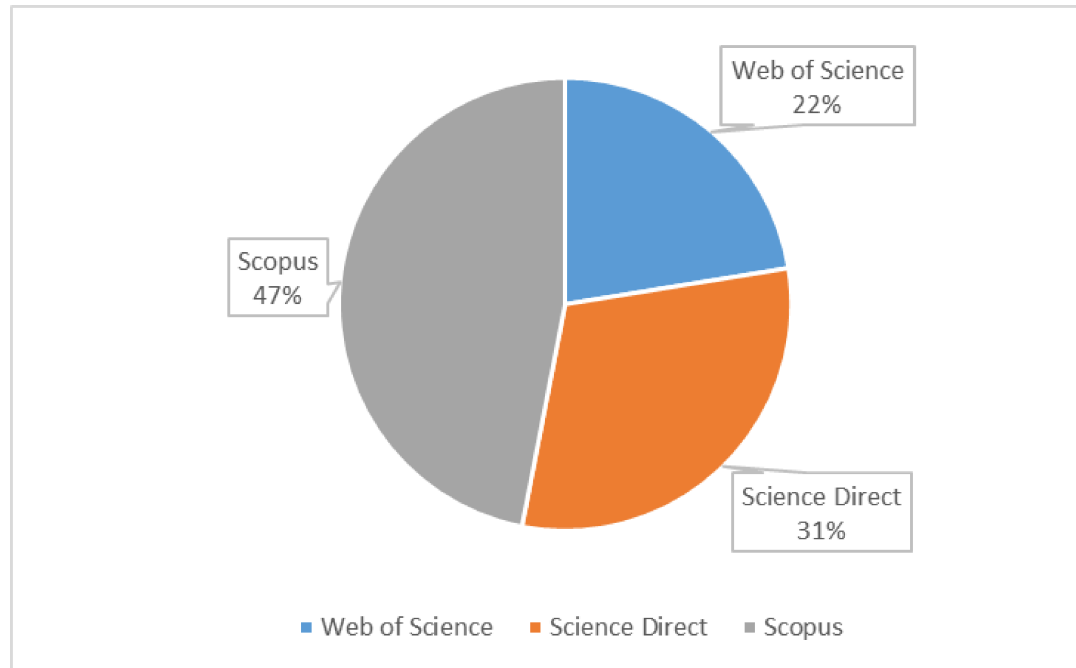


Fonte: elaborado pela autora.

Já os anos de 2003, 2004 e 2009, não tiveram nenhuma publicação na área. É importante ressaltar que o trabalho foi concluído em janeiro de 2023, por isso o ano de 2023 apresentou apenas um artigo.

Ainda de acordo com Carvalho *et al.* (2024), a plataforma Scopus foi a que mais retornou artigos, representando 47% dos artigos extraídos, como é apresentado no gráfico da Figura 3. Por sua vez, o *Journal of Hydrology* foi o

Figura 3 – Gráfico das plataformas que retornaram os artigos extraídos sistemática



Fonte: elaborado pela autora.

A nuvem de palavras apresentada na Figura 4 demonstra a diversidade de pesquisadores e de autores na área de modelagem hidrológica com destaque para o autor Zhang que aparece com mais trabalhos publicados dentre os artigos

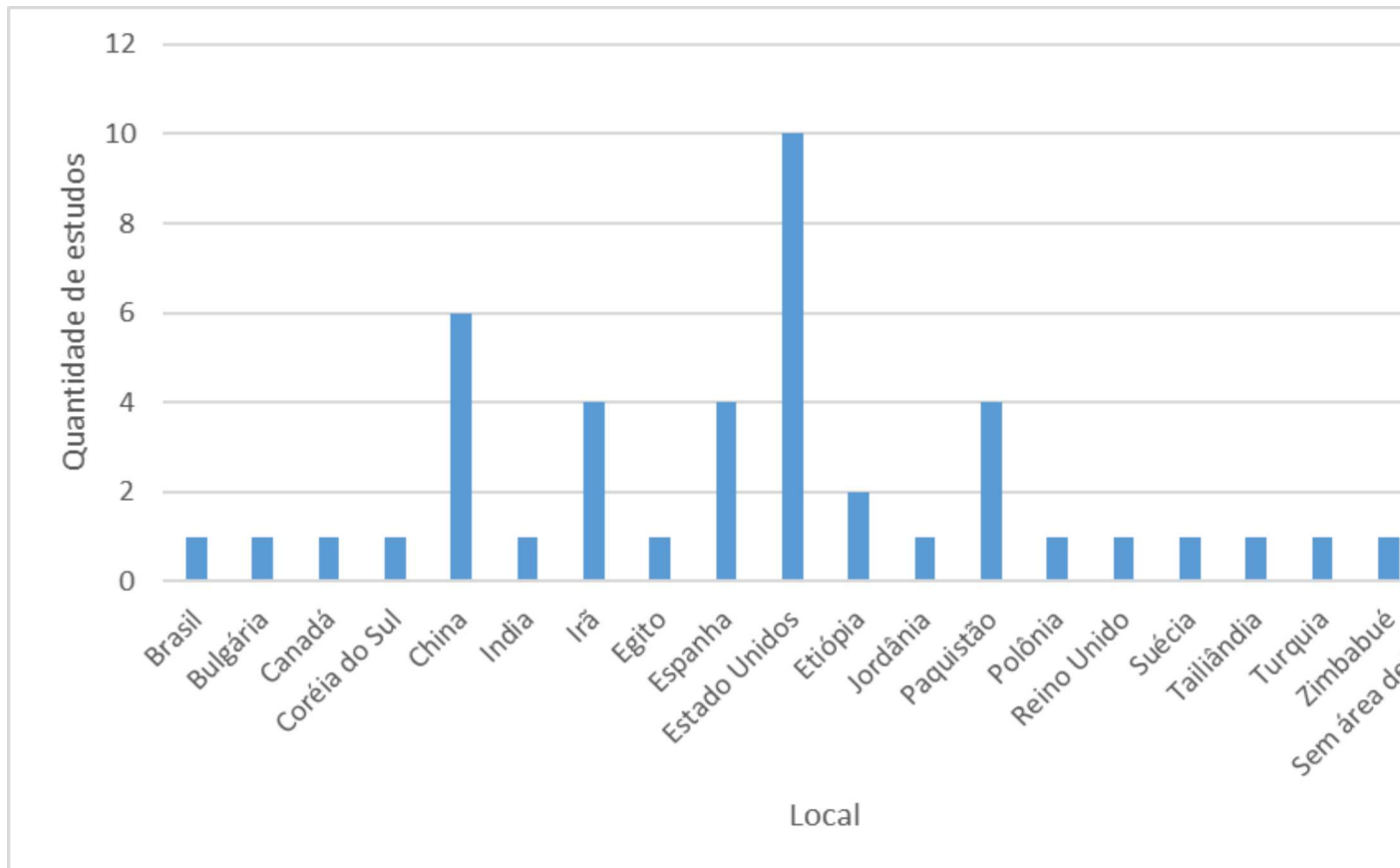
Figura 4 – Nuvem de palavras dos autores dos artigos extraídos na sistemática



Fonte: elaborado pela autora.

hidrográfica do rio Grande, indicando que ainda existem grandes lacunas a preencher na modelagem chuva-vazão em áreas brasileiras.

Figura 5 – Gráfico dos locais estudados nos artigos extraídos na revisão siste



Fonte: elaborado pela autora.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

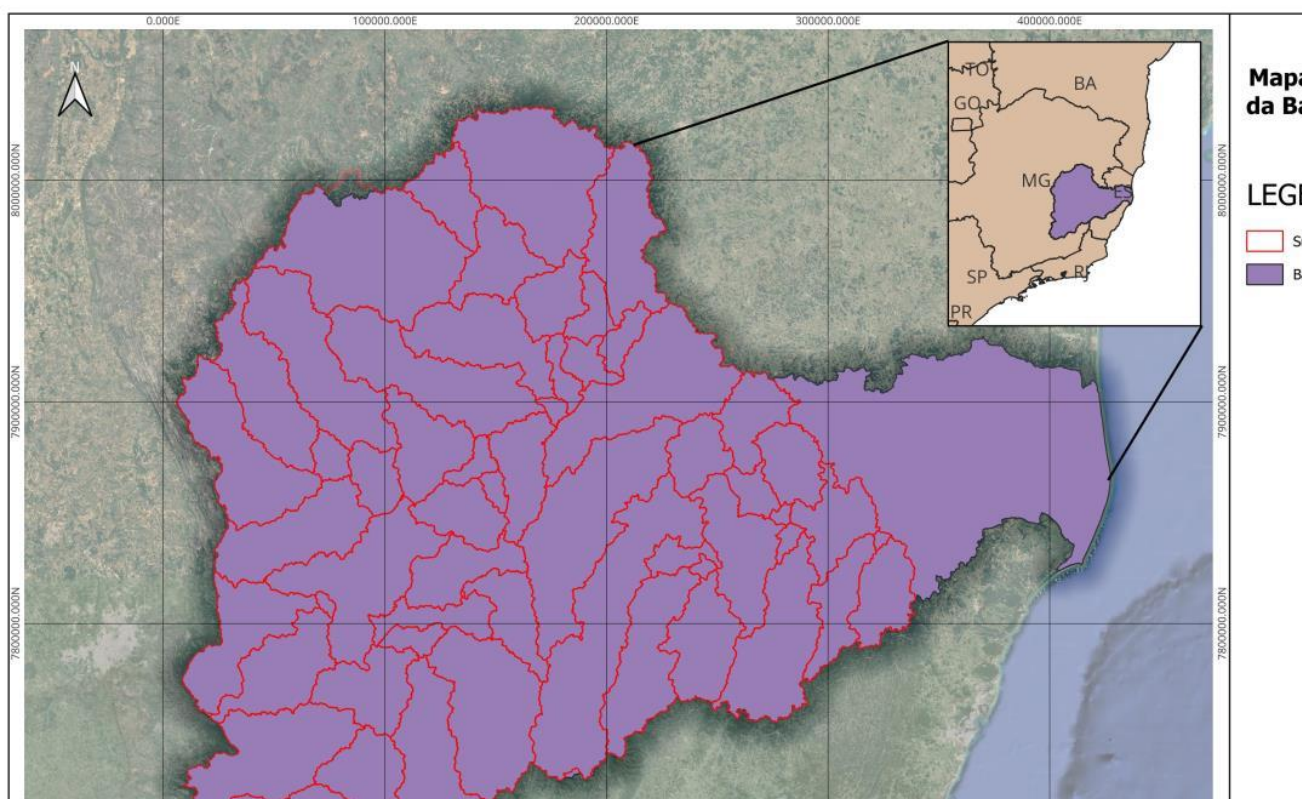
### 5.1 ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo compreendem as porções mineiras hidrográficas dos rios Doce e São Francisco.

#### 5.1.1 Porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Doce, especificamente, no leste do estado de Minas Gerais, conforme demonstrado na Figura 6, e possui 73.596 km<sup>2</sup>. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2023a), a população que reside na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce está distribuída em 203 municípios.

Figura 6 – Mapa de localização da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce





A parte pertencente ao estado de Minas Gerais subdivide-se em 6 Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs): Rio Piranga, Rio Piracicaba, Rio Santo Antônio, Rio Suaçuí, Rio Caratinga e Rio Manhuaçu (CBH-DOCE, 2023a).

O rio Doce possui nascente em Minas Gerais, especificamente nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço e sua foz localizada em Linhares, no Espírito Santo, totalizando 879 km de extensão. Pela margem esquerda, seus principais rios são o rio do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande, Suaçuí Grande, São João das Pancas. Pela margem direita, os rios Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté, Mar de Espanha, Guandu, Santa Joana e Santa Maria do rio Doce são os principais rios afluentes (CBH-DOCE, 2023a).

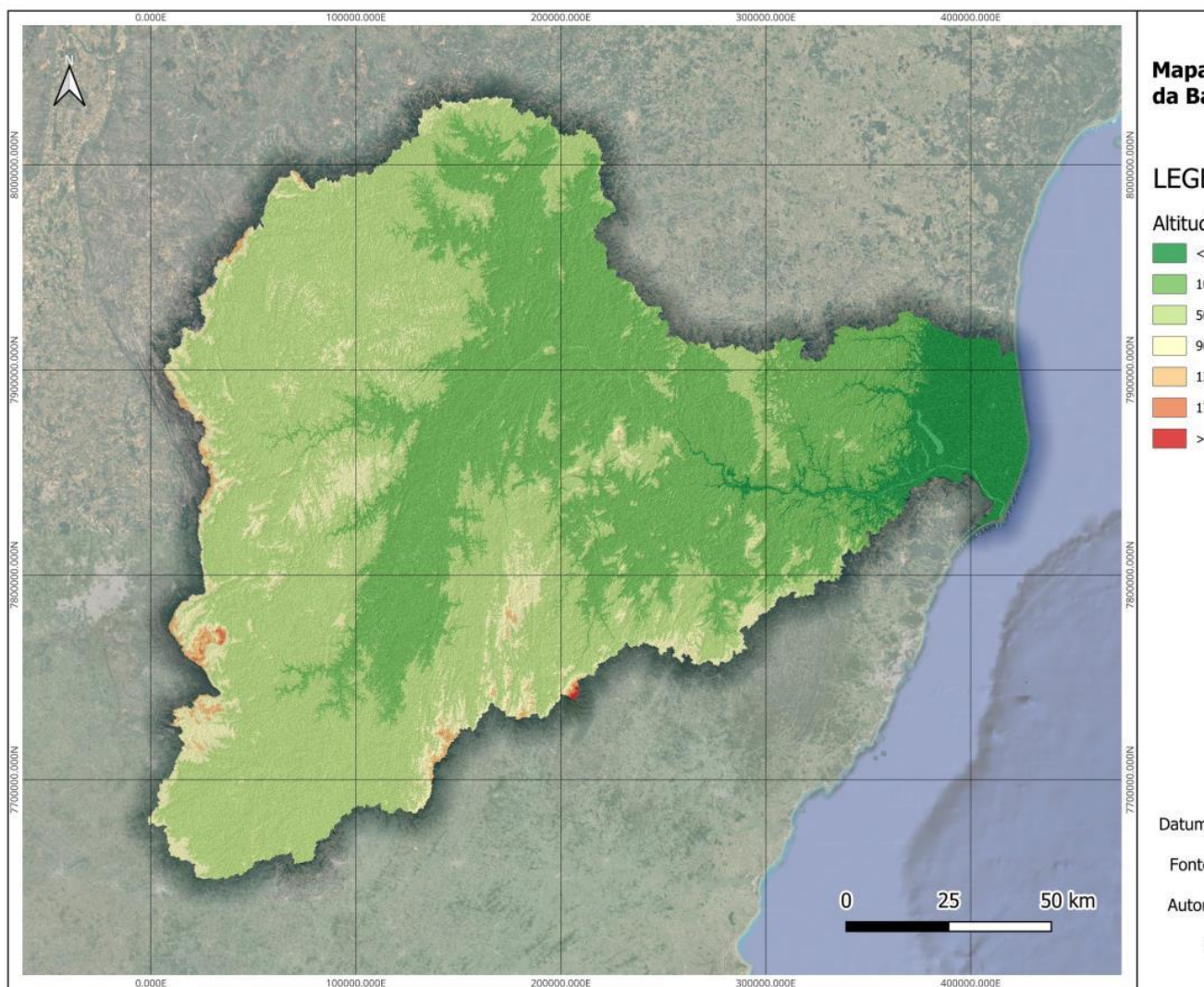
Em relação ao regime pluviométrico, tem-se dois períodos bem distintos: o período chuvoso que vai de outubro a março com uma precipitação de 800 mm no mês de mais chuva – dezembro - e o período seco que se estende de abril a setembro com precipitação variando entre 150 a 250 mm (CBH-DOCE, 2023).

No verão, a precipitação é causada pelo deslocamento da frente fria, o que acaba provocando enchentes e inundações, principalmente nos meses de dezembro a fevereiro, e constituindo um grande problema para a bacia que possui alta suscetibilidade à ocorrência de cheias na área urbana ao longo do rio Doce e de seus afluentes.

O relevo, segundo o CBH-DOCE (2023), é montanhoso, ondulante e acidentado, sendo caracterizado como “mar de morros”. Essa característica limita o espaço urbano, fazendo com que ficasse concentrado junto ao talvegue dos rios, de água, em áreas com risco de inundação.

As altitudes na porção mineira da bacia variam entre 0 e 2.600 m (CBH-DOCE, 2020). As áreas com altitudes mais baixas estão localizadas no leste e no norte da bacia e as áreas com altitudes mais elevadas se localizam nas regiões ocidentais, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Mapa de hipsometria da bacia hidrográfica do rio Doce

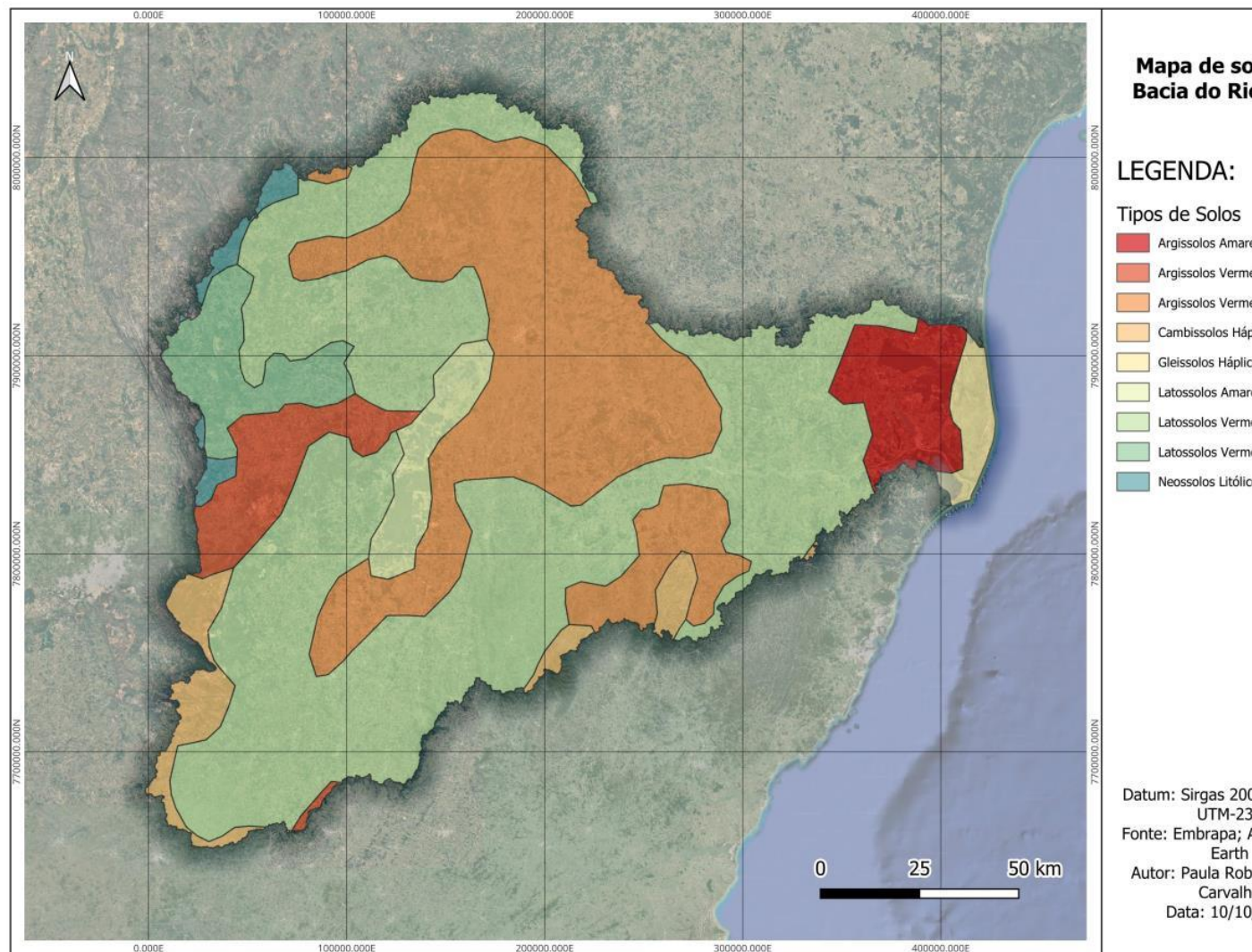


Fonte: elaborado pela autora.

A bacia do rio Doce é rica em biodiversidade e está inserida em sua maior parte (98%) no bioma de Mata Atlântica, sendo apenas 2% de Cerrado. Possui grande disponibilidade hídrica, mas a distribuição entre as diferentes partes da bacia é desigual (CBH-DOCE, 2023).

De maneira geral, a atividade econômica nessa bacia é bastante diversificada, entre as quais se destacam: na agropecuária, cafeicultura, cana-de-açúcar, suinocultura e criação de gado de corte e leiteiro; na agroindústria, a produção de álcool e açúcar. Pode-se destacar, ainda, as empresas de madeireira, reflorestadoras, indústrias de celulose e laticínios e geração de energia.

Figura 8 – Mapa de solos da porção mineira da bacia hidrográfica do rio D



Fonte: elaborado pela autora.

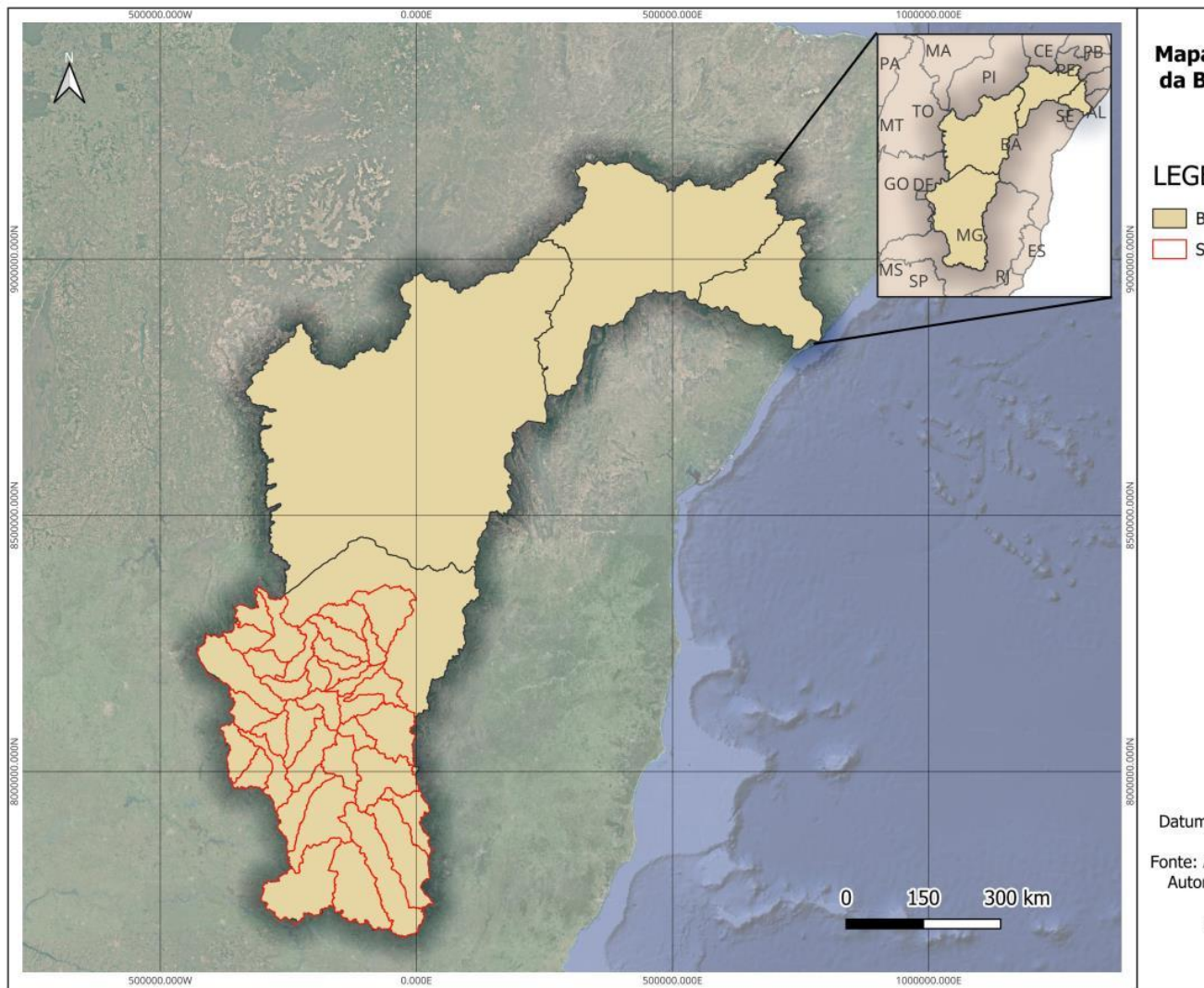
#### 5.1.4 Porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco

A bacia 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 demonstrado na Figura 9 (ANA, 2023b).

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 região (CODEVASE, 2024).



Figura 9 – Mapa de localização da porção mineira da bacia hidrográfica  
Francisco



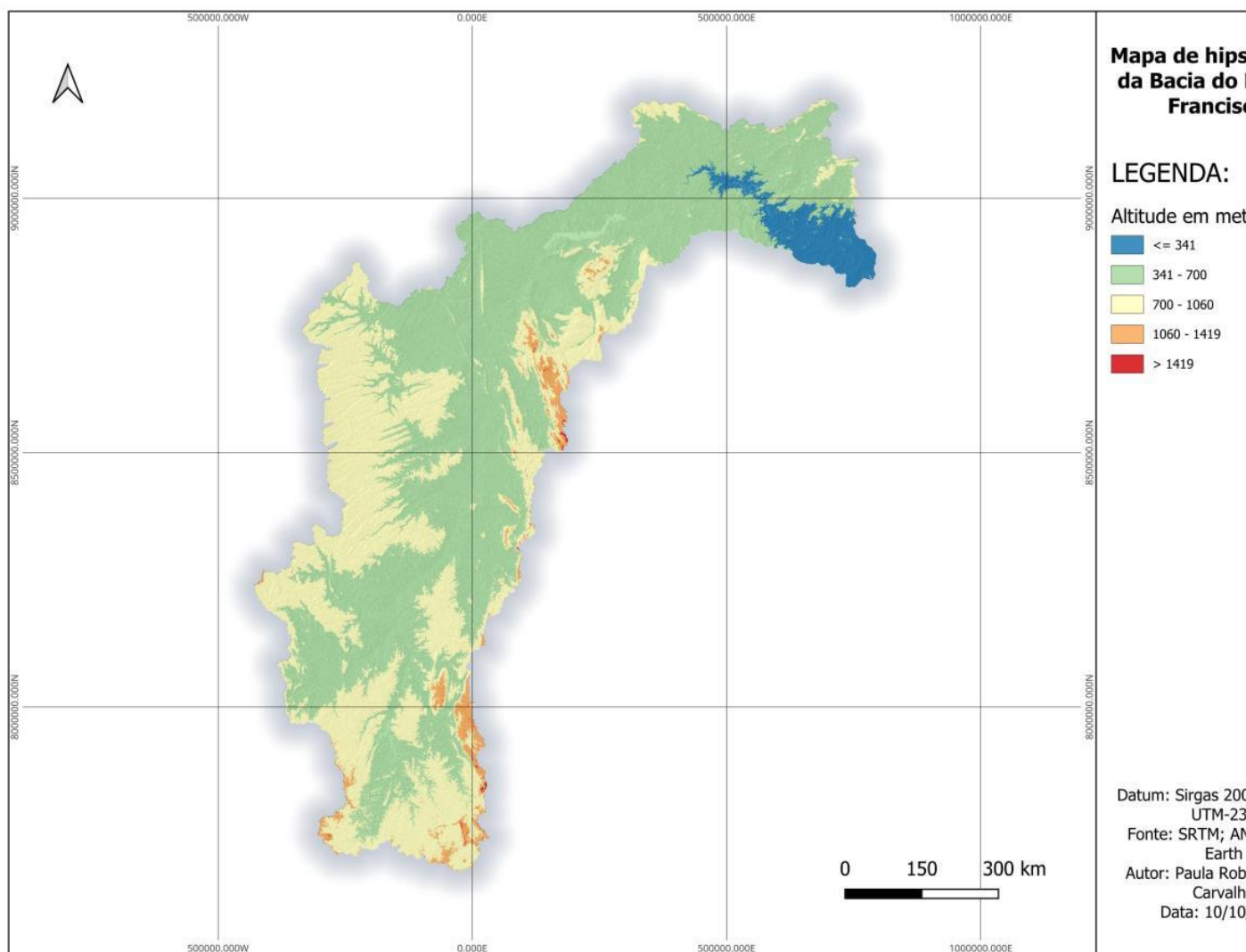
Fonte: elaborado pela autora.

O rio São Francisco possui 36 afluentes mais importantes, dentre os quais podem-se destacar: pela margem direita, os rios Pará, Paraopeba, Velho Grande e, pela margem esquerda, os rios Abaeté, Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande (ANA, 2023b).

No que tange ao clima, apresenta uma transição do úmido para o semi-árido. A temperatura média anual pode variar de 18 a 27°C. Os valores máximos de pluviosidade, cerca de 1.400 mm, ocorrem nas nascentes dos rios. O período chuvoso é de novembro a janeiro e o período mais seco vai de junho a agosto.

As altitudes na porção mineira da bacia do rio São Francisco apresenta grande variação, conforme é possível observar na Figura 10. A altitude máxima encontrada na nascente do rio, localizada na Serra da Canastra, em Minas Gerais, com cerca de 1.200 m (CBHSF, 2023).

Figura 10 – Mapa de hipsometria da bacia hidrográfica do rio São Francisco

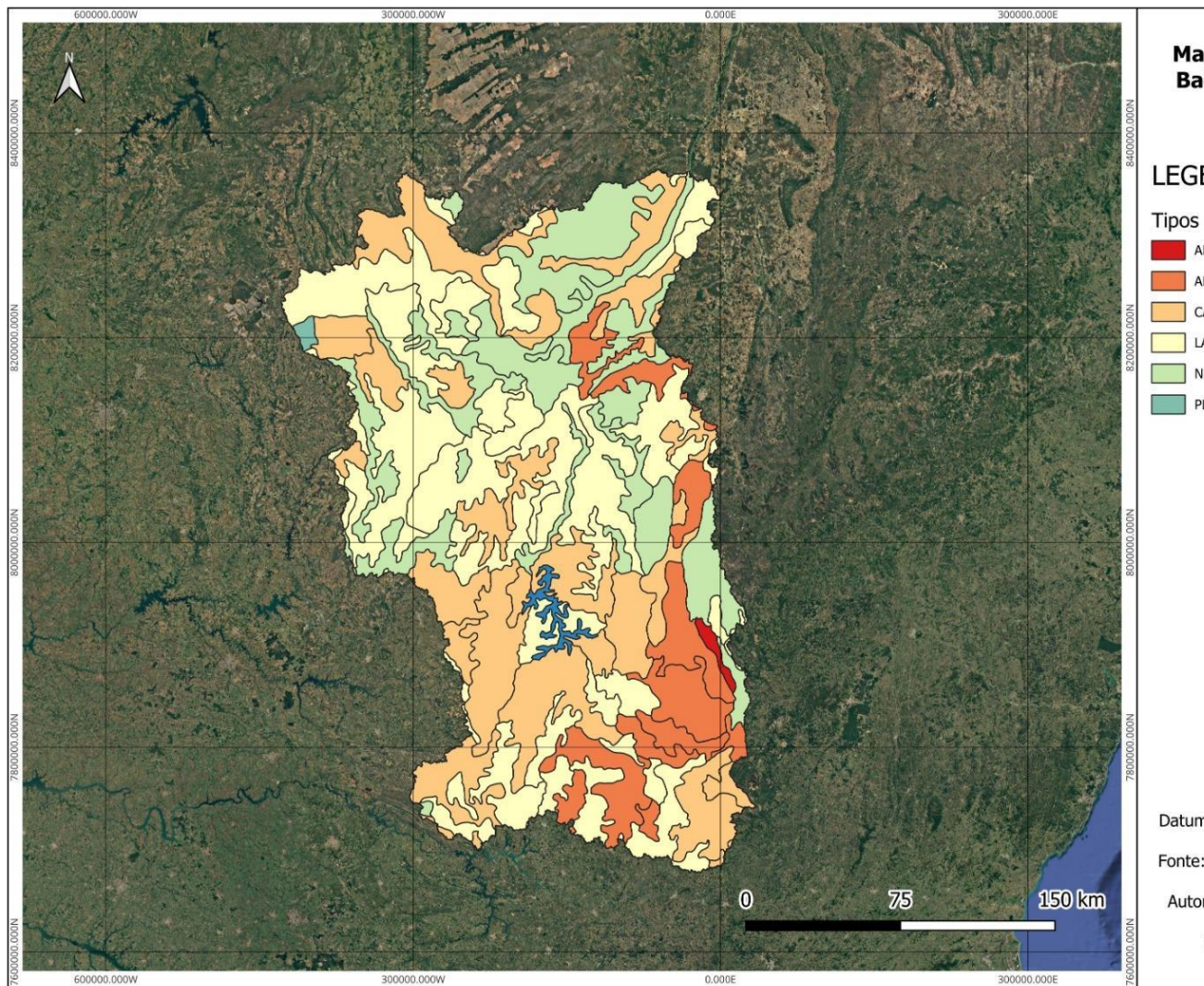


Fonte: elaborado pela autora.

Conforme indicado na Figura 11, os solos que predominam na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco compreendem os tipos de Latossolos, Cambissolos e Argissolos (EMBRAPA, 1999).



Figura 11 – Mapa de solos da porção mineira da bacia hidrográfica do rio  
São Francisco



Fonte: elaborado pela autora.

## 5.2 BASE DE DADOS

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido através *OpenTopography DEM* no software QGIS – software de acesso livre e gratuito. O complemento permite baixar dados de MDE Globais como STRM, ALOS, NASADEM, entre outros. No presente trabalho, utilizou-se o SRTM para delimitar as bacias hidrográficas do rio Doce e do rio São Francisco.

Os mapas de solos das bacias hidrográficas (escala 1:5.000

2015) – conjunto de dados de precipitação coletados a partir de observações e remotas de alta resolução espacial ( $0.05^\circ$ ) – utilizando o *Google Earth Engine* (GEE).

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

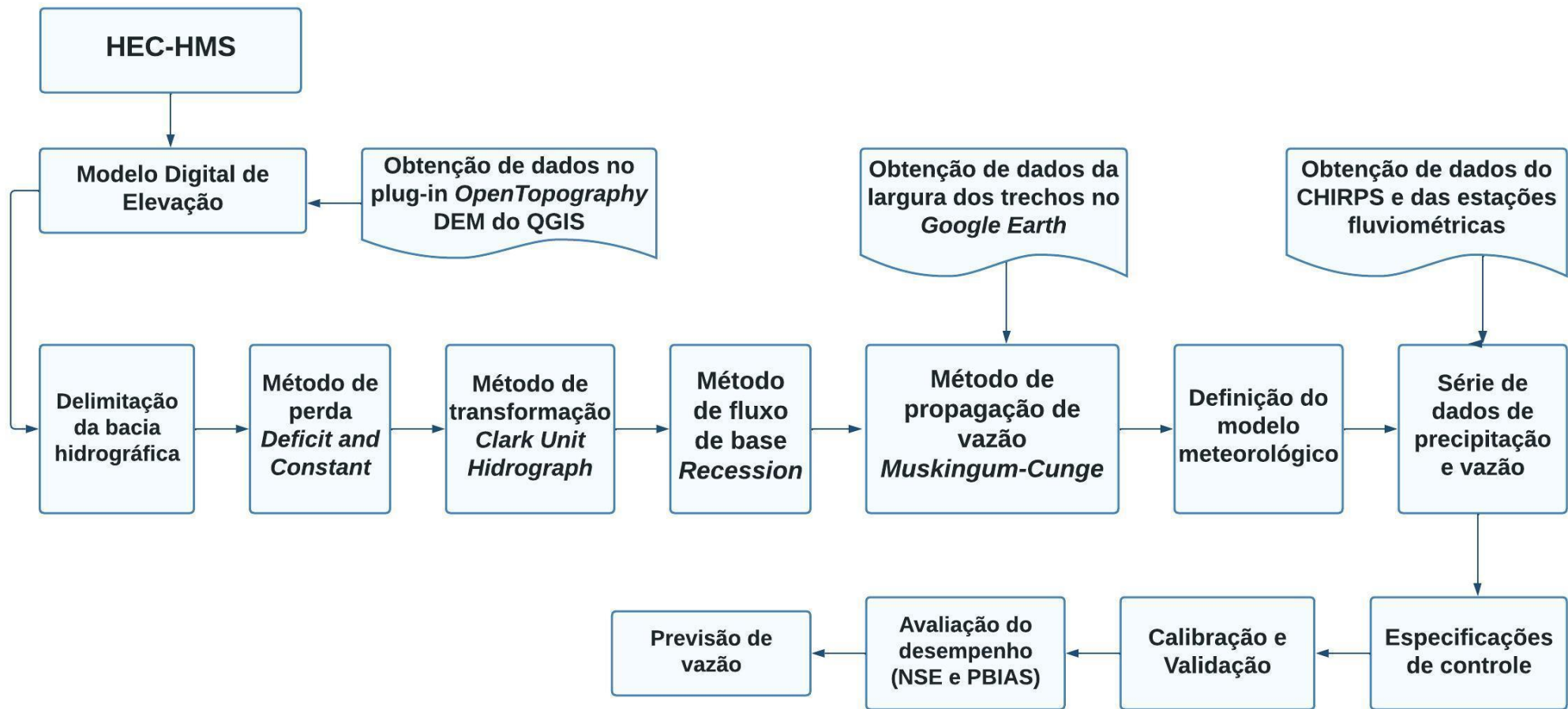
Foram analisadas todas as estações fluviométricas de cada bacia hidrográfica e escolhidas as estações que possuíam dados completos no período da calibração (01 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2017) e da validação (01 de janeiro de 2019 a 31 de dezembro de 2022). Nos trechos de rio que não possuíam estações fluviométricas com dados completos de vazão, utilizou-se a estação que apresentava menos falha no período estudado.

Já os dados históricos de defluência dos reservatórios foram retirados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA para o período de calibração e validação.

### 5.3 MODELO HEC-HMS

As etapas da simulação chuva-vazão no software HEC-HMS estão de forma resumidamente no fluxograma apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma da simulação no HEC-HMS



Fonte: elaborado pela autora.



Primeiramente, o projeto foi criado e realizou-se a delimitação e subdivisão da bacia hidrográfica utilizando os componentes *Basin Model* e *Terrain Data* das ferramentas do GIS *Preprocess Sinks*, *Preprocess Drainage*, *Identify Streams*, *Points Manager* e *Delineate Elements*. Utilizou-se o elemento *Source* (fontes) para introduzir o fluxo em alguns pontos das bacias com a presença de Hidrelétricas (UHEs) 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 em áreas que têm características específicas de armazenamento, infiltração 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 evento em relação a sua capacidade de infiltração e armazenamento. Já a constante refere-se a um parâmetro de ajuste às 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 entra 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 recalcular 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 utilizado e utilizado para cálculos de propagação de vazão em rios. Esse método...

*Maximum Storage* (Armazenamento máximo em mm), *Constant* constante em mm/hr) e *Impervious* (Impermeabilidade em %).

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

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

$$t_c = 21,88A^{0,77} I^{-0,17}$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em horas;

$A$  = área de drenagem da sub-bacia, em  $\text{km}^2$ ; 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:

$$S = 125,5A^{0,23} L^{-0,7}$$

Onde:

$S$  = coeficiente de armazenamento, em horas;

$A$  = área de drenagem da sub-bacia, em  $\text{km}^2$ ; 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

No método de fluxo de base *Recession* (Recessão), definiu-se o *Initial Discharge* (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  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ), *Recession Constant* (Constante de recessão) e *Ratio to Peak* (Relação ao pico).

A constante de recessão descreve a taxa na qual o fluxo de base recua após 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  $10\text{m}^3/\text{s}$  se o pico fosse de  $100\text{m}^3/\text{s}$ .

Para os trechos dos rios utilizou-se os seguintes dados de entrada no método *Muskingum-Cunge*: *Length* (comprimento em mm), *Slope* (declividade em  $\text{m}/\text{km}$ ), *Manning's n* (coeficiente de Manning) e *Index Celerity* (fluxo de celeridade em  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Uma vez que foi o método de índice escolhido. Ademais, definiu-se o *Shape* da seção como retangular e calculou o parâmetro *Width* (largura em m) com a 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 meteorológico) foi criada a sequência, para ligar cada sub-bacia a uma determinada estação. Posteriormente adicionou-se o *Control Specifications* (especificações de controle) e definiu-se o horário de início e de fim do evento e o tempo de intervalo para criar e re-

$$NSE = 1 - \frac{\sum i(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum i(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Onde:

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

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

$\bar{Q}_{obs}$  = vazão média das séries históricas observadas que compo período de simulação.

Para avaliação dos métodos realizou-se ainda uma comparação o viés percentual – *Percent Bias* (PBIAS). O viés percentual mede a t modelo de subestimar ou superestimar os valores assumidos por uma calculado pela equação 4:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum i(Q_{obs} - Q_{sim}).(100)}{\sum i(Q_{obs})} \right]$$

Onde:

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

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

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

O manual de referência técnica do HEC-HMS fornece uma avaliação do desempenho do modelo baseado – adaptada de Moriasi *et al* 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	$0,55 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS$

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, das condições de limite e do escopo do projeto.

Os parâmetros de entrada para as porções mineiras da bacia do rio São Francisco estão apresentados no Apêndice B e da bacia do rio São Francisco no Apêndice C. A calibração foi realizada de montante para jusante manualmente, por tentativa e erro, alterando um parâmetro por vez a fim de observar os parâmetros 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 *Acces Community Climate Model 2 (ACCESS-CM2)* que simula interações entre o clima e a superfície terrestre e os recursos hídricos – cenários SSP245 e SSP585.

Os cenários SSP245 e SSP585 fazem parte dos *Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)* utilizados em modelagens climáticas para analisar os impactos das mudanças do clima sob diferentes condições socioeconômicas. O SSP245 é um cenário de mitigação moderada das mudanças climáticas, onde as emissões de gases de efeito estufa são controladas, podendo ser considerado otimista. As simulações neste cenário podem prever chuvas intensas que apesar de frequentes não são tão severas.

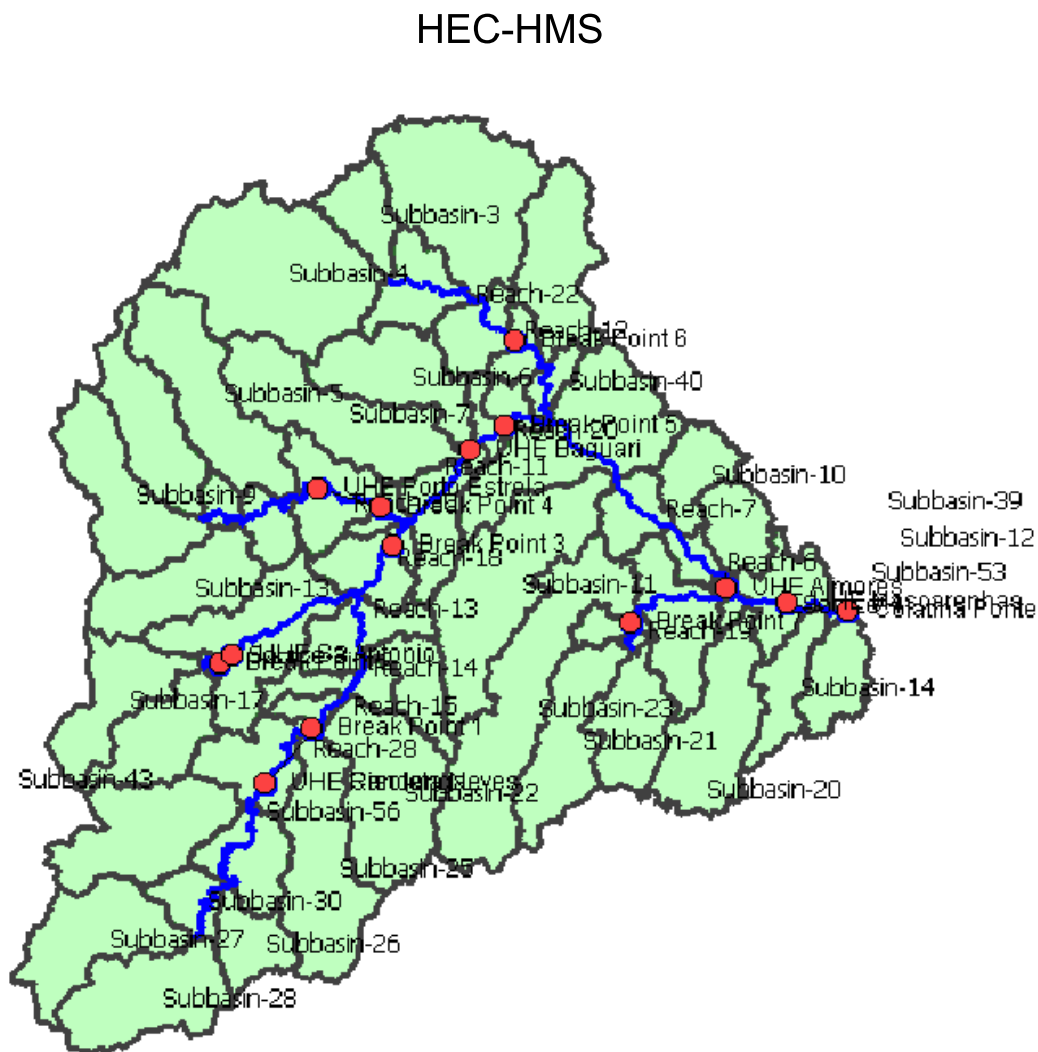
Por sua vez, o cenário SSP585 é considerado pessimista, onde há um aumento de gases do efeito estufa, ocasionando um aquecimento global mais acentuado. As simulações neste cenário representam um aumento na frequência e na intensidade de eventos extremos, podendo resultar em inundações.

Por fim, obteve-se a curva de permanência para as estações calibradas localizadas na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco – Hipólito, Pirapora Barreira e Manga – utilizando os dados da série histórica de vazão.

### 5.3.1 Modelo HEC-HMS da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce

A porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce foi dividida em sub-bacias, conforme demonstra a Figura 13, para que as variáveis de entrada do modelo não fossem generalizadas e representassem o mais próximo possível da realidade, melhorando, assim, a confiabilidade do modelo.

Figura 13 – Projeto da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce para o modelo HEC-HMS



Fonte: elaborado pela autora.

A foz da bacia foi colocada na estação Colatina Ponte (ES) após 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

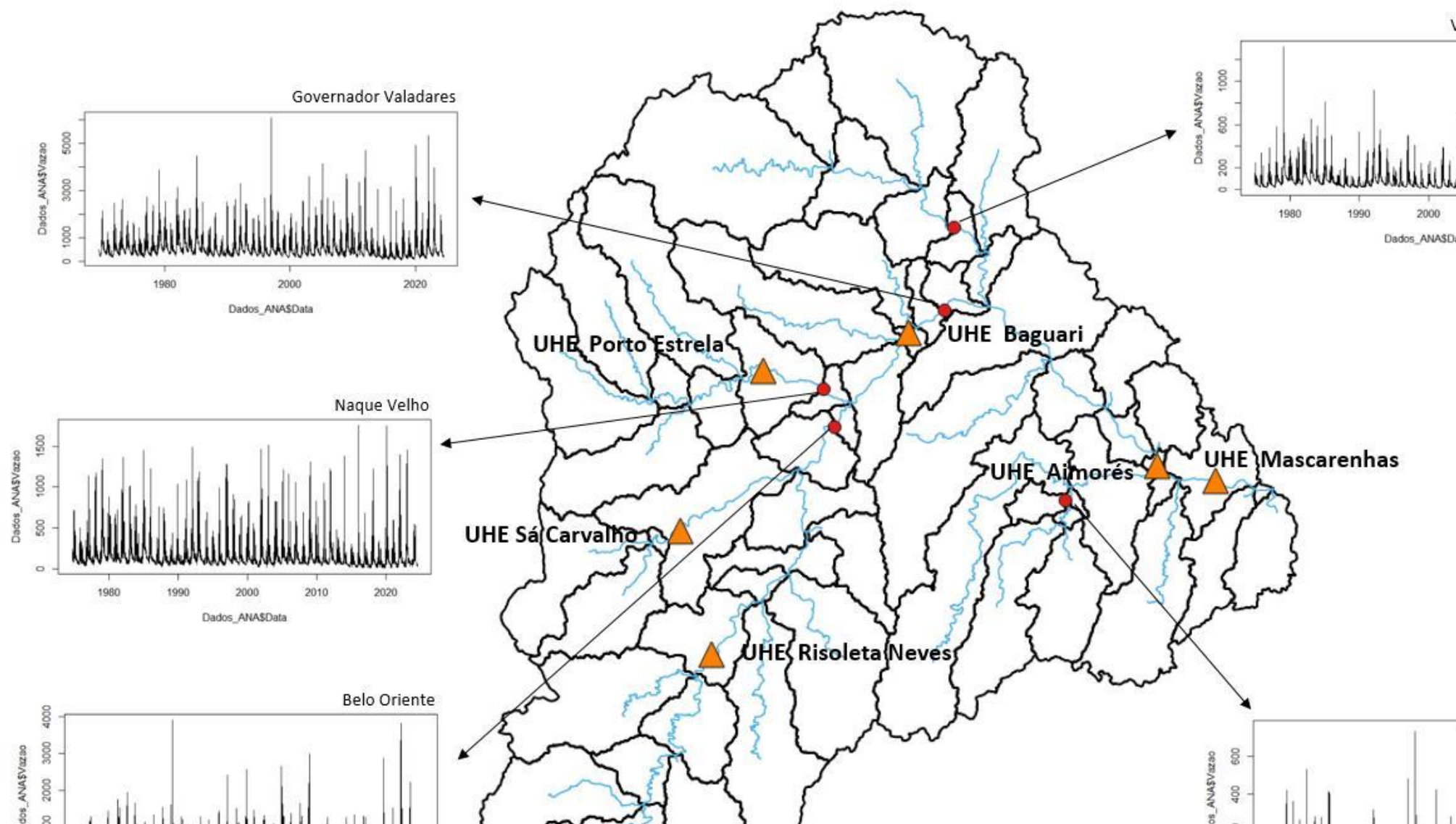
- UHE Candonga: também conhecida como UHE Risoleta Neves, entrou em operação em 7 de setembro de 2004 e está localizada próxima a cabeceira do rio Doce, entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado. Possui três unidades geradoras com potência instalada de 140 MW (Candonga, 2024);
- UHE Mascarenhas: localizada no município de Baixo Guandu (ES), entrou em funcionamento no ano de 1974 e tem capacidade instalada de 190 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 João Pinheiro (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 (Candonga, 2024a).

As estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce com suas respectivas informações são apresentadas na Tabela 2. A Figura 14 demonstra a localização das estações fluviométricas no mapa da bacia e o gráfico da série temporal de vazão da estação utilizada na calibração.

Tabela 2 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia do rio Doce

Código da Estação	Nome da Estação	Rio	Latitude	Longitude	Área drenada (km <sup>2</sup> )
56719998	Belo Oriente	Rio Doce	-19.3297	-42.3761	242
56825000	Nogueira Velha	Rio Santo Antônio	19.1881	42.4228	109

Figura 14 – Série temporal das vazões nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce





As Tabelas 3, 4 e 5 demonstram os valores dos parâmetros obtidos na calibração para as sub-bacias da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce. Os dados referentes aos trechos podem ser encontrados na Tabela 6.

Tabela 3 – Parâmetros do método *Deficit and Constant* calibrados para a porção mineira da bacia do rio Doce

Sub-bacia	<i>Initial Deficit</i> (mm)	<i>Maximum Storage</i> (mm)	<i>Constant Rate</i> (mm/hr)	<i>Imperviousness</i>
<i>Subbasin-1</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-2</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-3</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-4</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-5</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-6</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-7</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-8</i>	10	100	1	20
<i>Subbasin-9</i>	10	100	1	40
<i>Subbasin-10</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-11</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-12</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-13</i>	10	100	1	20
<i>Subbasin-14</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-15</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-16</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-17</i>	10	100	4.6	35
<i>Subbasin-18</i>	10	100	1.2	5
<i>Subbasin-19</i>	10	100	4.6	20
<i>Subbasin-20</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-21</i>	10	100	1.2	25

Sub-bacia	<i>Initial Deficit</i> (mm)	<i>Maximum Storage</i> (mm)	<i>Constant Rate</i> (mm/hr)	<i>Imp</i>
<i>Subbasin-26</i>	10	100	1.4	5
<i>Subbasin-27</i>	10	100	1.4	5
<i>Subbasin-28</i>	10	100	1.4	5
<i>Subbasin-29</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-30</i>	10	100	1.4	10
<i>Subbasin-31</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-32</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-33</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-34</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-35</i>	10	100	1.4	15
<i>Subbasin-37</i>	10	100	4.6	0
<i>Subbasin-38</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-39</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-40</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-41</i>	10	100	0.01	90
<i>Subbasin-42</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-43</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-44</i>	10	100	1	10
<i>Subbasin-45</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-46</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-47</i>	10	100	1.2	0
<i>Subbasin-48</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-49</i>	10	100	1	60
<i>Subbasin-50</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-51</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-52</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-53</i>	10	100	1	0

Sub-bacia	<i>Initial Deficit</i> (mm)	<i>Maximum Storage</i> (mm)	<i>Constant Rate</i> (mm/hr)	<i>Impervio</i>
<i>Subbasin-57</i>	10	100	4.6	10
<i>Subbasin-58</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-59</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-60</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-61</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-62</i>	10	100	1	0

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 4 – Parâmetros do método *Clark Unit Hydrograph* calibrados p  
porção mineira da bacia do rio Doce

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (hr)
<i>Subbasin-1</i>	3263.0	140.34432	260.3797436	25.34
<i>Subbasin-2</i>	1898.6	132.97829	210.4564869	23.23
<i>Subbasin-3</i>	864.31	73.08633	168.7445215	29.47
<i>Subbasin-4</i>	3953.3	181.71221	269.5910844	22.10
<i>Subbasin-5</i>	2477.6	174.64517	224.0956818	20.41
<i>Subbasin-6</i>	1718.0	145.51994	198.9344451	21.31
<i>Subbasin-7</i>	2545.3	173.63215	226.8105095	20.62
<i>Subbasin-8</i>	1766.5	147.16164	200.8347341	21.28
<i>Subbasin-9</i>	2109.7	124.71266	222.163656	24.89
<i>Subbasin-10</i>	907.76	68.24892	174.1883726	31.27
<i>Subbasin-11</i>	3228.3	220.19307	240.131974	18.44
<i>Subbasin-12</i>	861.97	53.40087	177.7935015	36.69
<i>Subbasin-13</i>	1783.4	127.59610	206.5698586	23.57
<i>Subbasin-14</i>	904.85	100.52628	162.875659	23.83
<i>Subbasin-15</i>	959.79	94.67121	168.5699589	25.19

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (
<i>Subbasin-19</i>	1409.4	120.04657	189.5229941	23.
<i>Subbasin-20</i>	2152.9	175.88745	211.2988699	19.
<i>Subbasin-21</i>	1810.1	158.16233	200.3816053	20.
<i>Subbasin-22</i>	2587.1	135.98762	238.0158304	24.
<i>Subbasin-23</i>	3782.5	291.70770	244.2842909	15.
<i>Subbasin-24</i>	2281.9	167.75744	218.1488977	20.
<i>Subbasin-25</i>	2493.7	210.99448	217.5842002	17.
<i>Subbasin-26</i>	848.79	78.10025	165.6168461	28.
<i>Subbasin-27</i>	1994.6	135.49715	214.0721025	23.
<i>Subbasin-28</i>	2088.5	126.07260	220.8380653	24.
<i>Subbasin-29</i>	1188.5	74.58016	191.624494	31.
<i>Subbasin-30</i>	594.19	62.18035	148.7427028	30.
<i>Subbasin-31</i>	293.99	46.74390	117.0066179	31.
<i>Subbasin-32</i>	275.28	47.76665	113.4759206	30.
<i>Subbasin-33</i>	584.15	63.40088	147.2197633	29.
<i>Subbasin-34</i>	1048.2	87.88811	176.9951231	27.
<i>Subbasin-35</i>	1091.9	120.71389	170.5310873	21.
<i>Subbasin-37</i>	73.596	23.68464	74.439	36.
<i>Subbasin-38</i>	855.95	64.08801	171.8696159	32.
<i>Subbasin-39</i>	1503.7	93.84418	202.9430397	28.
<i>Subbasin-40</i>	357.01	59.42620	121.63821	27.
<i>Subbasin-41</i>	60.530	17.75384	72.157	43.
<i>Subbasin-42</i>	654.71	71.05256	151.3069382	28.
<i>Subbasin-43</i>	995.71	69.18245	180.5021937	31.
<i>Subbasin-44</i>	290.59	44.24235	117.5438465	32.
<i>Subbasin-45</i>	1034.9	84.42970	177.2766207	27.
<i>Subbasin-46</i>	106.68	19.15193	89.864	46.

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (hr)
<i>Subbasin-50</i>	368.67	41.55445	130.9796524	35.97
<i>Subbasin-51</i>	67.278	14.71760	77.793	50.30
<i>Subbasin-52</i>	121.50	30.20966	87.7200356	34.83
<i>Subbasin-53</i>	1042.5	63.92160	186.4225334	33.79
<i>Subbasin-54</i>	43.040	13.44085	65.781	48.37
<i>Subbasin-55</i>	0.2522	0.98273	12.475	92.54
<i>Subbasin-56</i>	1179.5	97.50592	182.5190535	25.87
<i>Subbasin-57</i>	2371.8	138.38362	229.0049803	23.78
<i>Subbasin-58</i>	151.29	32.86789	94.606	34.54
<i>Subbasin-59</i>	369.44	47.72688	128.0414564	32.66
<i>Subbasin-60</i>	406.99	42.48198	135.8882303	36.23
<i>Subbasin-61</i>	330.32	50.70009	121.0484214	30.51
<i>Subbasin-62</i>	242.58	36.69795	112.6804979	35.64

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 5 – Parâmetros do método *Recession* calibrados para a porção mineira da bacia do rio Doce

Sub-bacia	<i>Initial Discharge</i> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	<i>Recession Constant</i>	<i>Ratio to Peak</i>
<i>Subbasin-1</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-2</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-3</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-4</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-5</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-6</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-7</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-8</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-9</i>			

<i>Sub-bacia</i>	<i>Initial Discharge (m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>)</i>	<i>Recession Constant</i>	<i>Ratio to Peak</i>
<i>Subbasin-13</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-14</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-15</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-16</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-17</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-18</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-19</i>	0	0.8	0.6
<i>Subbasin-20</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-21</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-22</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-23</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-24</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-25</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-26</i>	0	0.9	0.9
<i>Subbasin-27</i>	0	0.9	0.9
<i>Subbasin-28</i>	0	0.9	0.9
<i>Subbasin-29</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-30</i>	0	0.9	0.9
<i>Subbasin-31</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-32</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-33</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-34</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-35</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-37</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-38</i>	0	0.9	0.9
<i>Subbasin-39</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-40</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-41</i>			

<i>Sub-bacia</i>	<i>Initial Discharge (m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>)</i>	<i>Recession Constant</i>	<i>Ratio to Peak</i>
<i>Subbasin-45</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-46</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-47</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-48</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-49</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-50</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-51</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-52</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-53</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-54</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-55</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-56</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-57</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-58</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-59</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-60</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-61</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-62</i>	0	0.8	0.5

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 6 – Parâmetros do método *Muskingum-Cunge* calibrados para a porção mineira da bacia do rio Doce

Trecho	<i>Length (m)</i>	<i>Slope (m/m)</i>	<i>Manning's n</i>	<i>Index Celerity (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>W<sub>0</sub> (m)</i>
<i>Reach-1</i>	208.96	0.00001	0.025	1.5	35
<i>Reach-2</i>	9351.06	0.00075	0.025	1.5	35
<i>Reach-3</i>	38021.23	0.00071	0.025	1.5	35

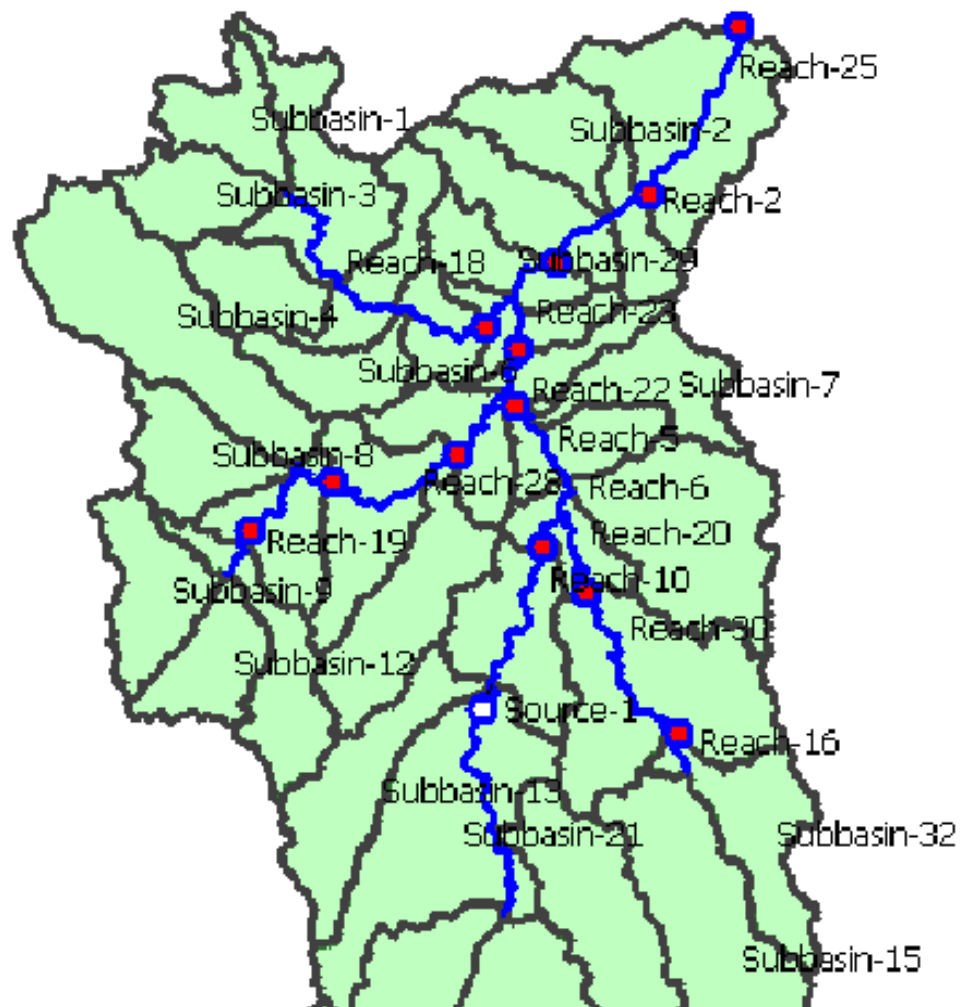
<i>Trecho</i>	<i>Length (m)</i>	<i>Slope (m/m)</i>	<i>Manning's n</i>	<i>Index Celerity (m<sup>3</sup>/s)</i>
<i>Reach-7</i>	37570.82	0.00064	0.025	1.5
<i>Reach-8</i>	43128.88	0.00044	0.025	1.5
<i>Reach-9</i>	40238.75	0.00057	0.025	1.5
<i>Reach-10</i>	9304.08	0.00021	0.025	1.5
<i>Reach-11</i>	42275.24	0.00064	0.025	1.5
<i>Reach-12</i>	51195.07	0.00045	0.025	1.5
<i>Reach-13</i>	38511.74	0.00044	0.025	1.5
<i>Reach-14</i>	24946.46	0.00072	0.025	1.5
<i>Reach-15</i>	19157.49	0.00068	0.025	1.5
<i>Reach-16</i>	39554.13	0.00056	0.025	1.5
<i>Reach-17</i>	52710.84	0.00157	0.025	1.5
<i>Reach-18</i>	69240.87	0.00123	0.025	1.5
<i>Reach-19</i>	57725.42	0.00111	0.025	1.5
<i>Reach-20</i>	74210.02	0.00057	0.025	1.5
<i>Reach-21</i>	94141.38	0.0022	0.025	1.5
<i>Reach-22</i>	57117.63	0.00119	0.025	1.5
<i>Reach-23</i>	47924.1	0.00217	0.025	1.5
<i>Reach-24</i>	29578.9	0.00118	0.025	1.5
<i>Reach-25</i>	30598.9	0.00046	0.025	1.5
<i>Reach-26</i>	58951.31	0.00051	0.025	1.5
<i>Reach-27</i>	110389.86	0.00293	0.025	1.5
<i>Reach-28</i>	66477.09	0.00131	0.025	1.5
<i>Reach-29</i>	2763.77	0.00072	0.025	1.5
<i>Reach-30</i>	17601.04	0.00068	0.025	1.5
<i>Reach-31</i>	24262.51	0.00058	0.025	1.5
<i>Reach-32</i>	21.11	0.00001	0.025	1.5
<i>Reach-33</i>	24996.8	0.00132	0.025	1.5



### 5.3.2 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 com a finalidade de realizar a modelagem apenas na área que está localizada em Minas Gerais e pertencente ao Alto São Francisco. Assim, a bacia hidrográfica foi discretizada em 36 sub-bacias para representar o modelo da melhor forma possível, como é indicado na Figura 15.

Figura 15 – Projeto da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco no HEC-HMS



Inseriu-se o elemento *Source* para representar os valores da d UHE de Três Marias que está localizada no rio São Francisco e começou em 1962. A UHE de Três Marias possui 6 unidades geradoras, potência 396 MW e o volume do reservatório é de 19.459hm<sup>3</sup> (CEMIG, 2024b).

A Tabela 7 apresenta as estações fluviométricas utilizadas na c porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Por sua vez, indica a localização de cada estação fluviométrica no mapa da b respectiva série temporal de dados de vazão.

Tabela 7 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção bacia do rio São Francisco

Código da Estação	Nome da Estação	Rio	Latitude	Longitude
41135000	Pirapora Barreiro	Rio São Francisco	-17.3692	-44.9431
41818000	Santo Hipólito	Rio das Velhas	-18.3061	-44.2258
41990000	Várzea da Palma	Rio das Velhas	-17.5961	-44.7133
42210000	Cachoeira da Manteiga	Rio São Francisco	-16.6572	-45.0808
42395000	Santa Rosa	Rio Paracatu	-17.255	-46.4728
42690001	Porto da Extrema	Rio Paracatu	-17.0303	-46.0136
43200000	São Romão	Rio São Francisco	-16.3719	-45.0664
44500000	Manga	Rio São Francisco	-14.7572	-43.9322

Fonte: elaborado pela autora.

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

Figura 16 – Série temporal das vazões nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da porção mineira da bacia do rio São Francisco

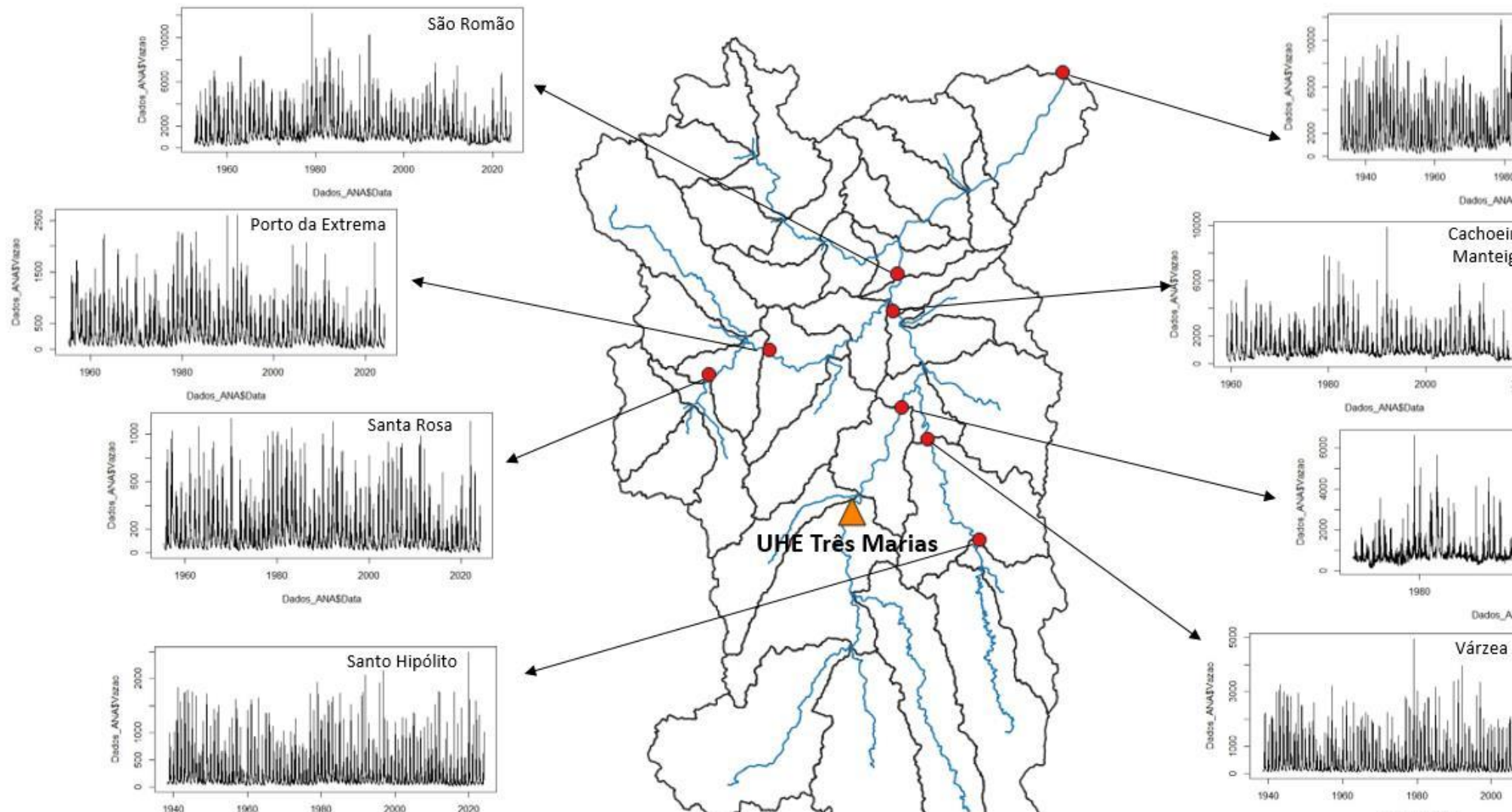


Tabela 8 – Parâmetros do método *Deficit and Constant* calibrados para  
mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	<i>Initial Deficit (mm)</i>	<i>Maximum Storage (mm)</i>	<i>Constant Rate (mm/hr)</i>	<i>Imp</i>
<i>Subbasin-1</i>	10	100	4.6	15
<i>Subbasin-2</i>	10	100	4.6	1
<i>Subbasin-3</i>	10	100	4.6	25
<i>Subbasin-4</i>	10	100	4.6	15
<i>Subbasin-5</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-6</i>	10	100	4.6	15
<i>Subbasin-7</i>	10	100	4.6	2
<i>Subbasin-8</i>	10	100	4.6	15
<i>Subbasin-9</i>	10	100	4.6	15
<i>Subbasin-10</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-11</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-12</i>	10	100	4.6	15
<i>Subbasin-13</i>	10	100	1	40
<i>Subbasin-14</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-15</i>	10	100	4.6	10
<i>Subbasin-16</i>	10	100	1	2
<i>Subbasin-17</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-18</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-19</i>	10	100	4.6	15
<i>Subbasin-20</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-21</i>	10	100	1	30
<i>Subbasin-22</i>	10	100	4.6	2
<i>Subbasin-23</i>	10	100	4.6	25
<i>Subbasin-24</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-25</i>	10	100	1	15

<i>Sub-bacia</i>	Initial Deficit (mm)	Maximum Storage (mm)	Constant Rate (mm/hr)	Impervio
<i>Subbasin-28</i>	10	100	4.6	12
<i>Subbasin-29</i>	10	100	4.6	2
<i>Subbasin-30</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-31</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-32</i>	10	100	1.2	45
<i>Subbasin-33</i>	10	100	4.6	5
<i>Subbasin-34</i>	10	100	4.6	20
<i>Subbasin-35</i>	10	100	1	25
<i>Subbasin-36</i>	10	100	1.2	10

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 9 – Parâmetros do método *Clark Unit Hydrograph* calibrados para a p  
mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (hr)
<i>Subbasin-1</i>	3473.8	147.00625	265.0514621	24.88
<i>Subbasin-2</i>	4328.4	165.85986	284.1747763	24.05
<i>Subbasin-3</i>	3609.6	159.77241	265.466813	23.68
<i>Subbasin-4</i>	11049.9	360.22671	365.7685286	17.34
<i>Subbasin-5</i>	3522.6	143.03243	267.8165526	25.45
<i>Subbasin-6</i>	3265.9	165.30680	253.3255985	22.60
<i>Subbasin-7</i>	4303.7	210.47830	272.2558924	20.33
<i>Subbasin-8</i>	4273.4	178.77510	279.1079946	22.76
<i>Subbasin-9</i>	4682.8	137.24314	303.0966999	27.97
<i>Subbasin-10</i>	9577.2	226.10208	373.3561858	23.24
<i>Subbasin-11</i>	6465.9	229.22538	317.0739345	21.03
<i>Subbasin-12</i>	3654.5	153.23517	268.7174357	24.45

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (
<i>Subbasin-17</i>	15438.4	369.65900	417.684191	18.
<i>Subbasin-18</i>	14966.9	506.74995	390.8736979	14.
<i>Subbasin-19</i>	6506.1	248.55199	313.536342	19.
<i>Subbasin-20</i>	3728.4	140.78829	274.862335	26.
<i>Subbasin-21</i>	12174	327.09653	386.8833683	18.
<i>Subbasin-22</i>	3799.7	177.54428	266.2946233	22.
<i>Subbasin-23</i>	5006.9	256.37079	280.1321289	18.
<i>Subbasin-24</i>	2569.3	122.88067	241.4677779	26.
<i>Subbasin-25</i>	5419.4	164.42063	312.071954	25.
<i>Subbasin-26</i>	2541.8	123.50788	240.1967839	26.
<i>Subbasin-27</i>	3476.7	145.56939	265.585259	25.
<i>Subbasin-28</i>	5805.4	205.57852	309.038284	22.
<i>Subbasin-29</i>	3173.0	136.93580	258.4890537	25.
<i>Subbasin-30</i>	2324.8	111.17157	235.7471639	27.
<i>Subbasin-31</i>	2479.1	108.46480	243.0573603	28.
<i>Subbasin-32</i>	5503.3	322.28186	280.0933051	15.
<i>Subbasin-33</i>	4981.0	191.64256	293.7132007	22.
<i>Subbasin-34</i>	9322.7	196.58764	378.141953	25.
<i>Subbasin-35</i>	3926.0	142.93805	280.0217747	26.
<i>Subbasin-36</i>	10857	234.88120	390.5207795	23.

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 10 – Parâmetros do método *Recession* calibrados para a porção  
bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	<i>Initial Discharge</i> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	<i>Recession Constant</i>	<i>Ratio to Peak</i>
<i>Subbasin-1</i>	0	0.8	0.8

<i>Sub-bacia</i>	Initial Discharge (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Recession Constant	Ratio to Peak
<i>Subbasin-6</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-7</i>	0	0.6	0.6
<i>Subbasin-8</i>	0	0.6	0.6
<i>Subbasin-9</i>	0	0.5	0.5
<i>Subbasin-10</i>	0	0.6	0.6
<i>Subbasin-11</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-12</i>	0	0.5	0.5
<i>Subbasin-13</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-14</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-15</i>	0	0.6	0.6
<i>Subbasin-16</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-17</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-18</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-19</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-20</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-21</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-22</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-23</i>	0	0.5	0.5
<i>Subbasin-24</i>	0	0.6	0.6
<i>Subbasin-25</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-26</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-27</i>	0	0.6	0.6
<i>Subbasin-28</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-29</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-30</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-31</i>	0	0.8	0.8

Tabela 11 – Parâmetros do método *Muskingum-Cunge* calibrados para  
mineira da bacia do rio São Francisco

Trecho	<i>Length (m)</i>	<i>Slope (m/m)</i>	<i>Manning's n</i>	<i>Index Celerity (m³/s)</i>
<i>Reach-1</i>	158.14022	0.00008	0.025	1.5
<i>Reach-2</i>	90.88431	0.00009	0.025	1.5
<i>Reach-3</i>	64.98758	0.00008	0.025	1.5
<i>Reach-4</i>	31.78721	0.00013	0.025	1.5
<i>Reach-5</i>	46.50696	0.00009	0.025	1.5
<i>Reach-6</i>	27.78229	0.00018	0.025	1.5
<i>Reach-7</i>	142.00494	0.00021	0.025	1.5
<i>Reach-8</i>	126.01883	0.00045	0.025	1.5
<i>Reach-9</i>	114.68646	0.00016	0.04	1.5
<i>Reach-10</i>	268.78909	0.00021	0.025	1.5
<i>Reach-12</i>	10.000000	0.00025	0.025	1.5
<i>Reach-13</i>	67.714000	0.00024	0.025	1.5
<i>Reach-14</i>	101.75859	0.00021	0.025	1.5
<i>Reach-15</i>	53.83727	0.00017	0.025	1.5
<i>Reach-16</i>	104.71859	0.00018	0.025	1.5
<i>Reach-18</i>	104.55461	0.0004	0.025	1.5
<i>Reach-19</i>	39.36021	0.00028	0.04	1.5
<i>Reach-20</i>	74.26196	0.00018	0.025	1.5
<i>Reach-21</i>	31.52337	0.00006	0.025	1.5
<i>Reach-22</i>	12.20259	0.00001	0.025	1.5
<i>Reach-23</i>	32.14247	0.00012	0.025	1.5
<i>Reach-24</i>	51.21881	0.00008	0.025	1.5
<i>Reach-25</i>	133.16565	0.00008	0.025	1.5
<i>Reach-26</i>	30.81678	0.00016	0.025	1.5
<i>Reach-27</i>	79.06439	0.00016	0.025	1.5



## 6 RESULTADOS

### 6.1 SIMULAÇÃO NA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA DO RIO DOCE

Observa-se na Tabela 12 que os valores encontrados do coeficiente de *Sutcliffe* e do viés percentual foram bem próximos na calibração (2010 a 2017) e na validação (2019 a 2022).

Tabela 12 – Valores encontrados do PBIAS/NSE no período de calibração e 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 (%)
56719998	Belo Oriente	Rio Doce	-11,45	0,689	-11,48
56825000	Naque Velho	Rio Santo Antônio	0,54	0,933	0,54
56850000	Governador Valadares	Rio Doce	-10,50	0,776	-10,58
56891900	Vila Matias – Montante	Rio Suaçuí Grande	9,02	-4,615	9,07
56989400	Assarai Montante	Rio José Pedro	-15,60	0,453	-15,65

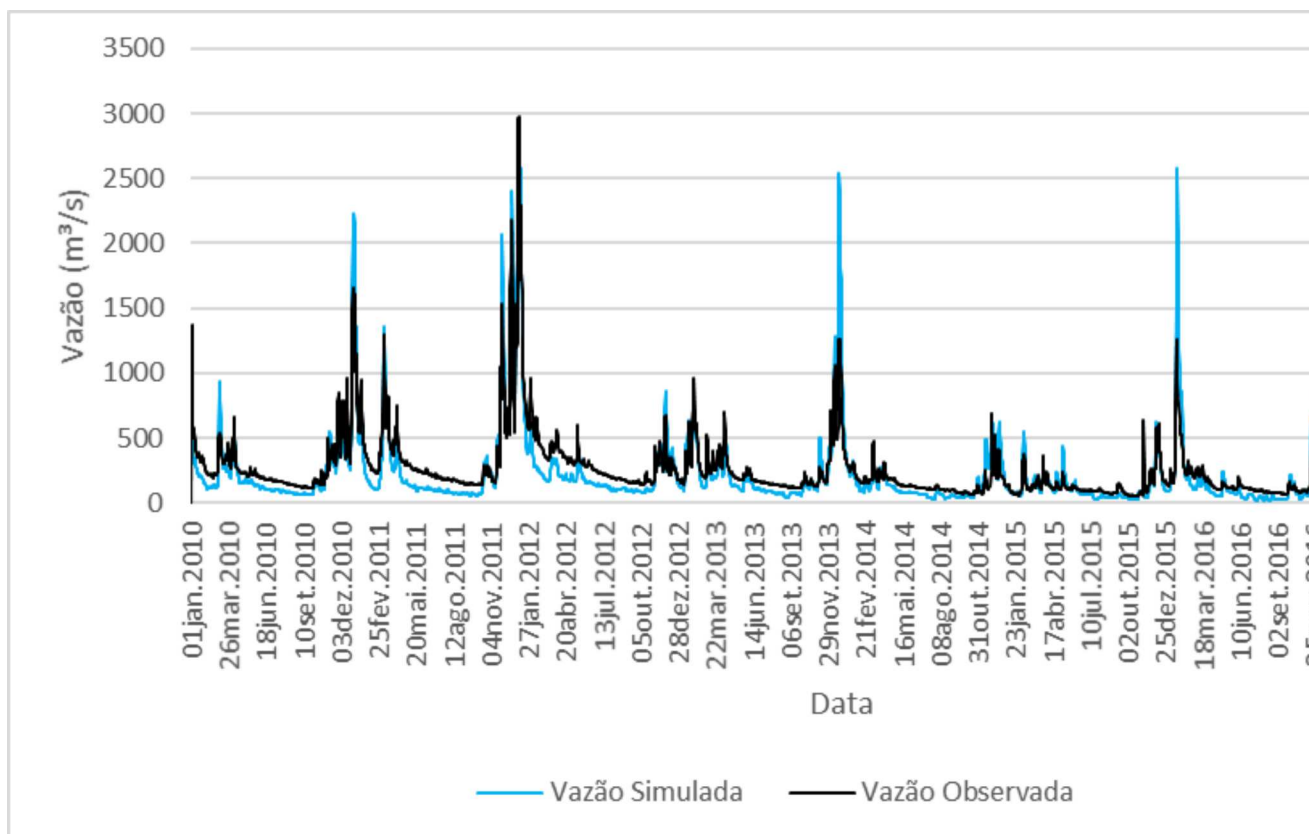
Fonte: elaborado pela autora.

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

Apenas a estação Vila Matias – Montante teve resultado insatisfatório na calibração e na validação, o que pode ser justificado pela presença da Planta Central Hidrelétrica (PCH) Paiol que regulariza a vazão no rio Suaçuí Grande.

sua vez, a estação Assarai Montante teve, de maneira geral, subestimados, conforme indicado pelo PBIAS (-15,60%).

Figura 17 - Hidrograma do período de calibração para a estação Belo



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 18 – Hidrograma do período de validação para a estação Belo

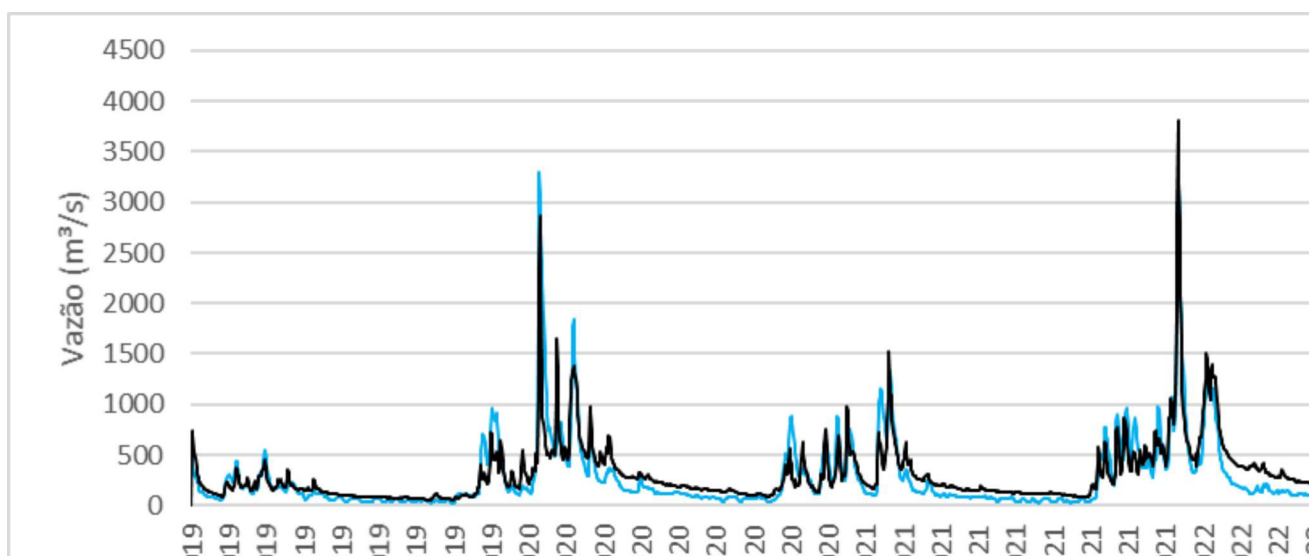
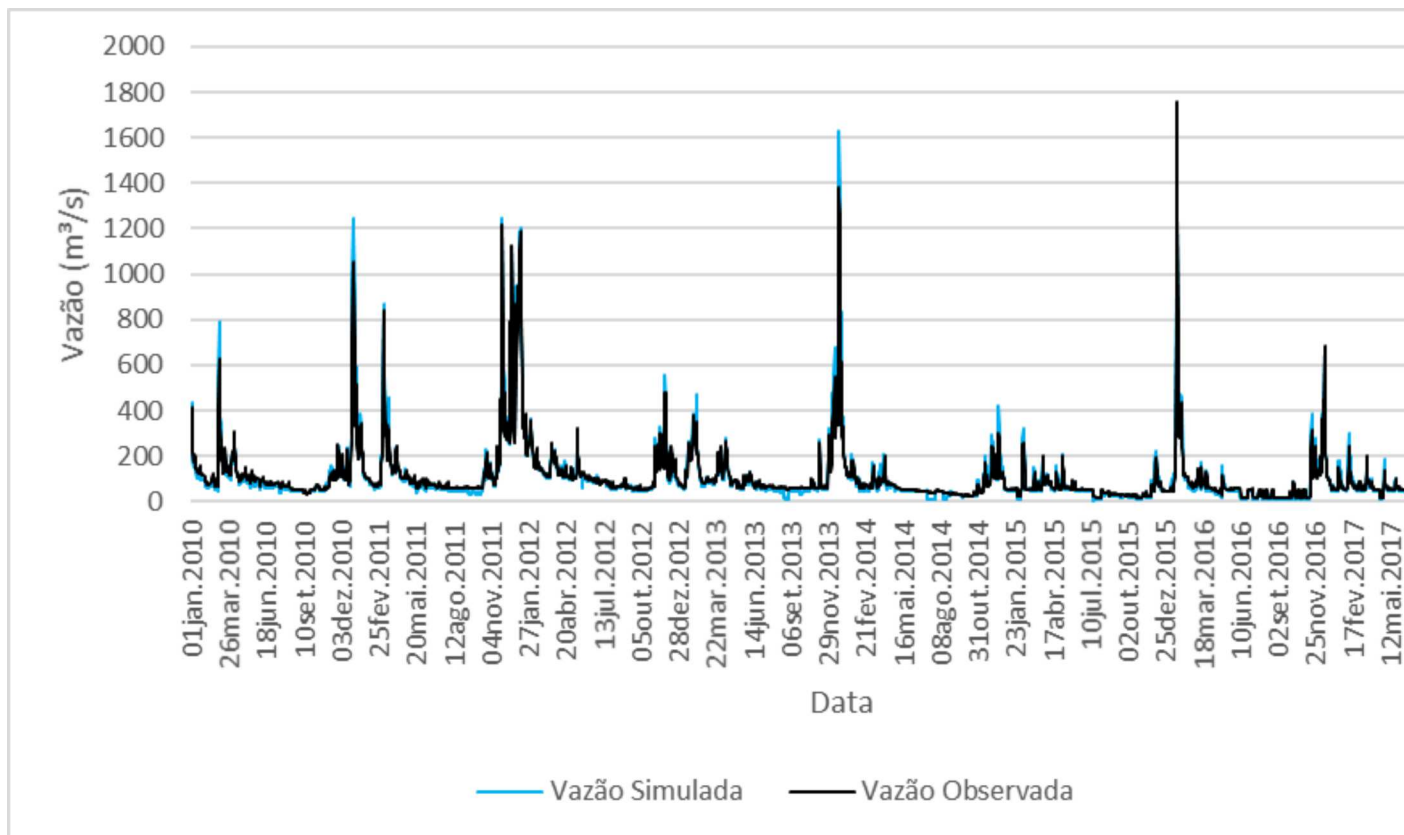


Figura 19 – Hidrograma do período de calibração para a estação Naque Ve



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 20 - Hidrograma do período de validação para a estação Naque Ve

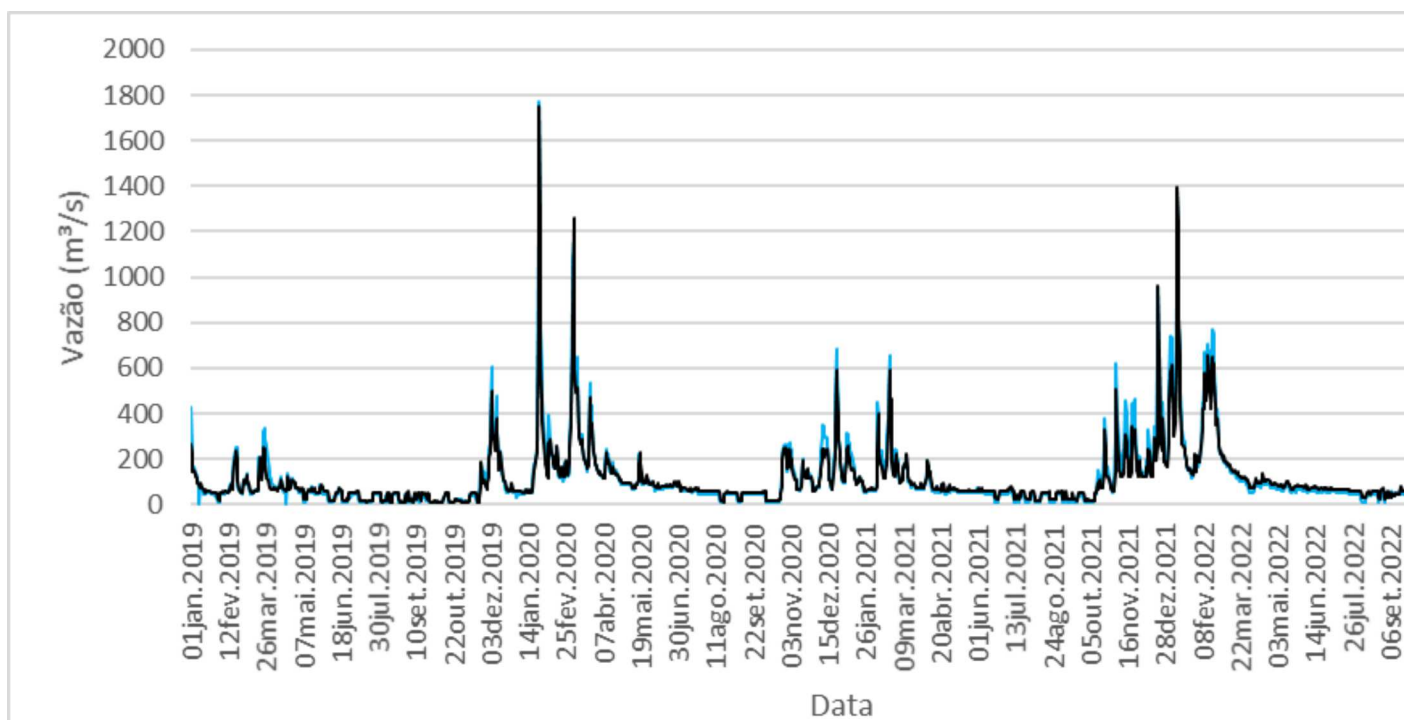
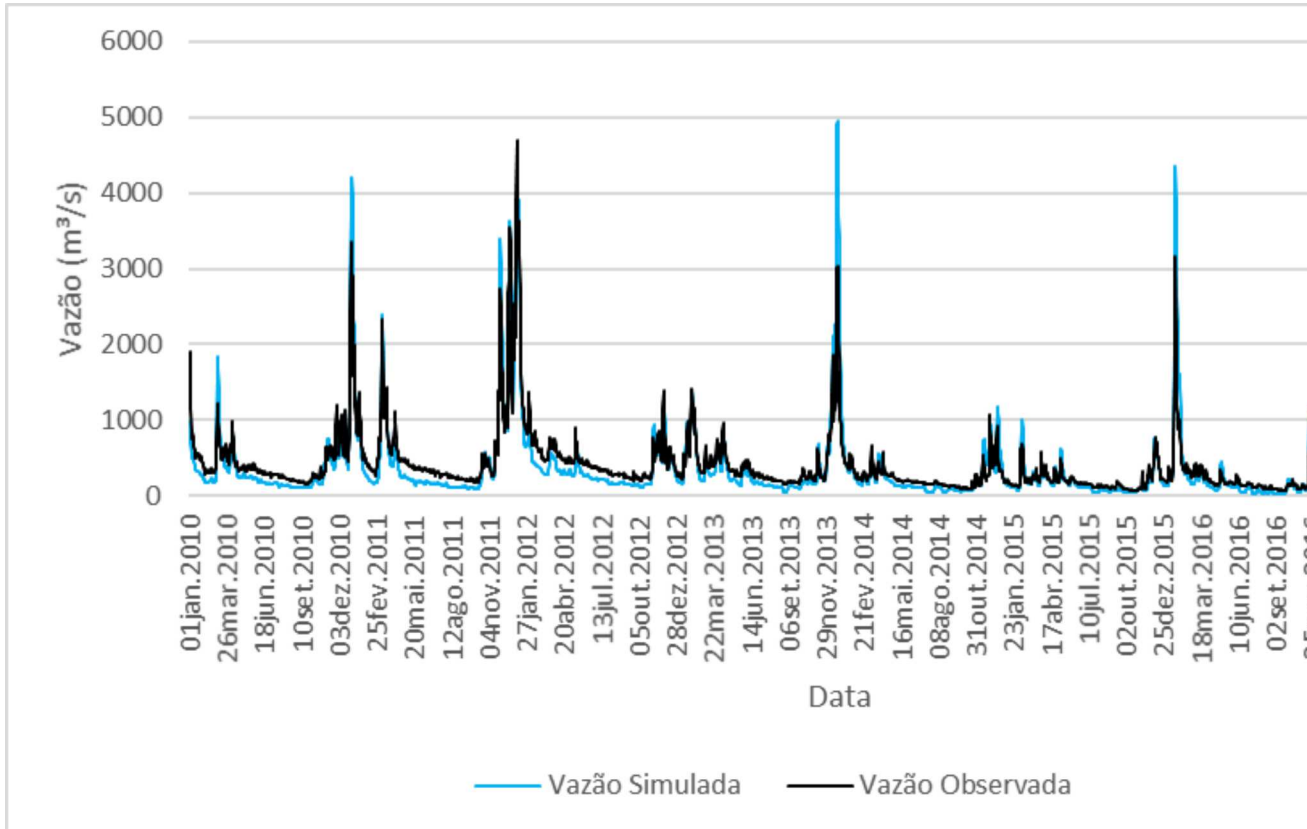


Figura 21 - Hidrograma do período de calibração para a estação Gov  
Valadares



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 22 - Hidrograma do período de validação para a estação Gov  
Valadares

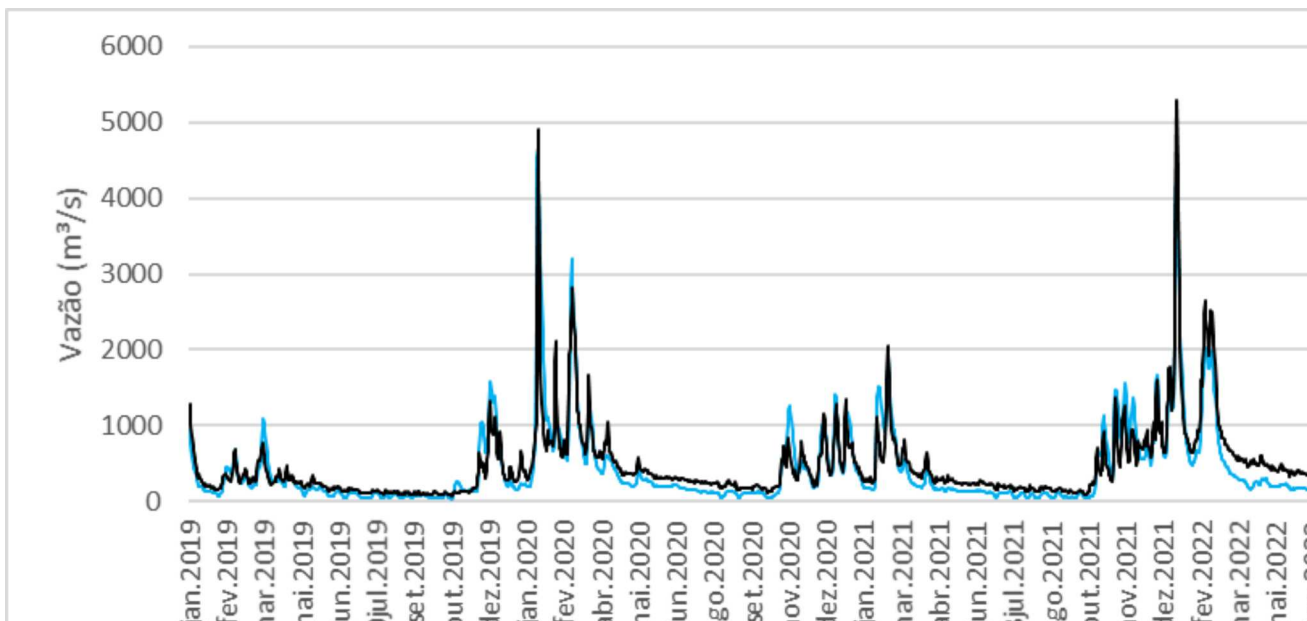
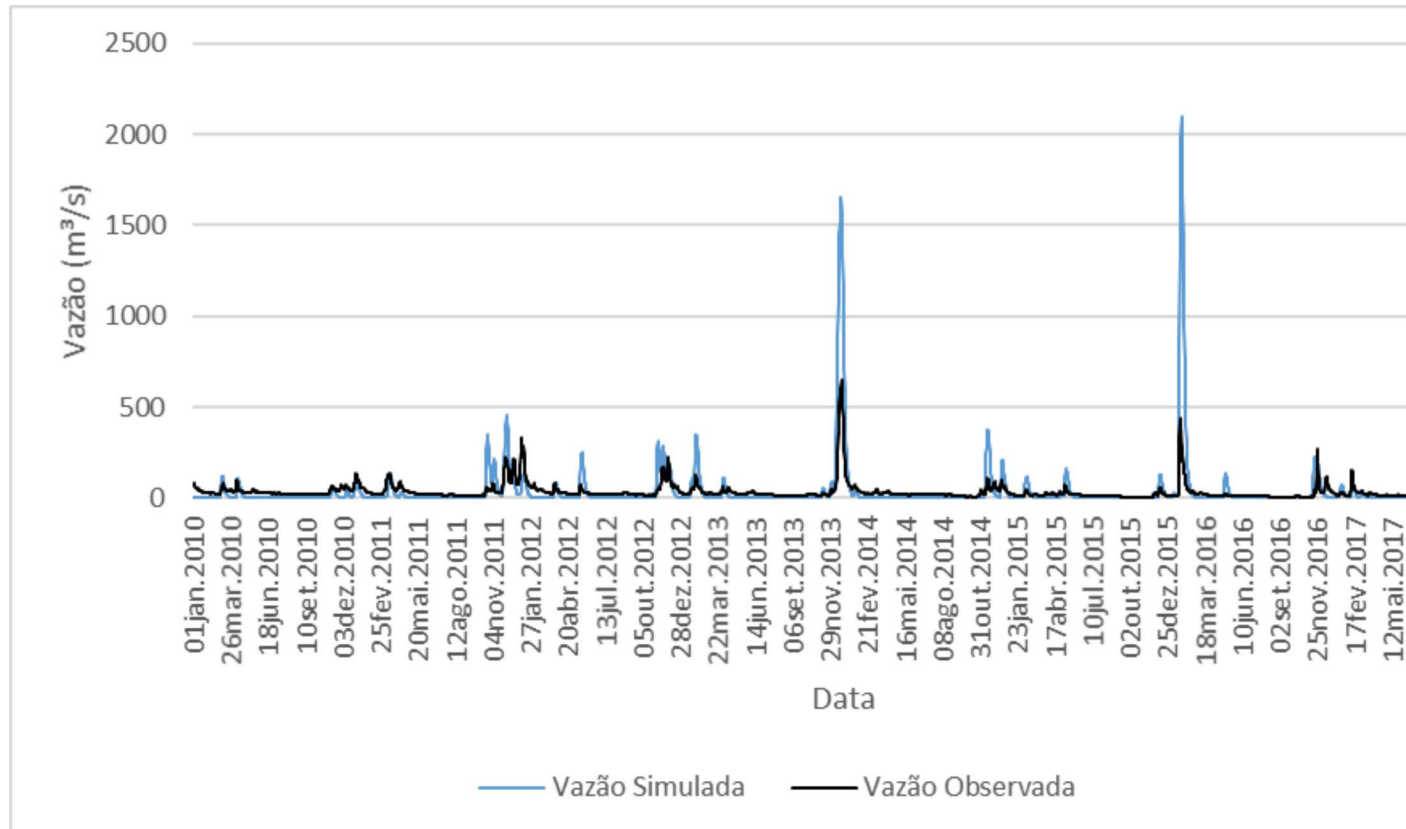


Figura 23 - Hidrograma do período de calibração para a estação Vila Matia  
Montante



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 24 - Hidrograma do período de validação para a estação Vila Matia  
Montante

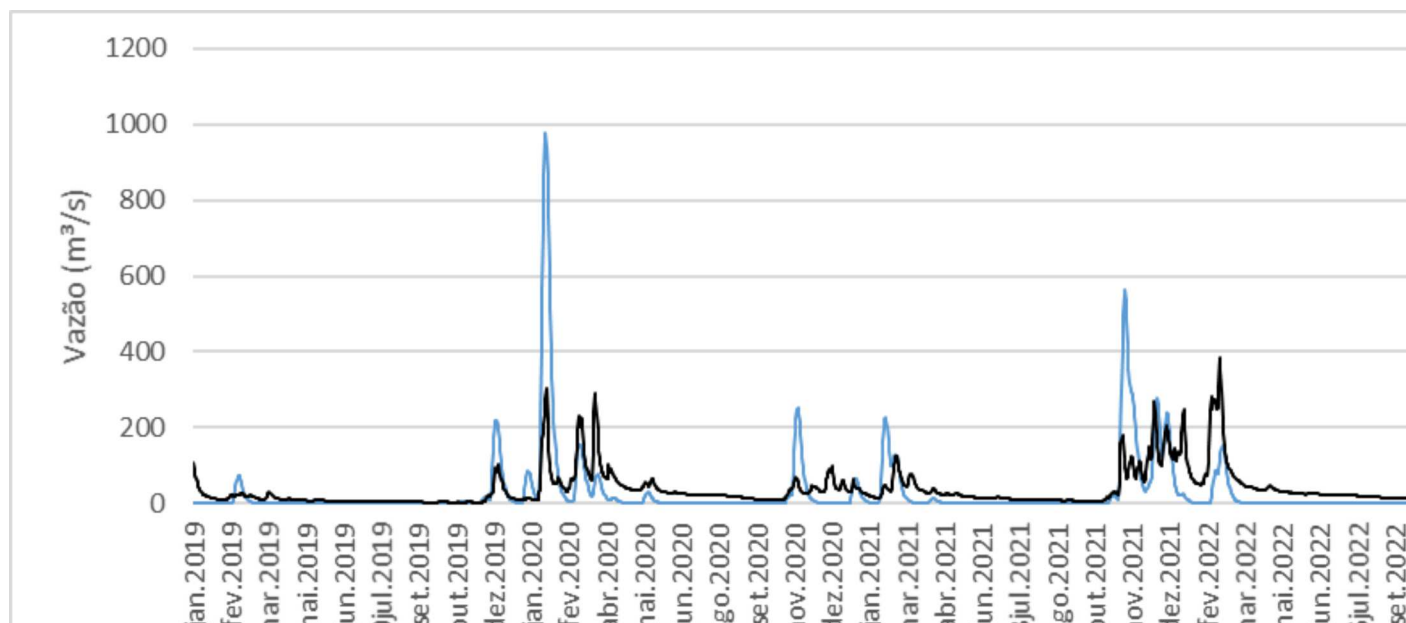
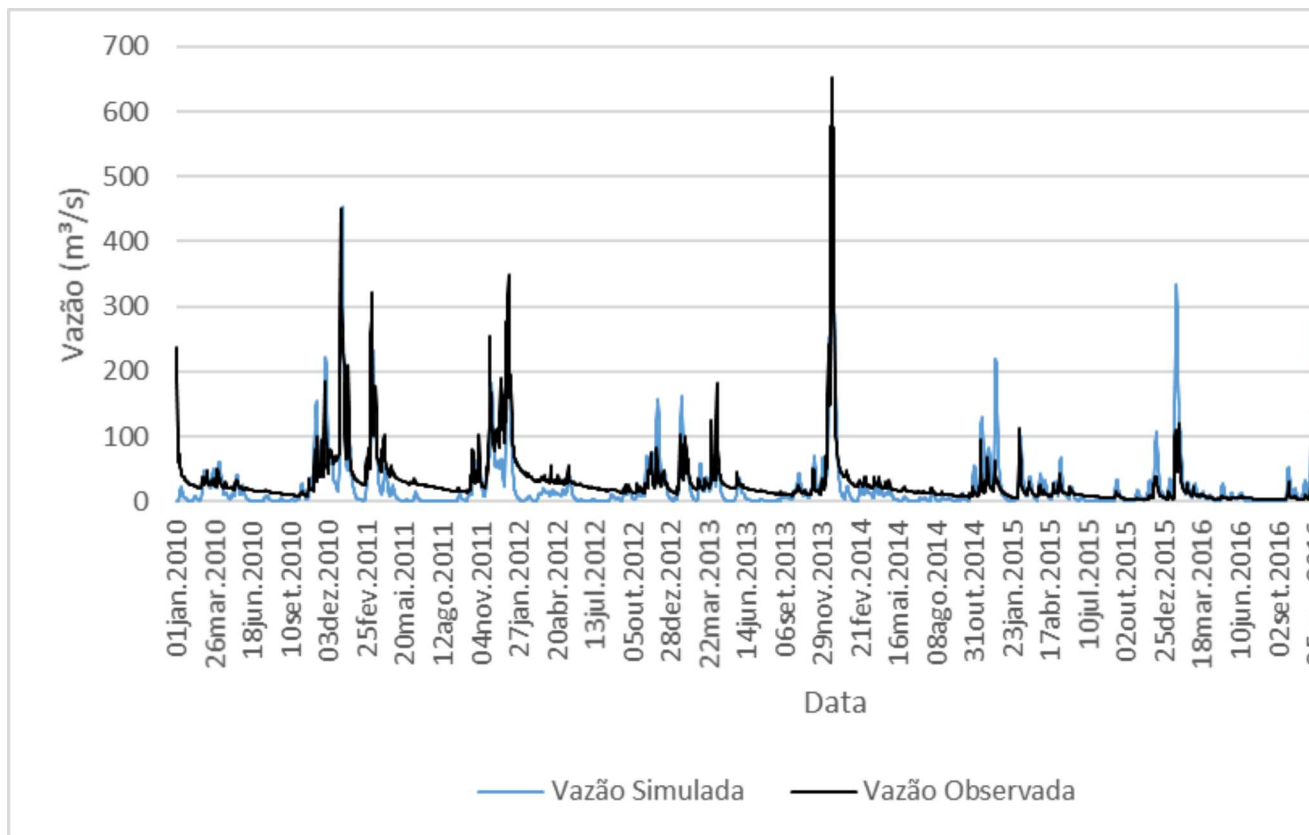
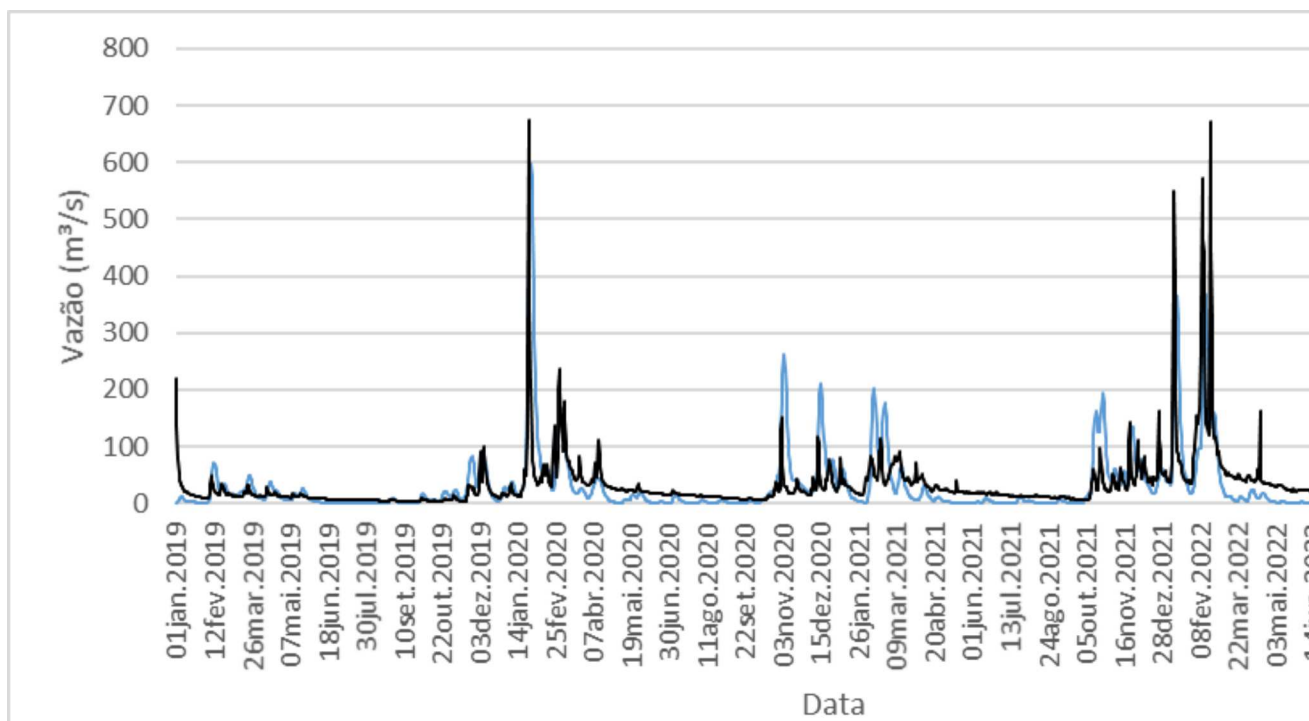


Figura 25 - Hidrograma do período de calibração para a estação Assara



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 26 - Hidrograma do período de validação para a estação Assara





Tschiedel e Colossi (2017) realizaram um Estudo Hidrológico e Modelo de Chuva-Vazão na Bacia do Rio Doce utilizando o Modelo de Grandes Bacias (IPH). Os coeficientes de eficiência avaliados variaram de 0,334 a 0,648 para as 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 0,754 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.

## 6.2 SIMULAÇÃO NA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

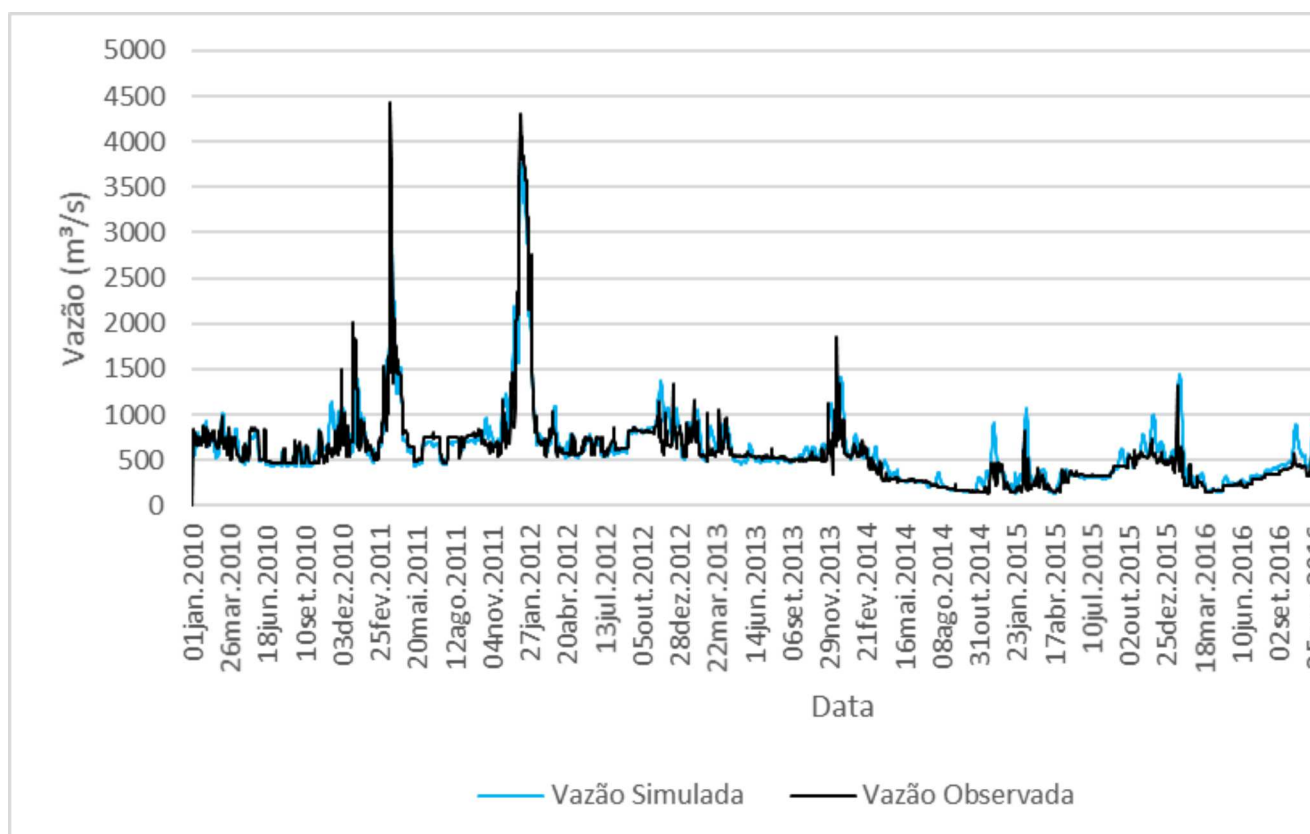
As estações fluviométricas calibradas com os respectivos períodos de calibração e validação e os valores de NSE/PBIAS estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – 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 2010 a 2017		Validação 2019 a 2020
			PBIAS (%)	NSE	PBIAS (%)
41135000	Pirapora Barreiro	Rio São Francisco	8,33	0,826	13,48
41818000	Santo Hipólito	Rio das Velhas	-4,46	0,542	-12,05
41990000	Várzea da Palma	Rio das Velhas	-10,18	0,612	7,90
42210000	Cachoeira da Manteiga	Rio São Francisco	0,29	0,824	5,05

Os resultados da calibração e validação para a porção mineira São Francisco estão apresentados nos hidrogramas calculados a partir de entrada, conforme indicado nas Figuras de 27 a 42.

Figura 27 - Hidrograma do período de calibração para a estação Pirapo



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 28 – Hidrograma do período de validação para a estação Pirapo

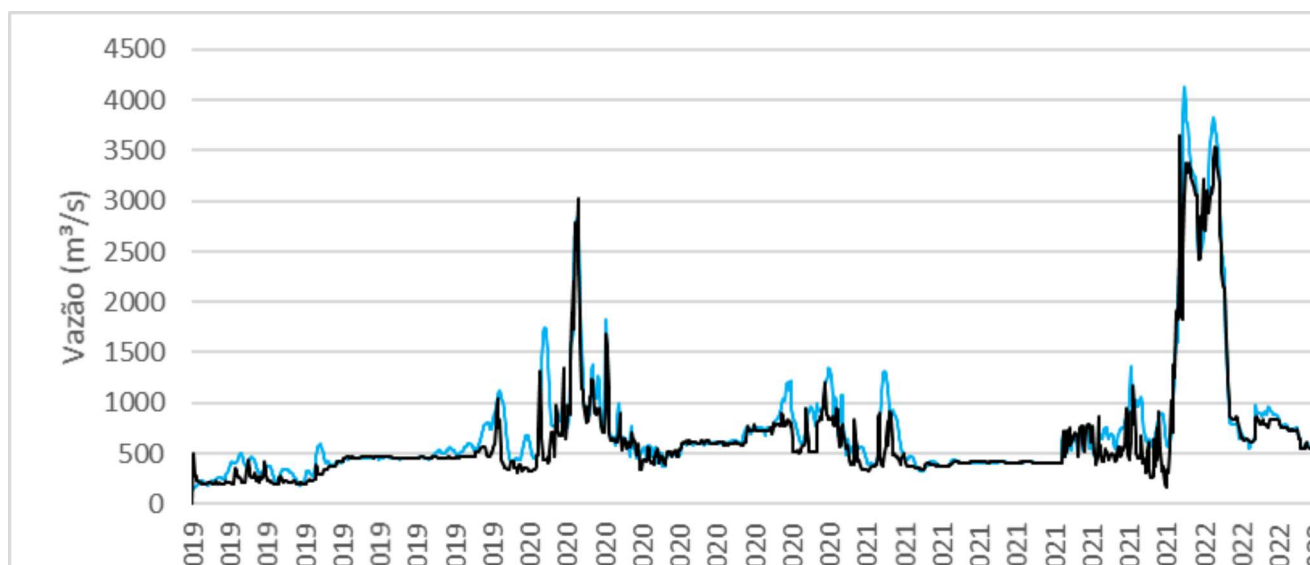
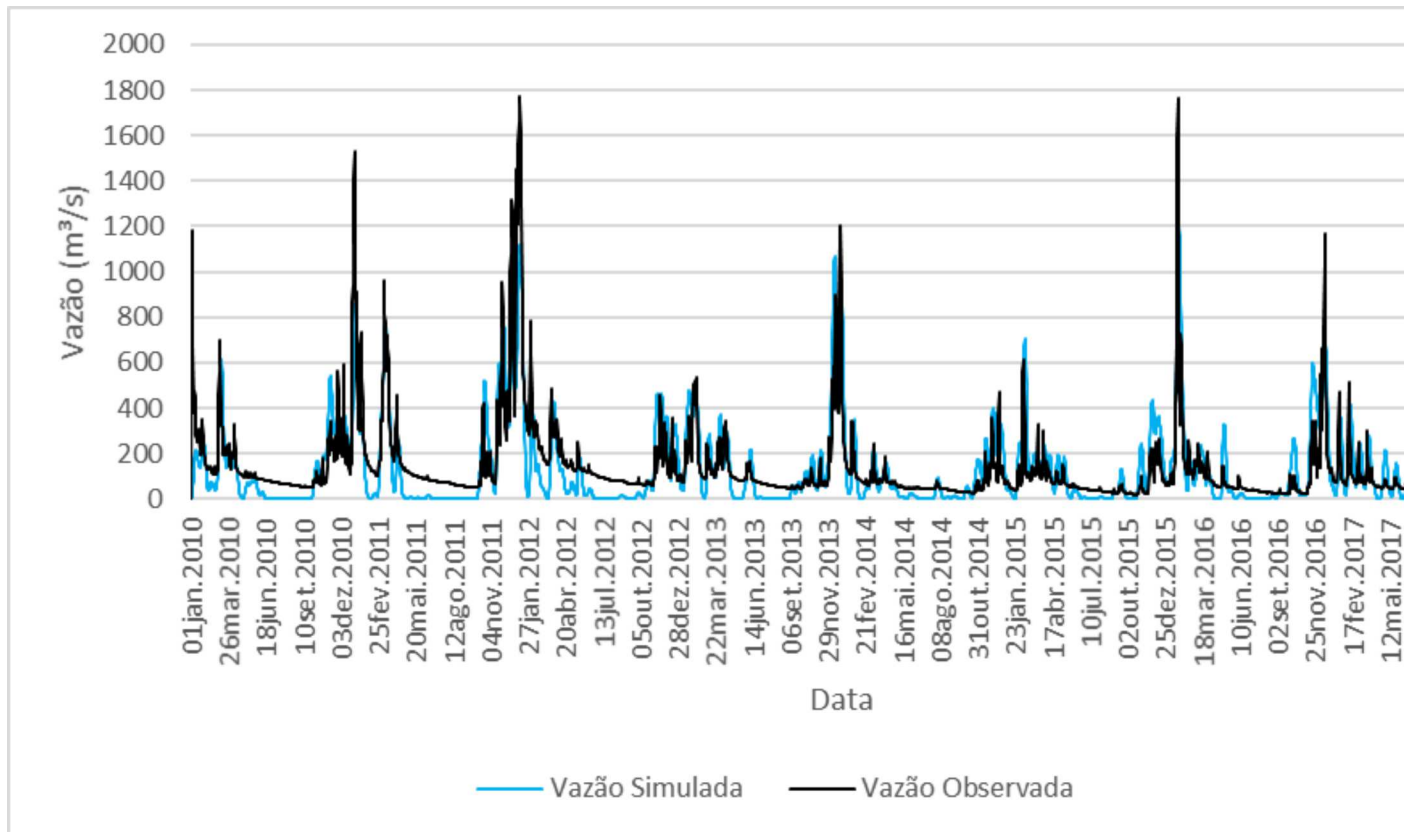




Figura 29 – Hidrograma do período de calibração para a estação Santo Hip



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 30 - Hidrograma do período de validação para a estação Santo Hip

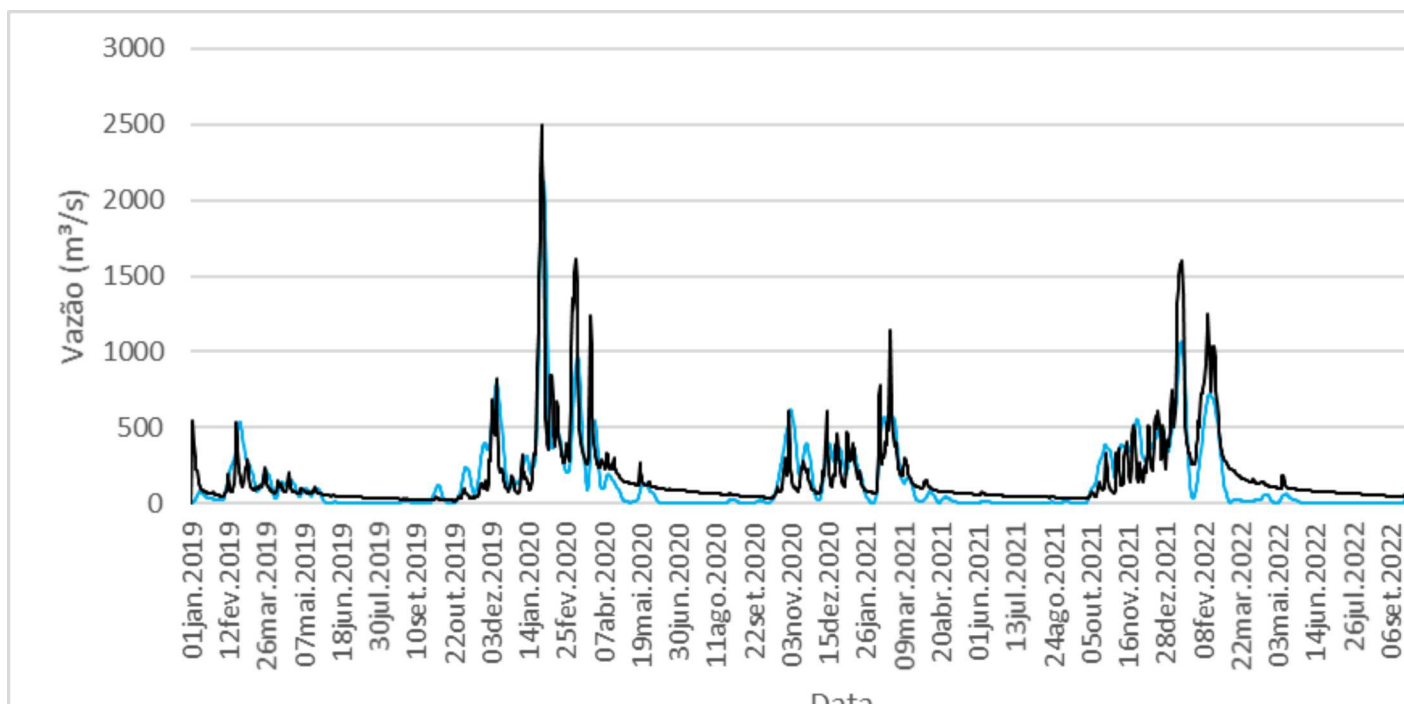
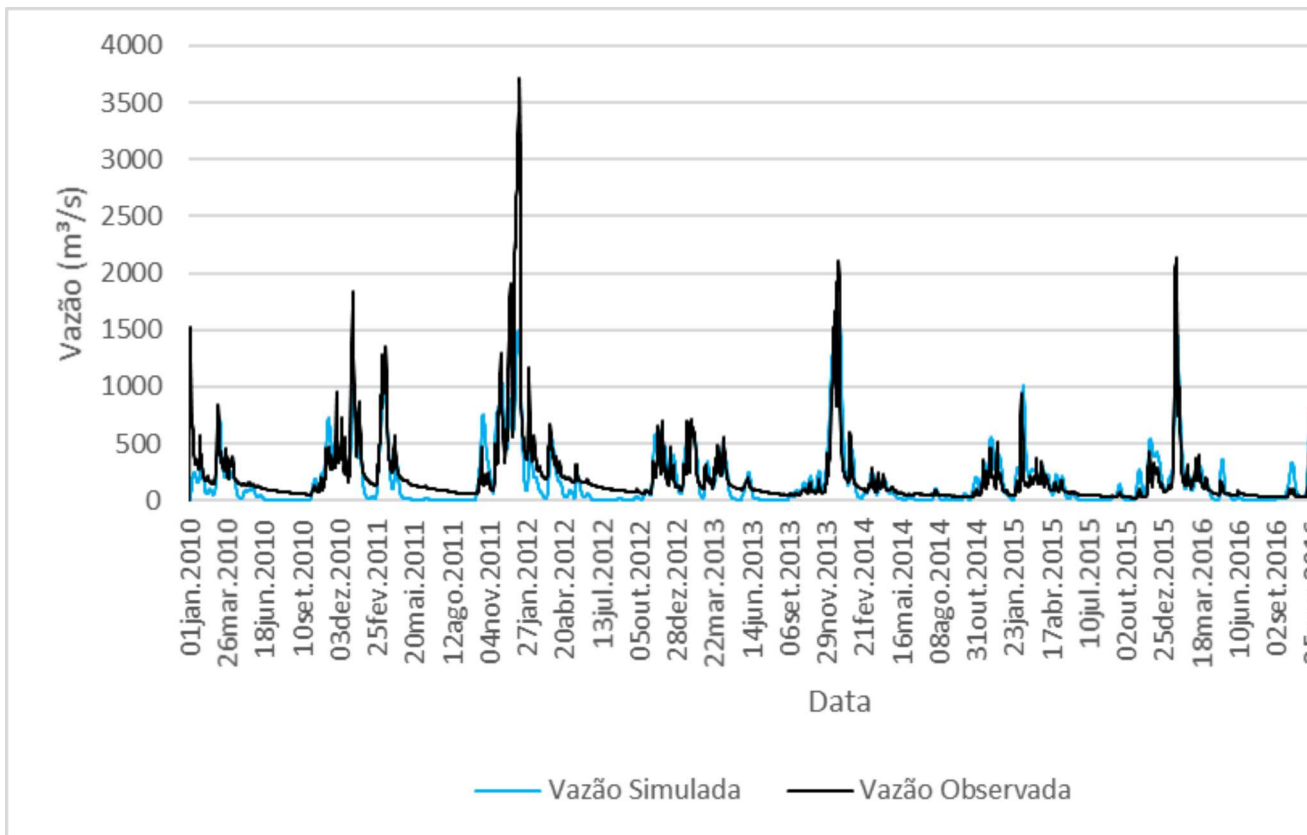


Figura 31 - Hidrograma do período de calibração para a estação Várzea



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 32 - Hidrograma do período de validação para a estação Várzea

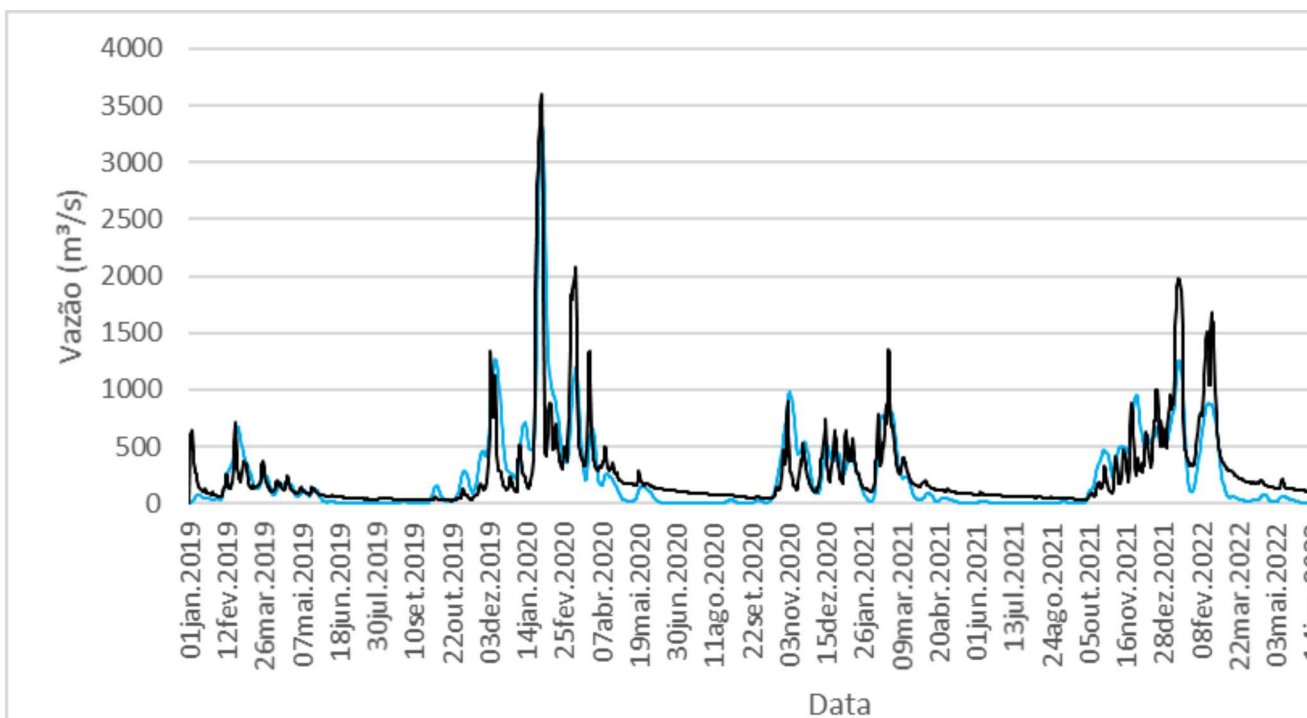
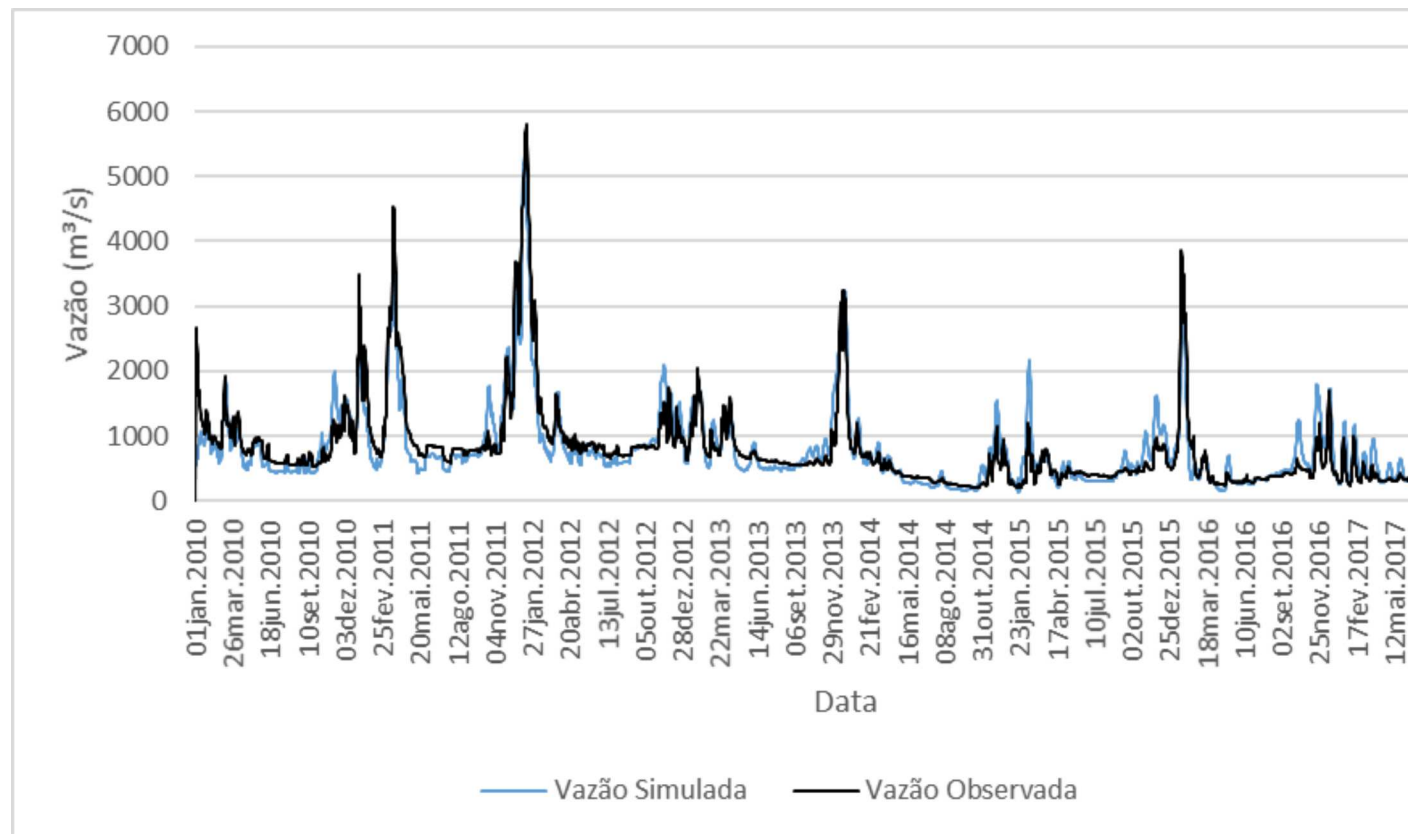


Figura 33 - Hidrograma do período de calibração para a estação Cachoeira Manteiga



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 34 - Hidrograma do período de validação para a estação Cachoeira Manteiga

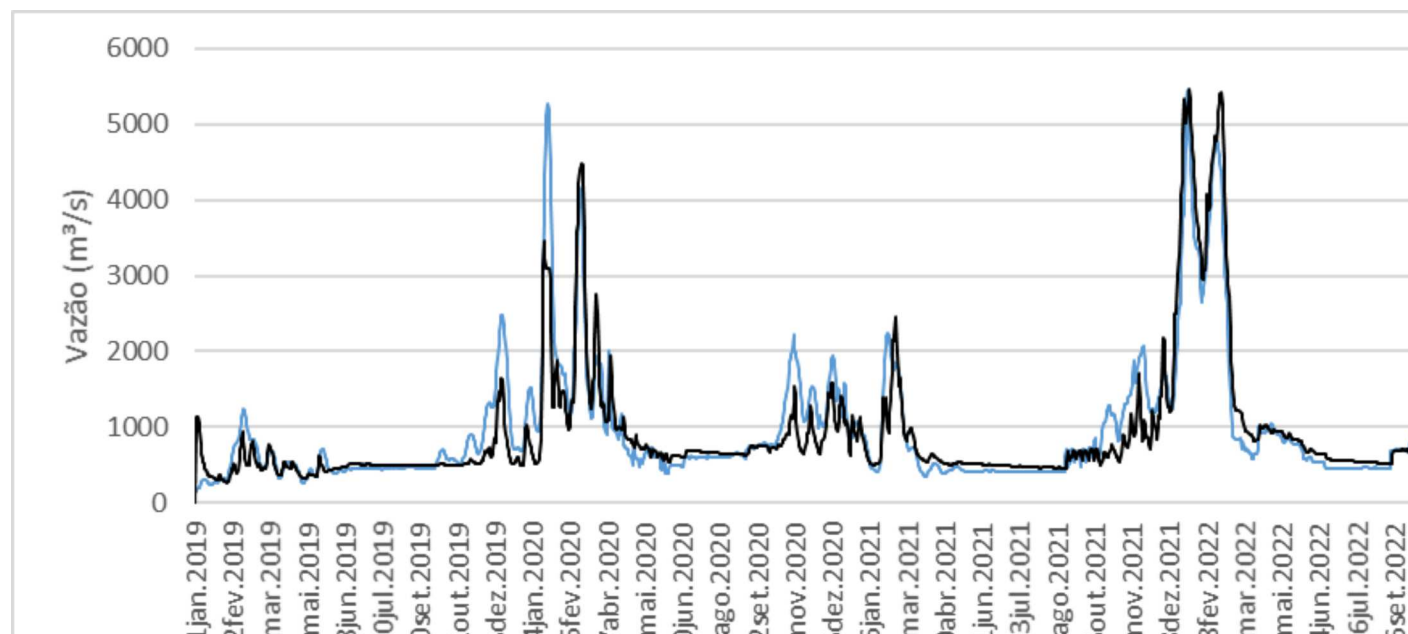
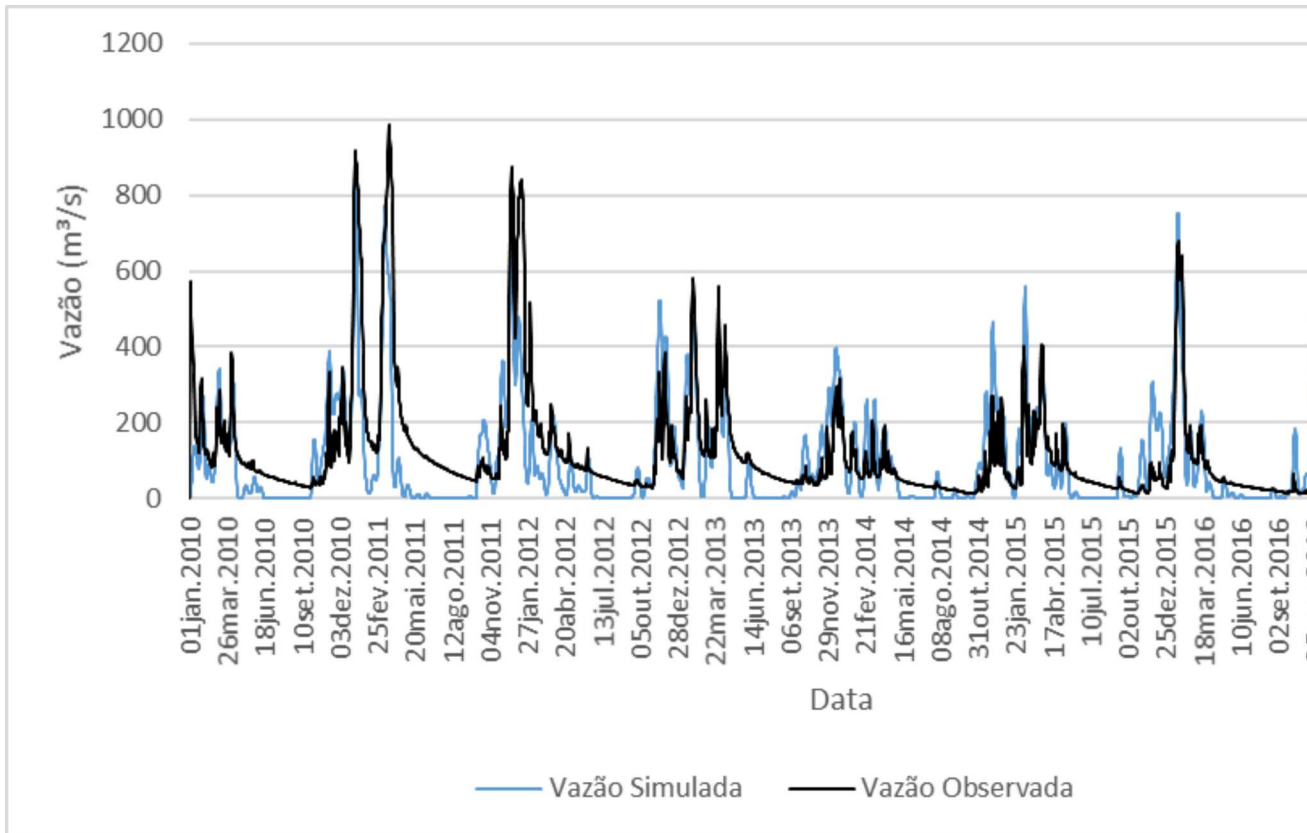


Figura 35 - Hidrograma do período de calibração para a estação San



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 36 - Hidrograma do período de validação para a estação San

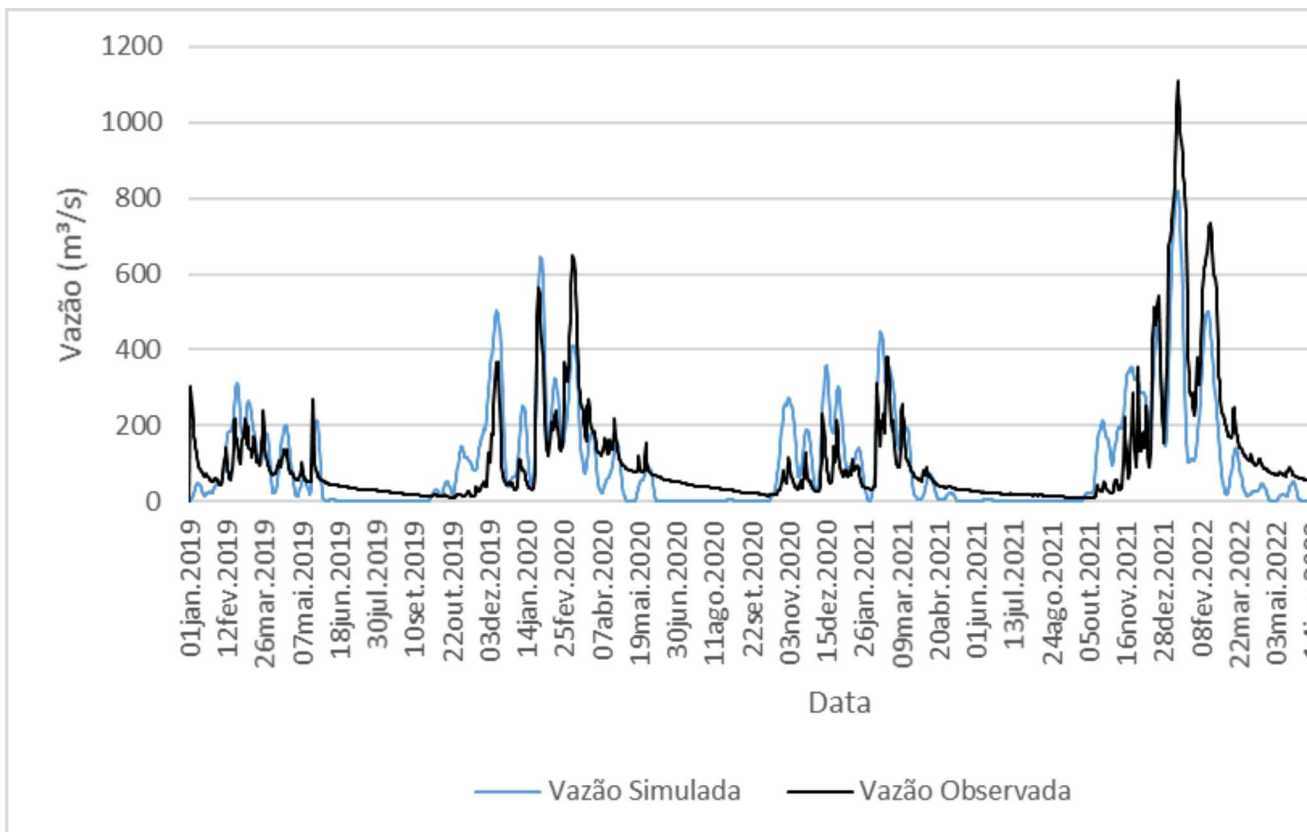
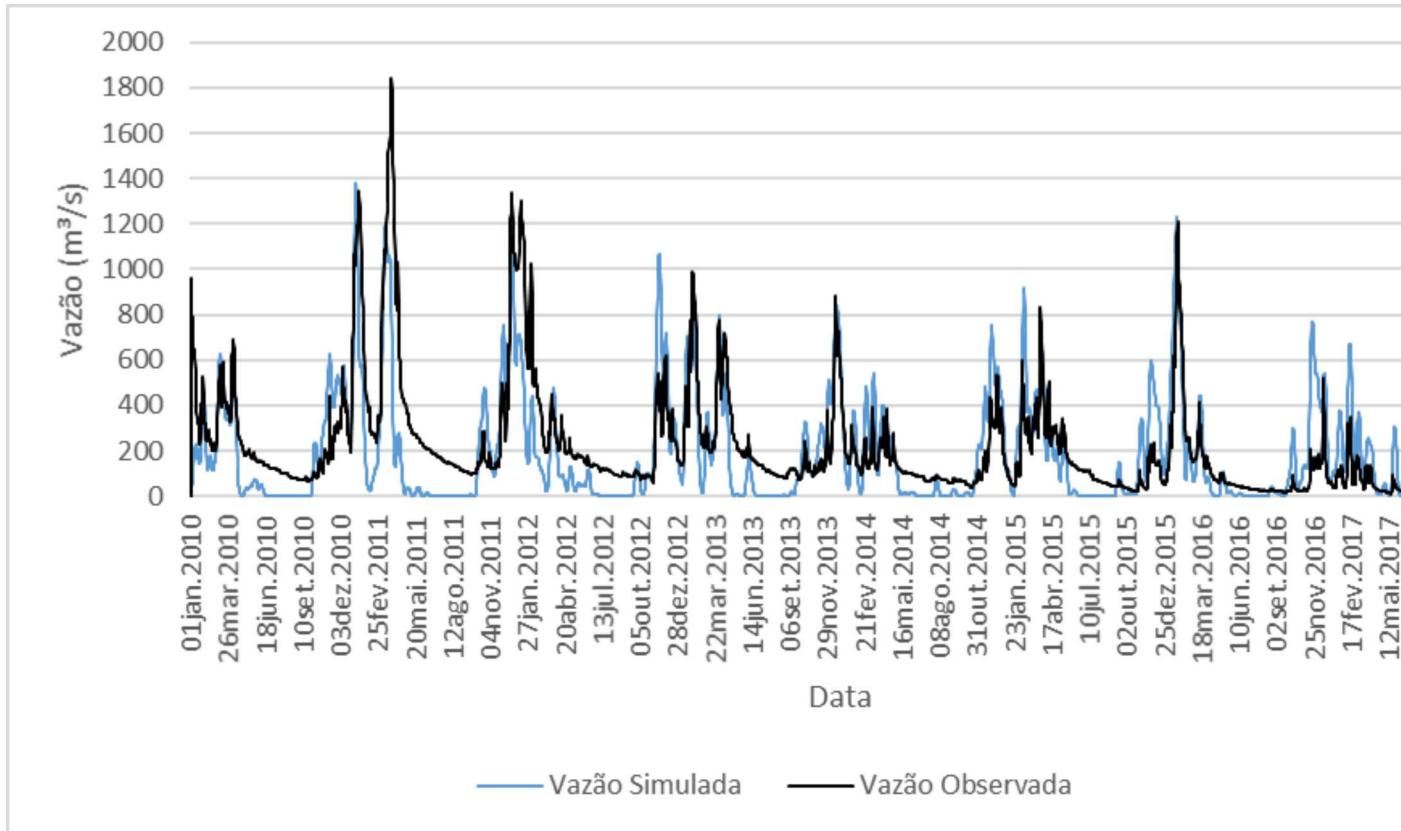


Figura 37 - Hidrograma do período de calibração para a estação Porto da Ex



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 38 - Hidrograma do período de validação para a estação Porto da Ex

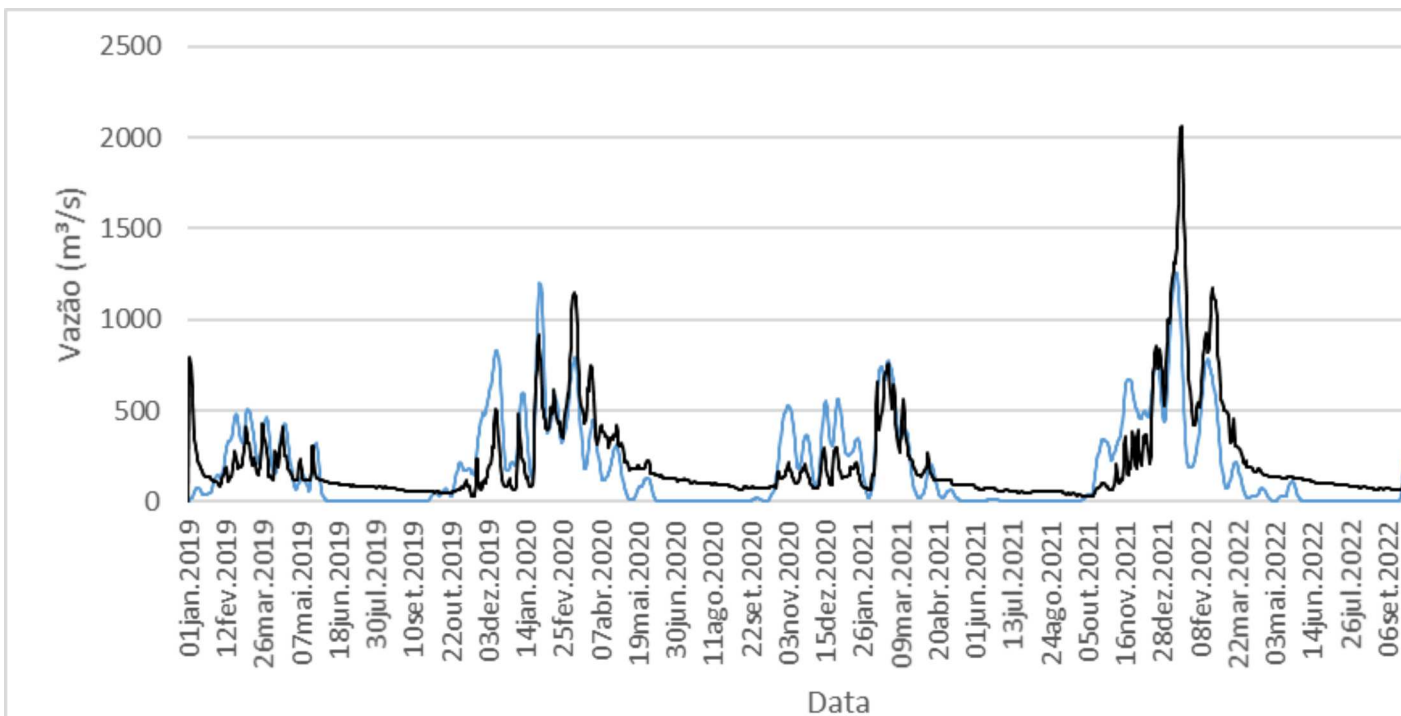
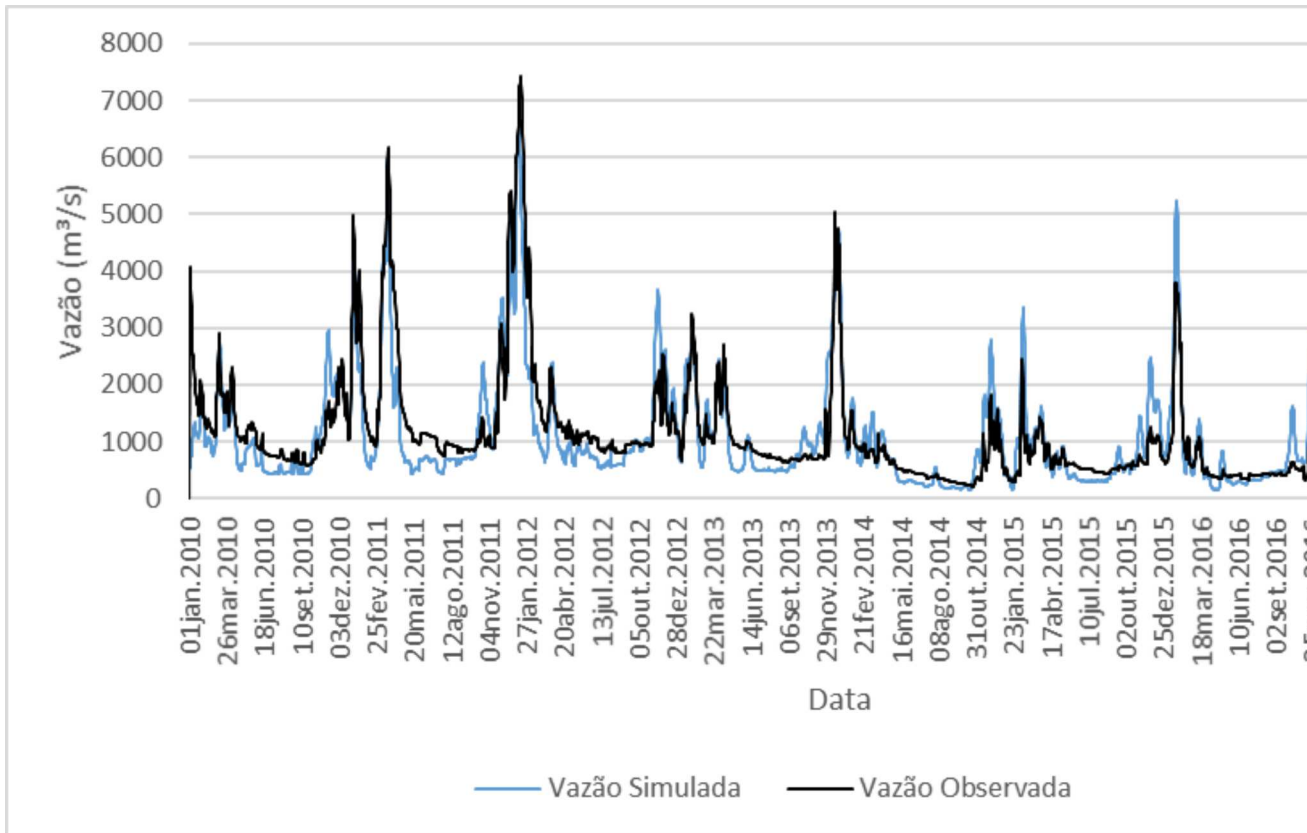




Figura 39 - Hidrograma do período de calibração para a estação São



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 40 - Hidrograma do período de validação para a estação São

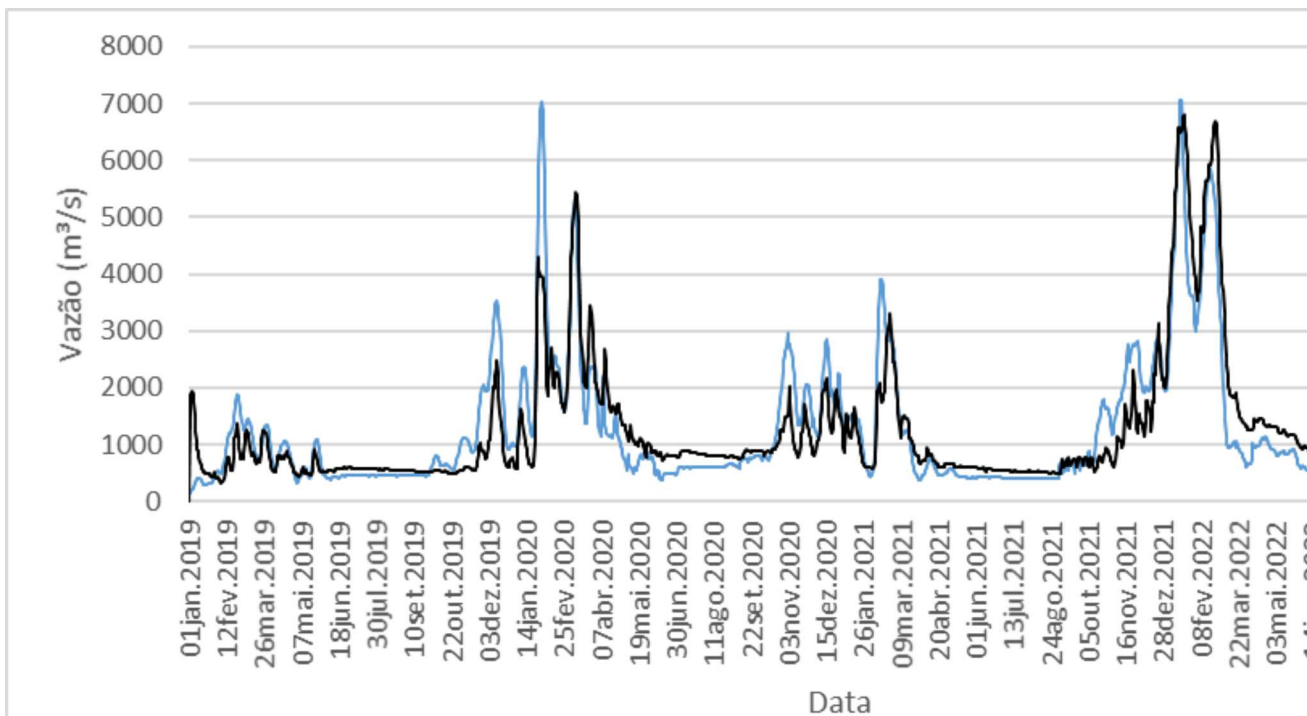
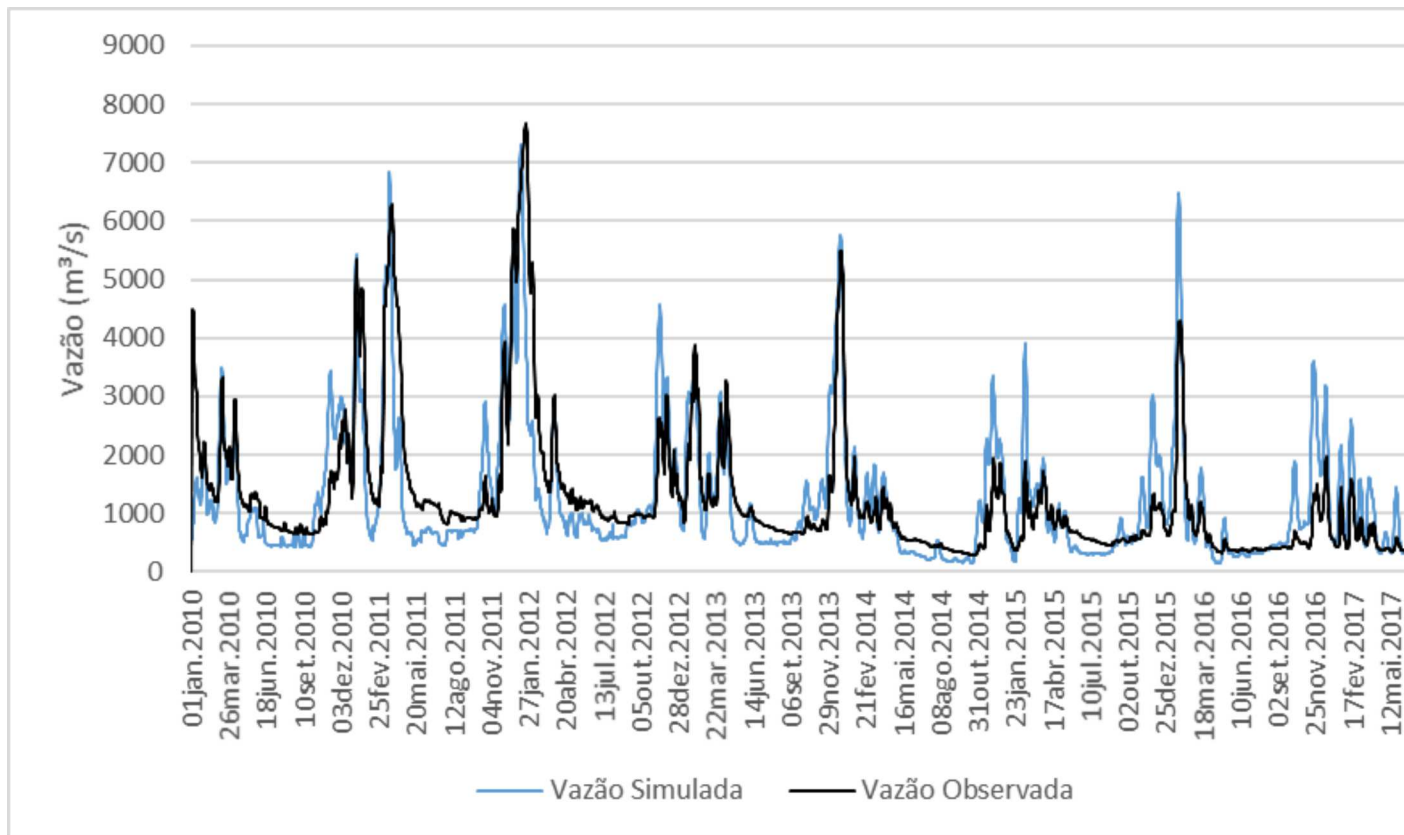
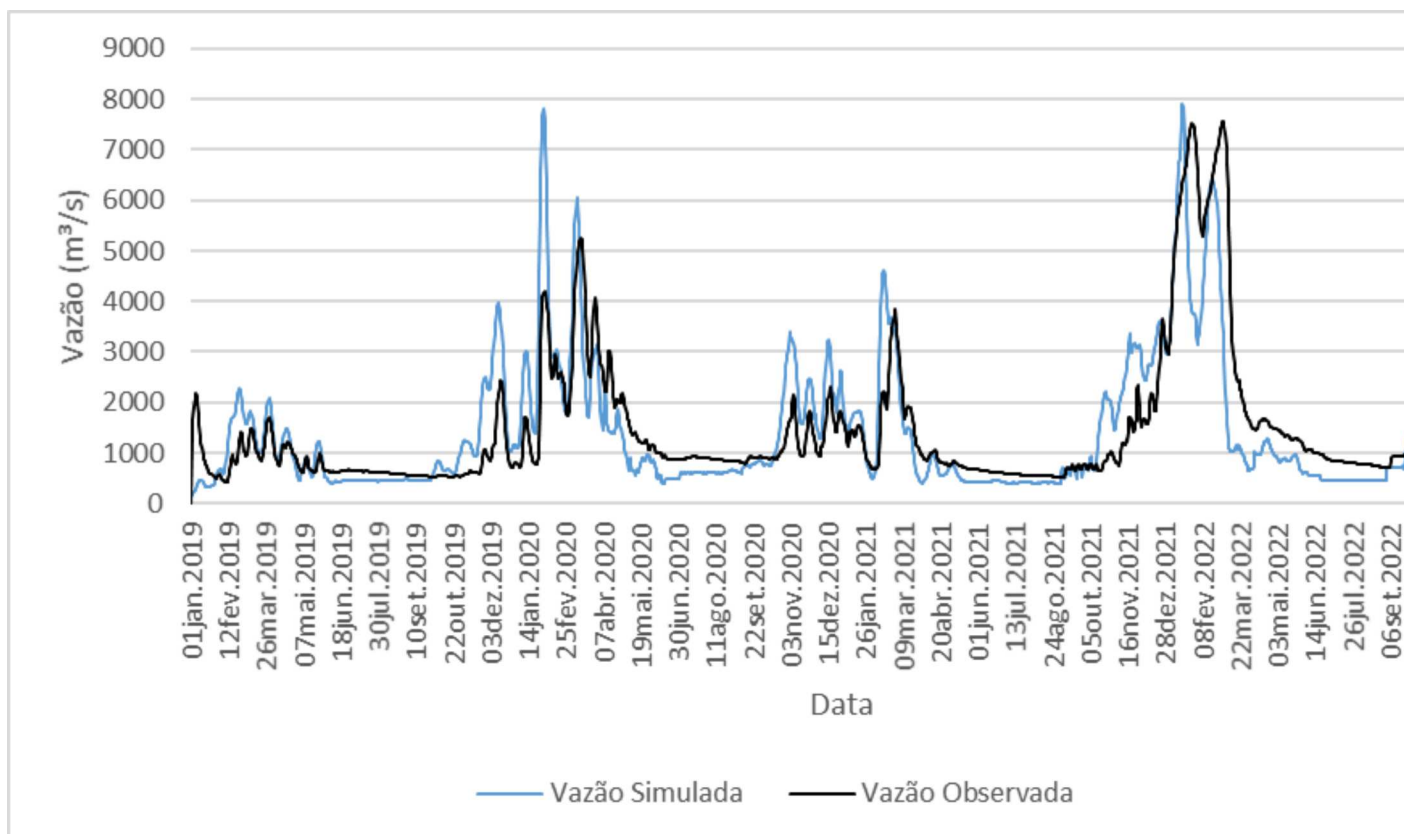


Figura 41 - Hidrograma do período de calibração para a estação Manga



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 42 - 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” quando comparados com a classificação de desempenho do HEC-HMS na maioria das áreas. As sub-bacias localizadas próximas à calha principal do rio São Francisco apresentaram um bom desempenho, graças ao aumento das vazões e a presença de rios que facilitam a calibração do modelo.

No entanto, observou-se maior dificuldade na sub-bacia do rio Paracatu devido pelo fato dos rios da margem direita serem intermitentes. Por sua vez, os resultados 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 estações durante a 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 valores negativos, 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 de satélite *Global Precipitation Measurement* (GPM) e das estações fluviométricas dados obtidos no Hidroweb. Obtiveram valores de coeficiente de NSE e PBIAS de 0,982 (calibração) e 0,263 e 0,994 (validação), utilizando os métodos *SMA Accounting* (SMA), *Clark Unit Hydrograph* e *Munkingum-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. Os resultados não apresentaram nenhum resultado insatisfatório, indicando que os métodos utilizados podem representar com coerência as vazões da porção mineira da hidrográfica do rio São Francisco.



### 6.2.1 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 melhores resultados de calibração e validação, obteve-se a previsão de vazão desta bacia no período de 01 de janeiro de 2025 a 31 de dezembro de 2034.

As Figuras 43 a 50 demonstram os gráficos dos resultados da vazão durante esse período de 10 anos para as estações que foram utilizadas para calibração e validação na simulação da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco no HEC-HMS considerando os cenários SSP245 (otimista) e SSP585 (pessimista).

Os hidrogramas demonstram que apesar do comportamento das vazões ter sido semelhante nos cenários SSP245 e SSP585, o tipo de cenário influencia a intensidade do pico de descarga e a data em que ocorreu o maior pico.

Figura 43 – Previsão de vazão para a Estação Pirapora Barreiro nos cenários SSP245 e SSP585

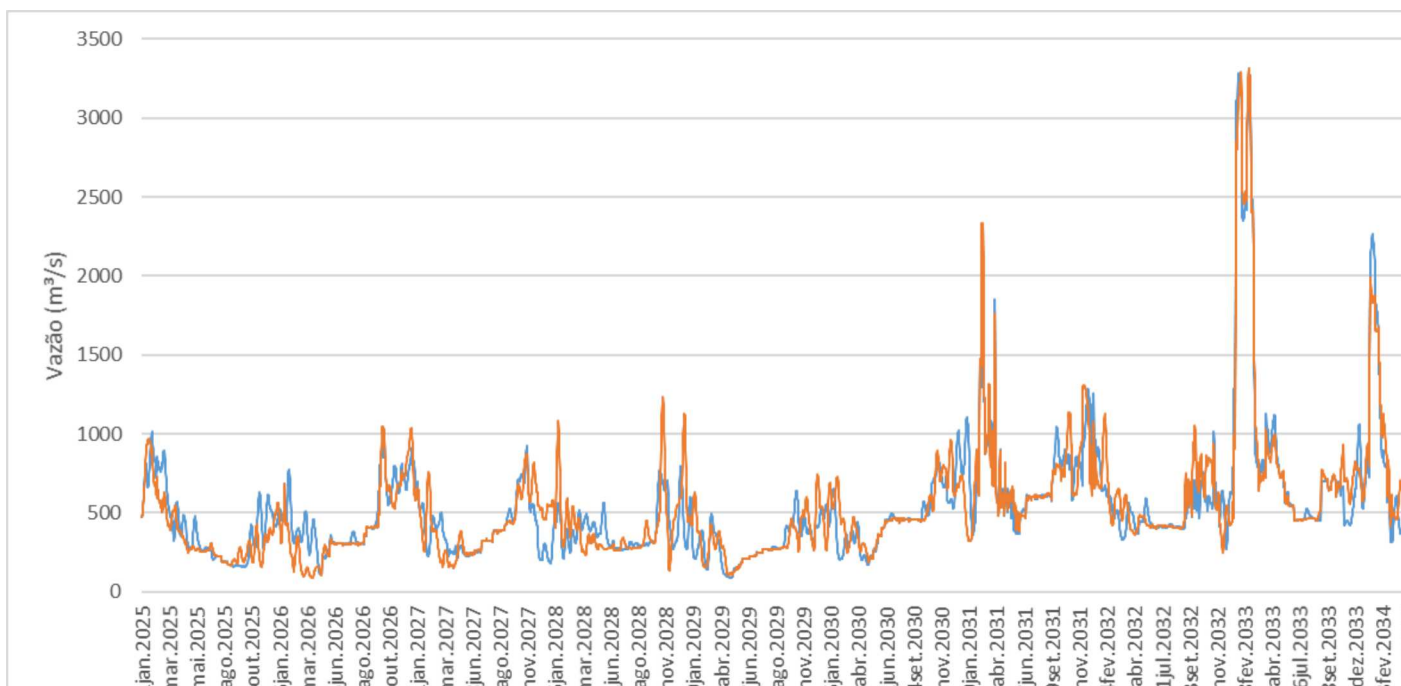
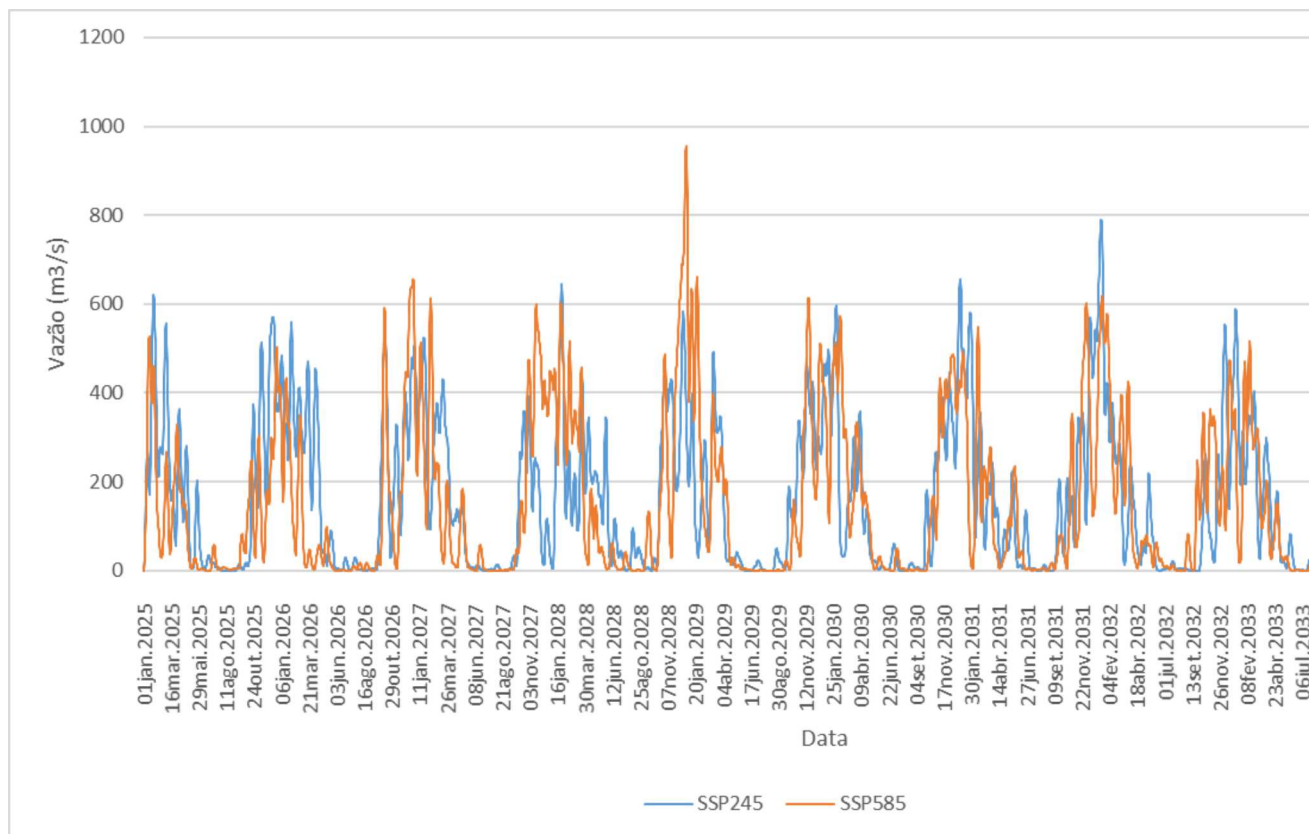


Figura 44 – Previsão de vazão para a Estação Santo Hipólito nos cenários SSP245 e SSP585



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 45 – Previsão de vazão para a Estação Várzea da Palma nos cenários SSP245 e SSP585

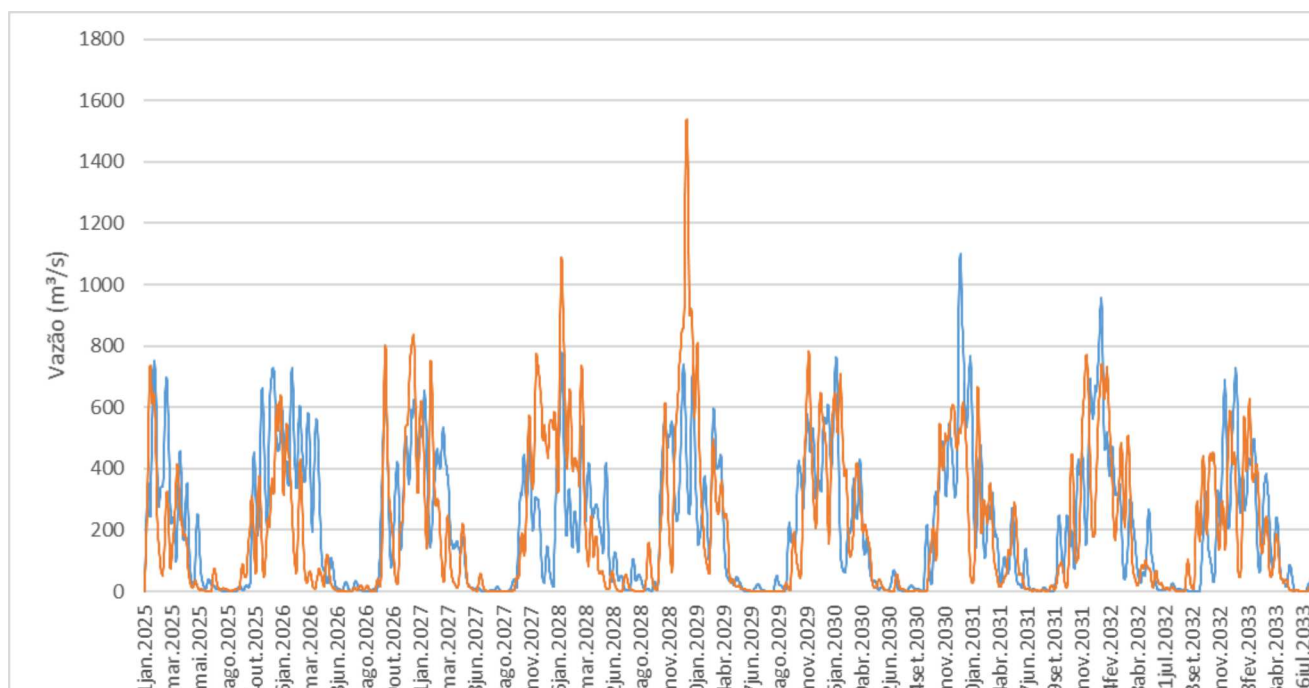
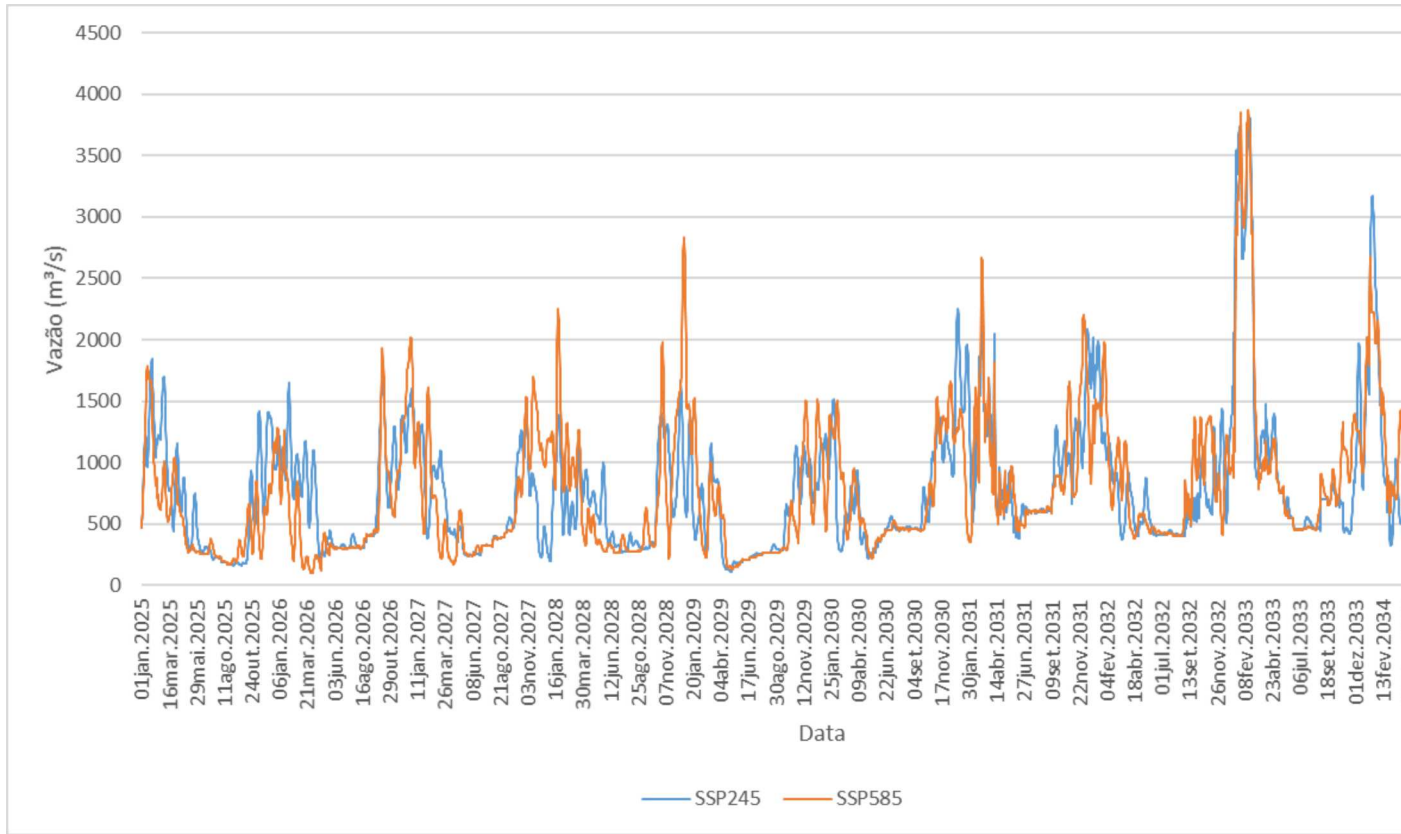


Figura 46 – Previsão de vazão para a Estação Cachoeira da Manteiga nos cenários SSP245 e SSP585



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 47 – Previsão de vazão para a Estação Santa Rosa nos cenários SSP245 e SSP585

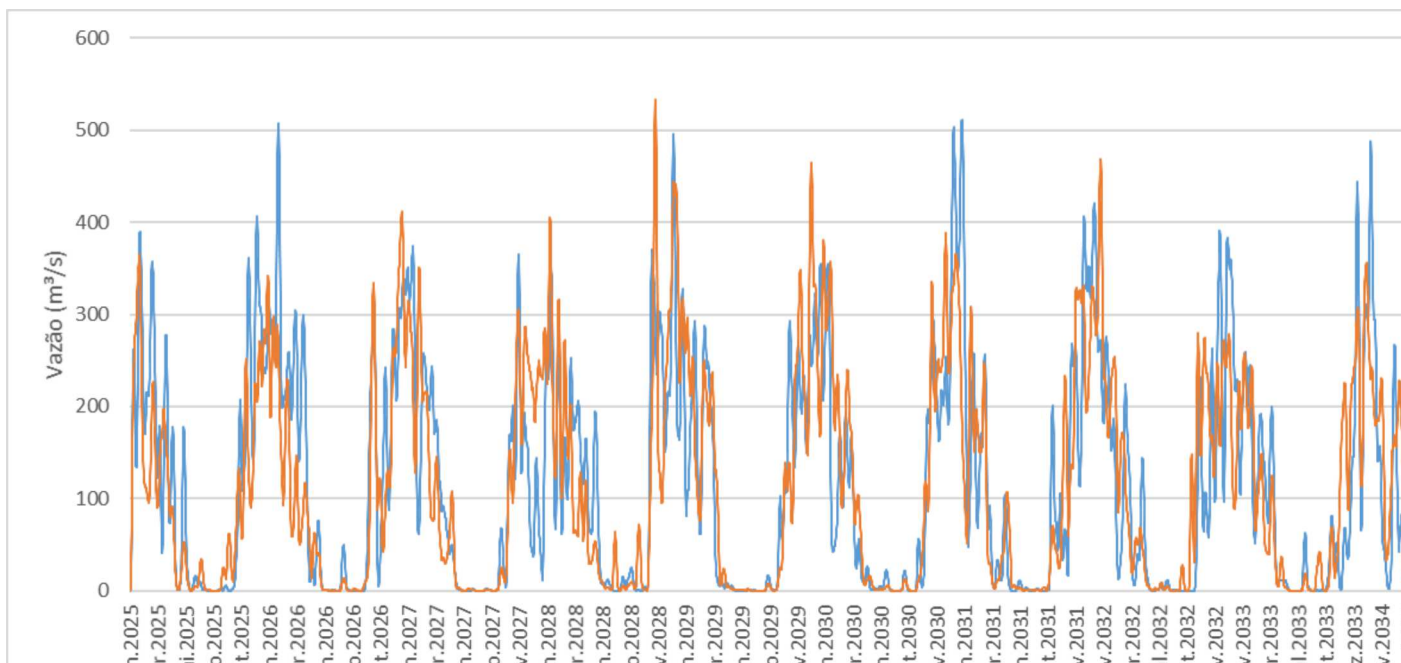
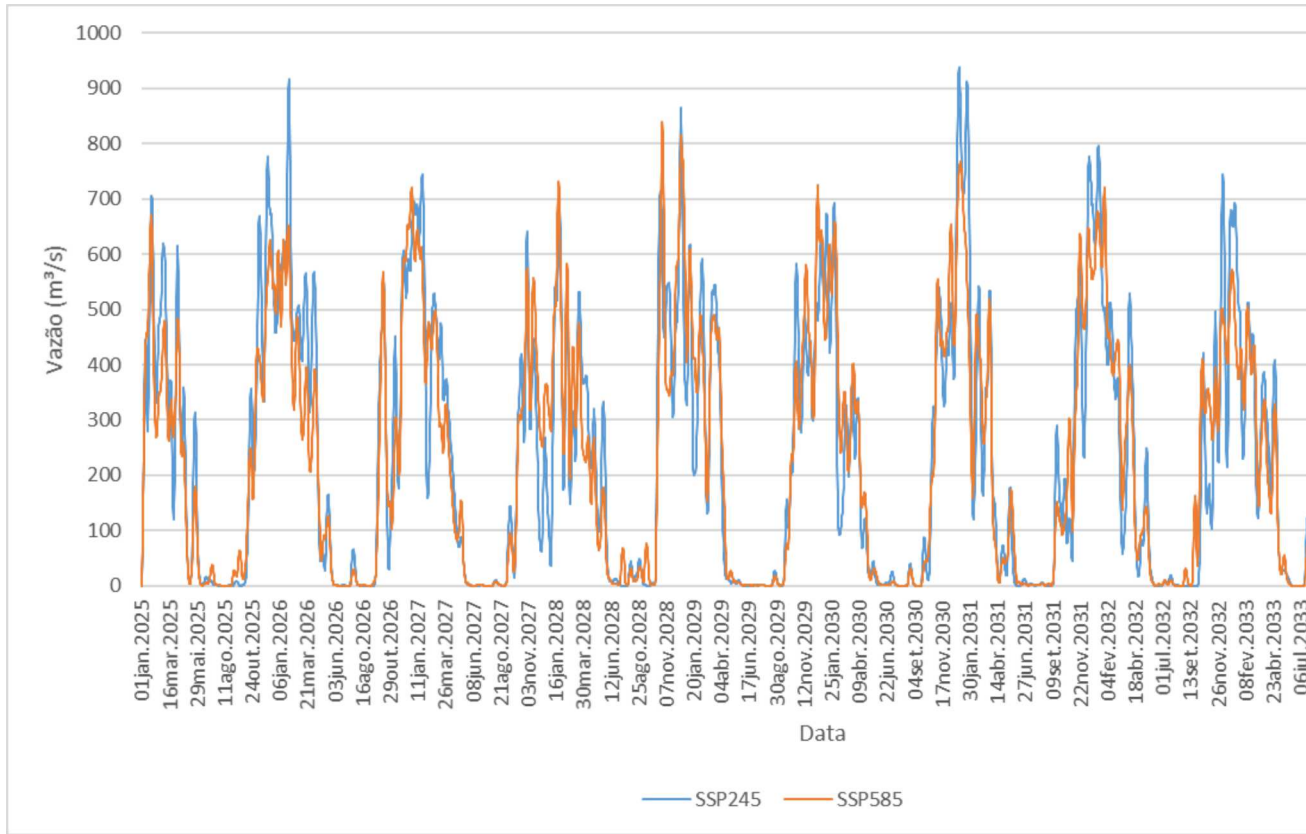


Figura 48 – Previsão de vazão para a Estação Porto da Extrema nos SSP245 e SSP585



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 49 – Previsão de vazão para a Estação São Romão nos cenários SSP585

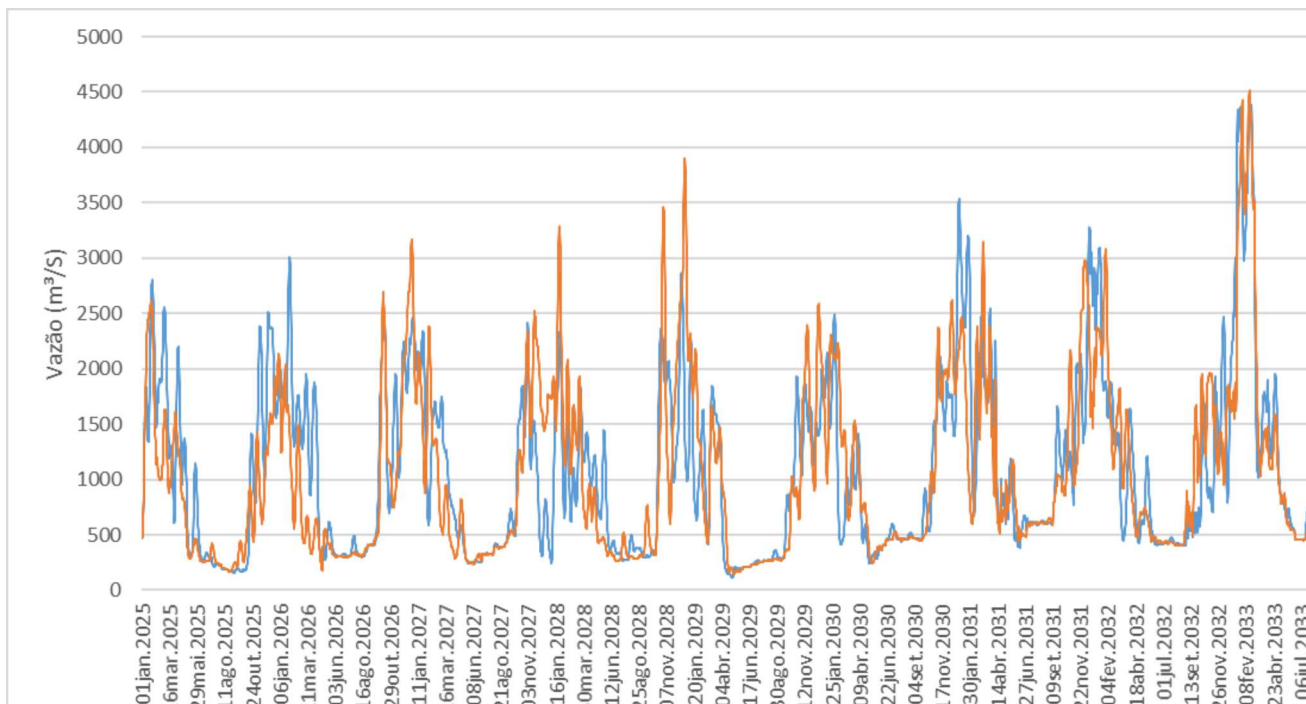
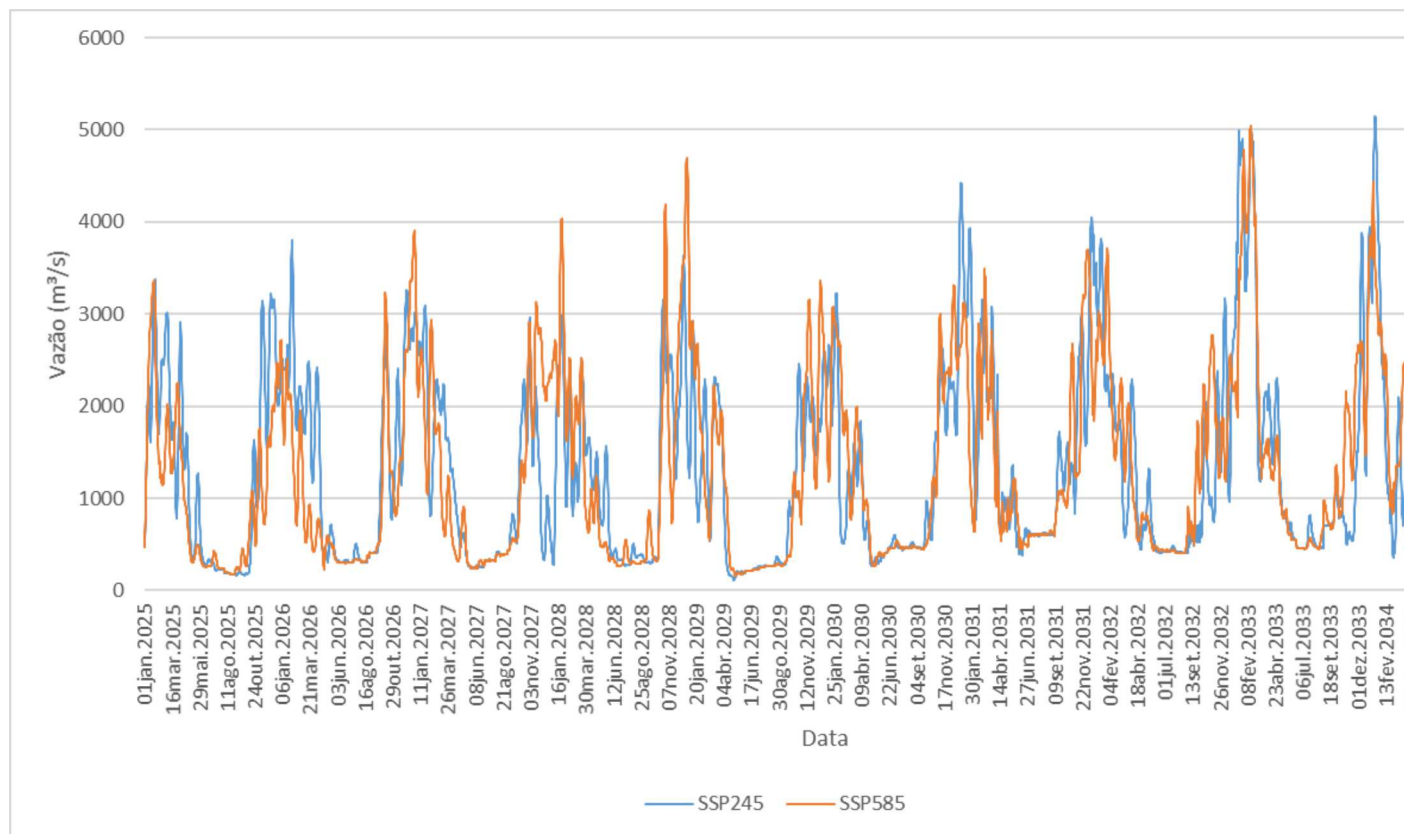


Figura 50 – Previsão de vazão para a Estação Manga nos cenários SSP245 e SSP585



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 14 indica os valores da intensidade do pico de descarga e a ocorrência do pico de descarga para as estações fluviométricas calibradas na porção média 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 mais pessimista. Por sua vez, as estações fluviométricas localizadas mais próximas à foz da bacia apresentaram uma intensidade do pico de descarga maior no cenário mais otimista com exceção da estação São Romão.



Tabela 14 – Intensidade do Pico de Descarga e Data do Pico de Descarga em nove estações fluviométricas localizadas na porção mineira da bacia do rio São Francisco para os cenários SSP245 e SSP585

Estação	SSP245		SSP585	
	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 jan. 2032
Várzea da Palma	1100,8 m <sup>3</sup> /s	31 dez. 2030	1539,9 m <sup>3</sup> /s	27 dez. 2030
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 jan. 2031
Porto da Extrema	939,2 m <sup>3</sup> /s	02 jan. 2031	838,7 m <sup>3</sup> /s	29 dez. 2030
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 jan. 2034

Fonte: elaborado pela autora.

De modo geral, no cenário SSP585 (pessimista) a data do pico de descarga antecipou em relação ao cenário SSP245 (otimista), com exceção da estação Pirapora Barreira em que a data do pico se manteve nos dois cenários. Isso está relacionado com a amplificação das chuvas pelo efeito das mudanças climáticas.

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

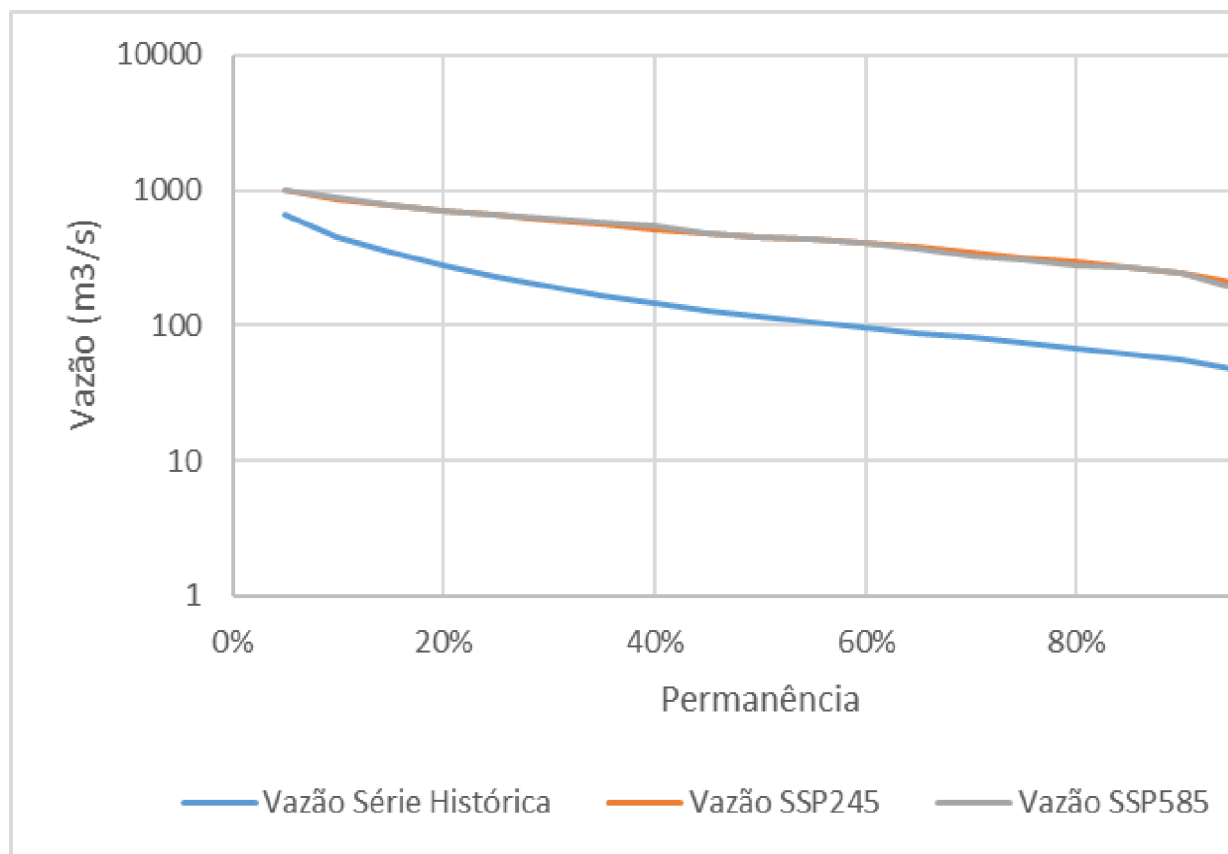
Obteve-se a curva de permanência – que expressa a relação entre a vazão e a frequência com que esta vazão é superada ou igualada – para as seguintes estações calibradas: Santo Hipólito, localizada mais próxima da cabeceira da bacia; Pirapora Barreira, situada na parte central da bacia; e Manga, na foz da bacia do projeto (Figura 51).

Figura 51 – Localização das estações fluviométricas utilizadas na obtenção da curva de permanência



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 52 – Curva de Permanência da Estação Santa Hipólito considerando vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP245 e SSP585



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 53 – Curva de Permanência da Estação Pirapora Barreiro considerando vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP245 e SSP585

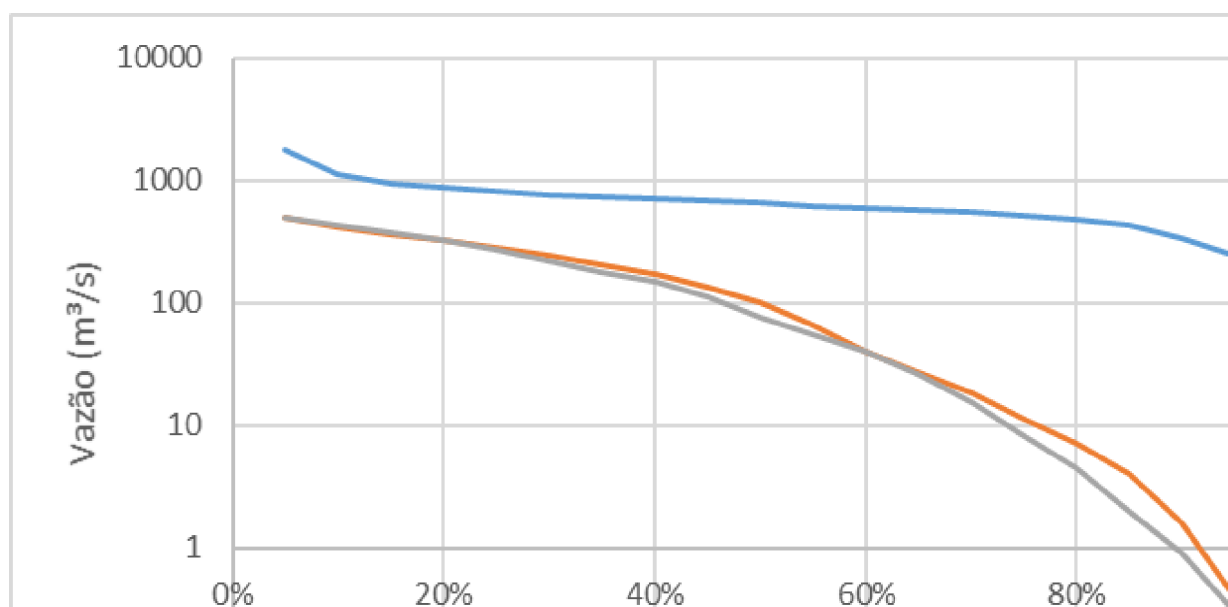
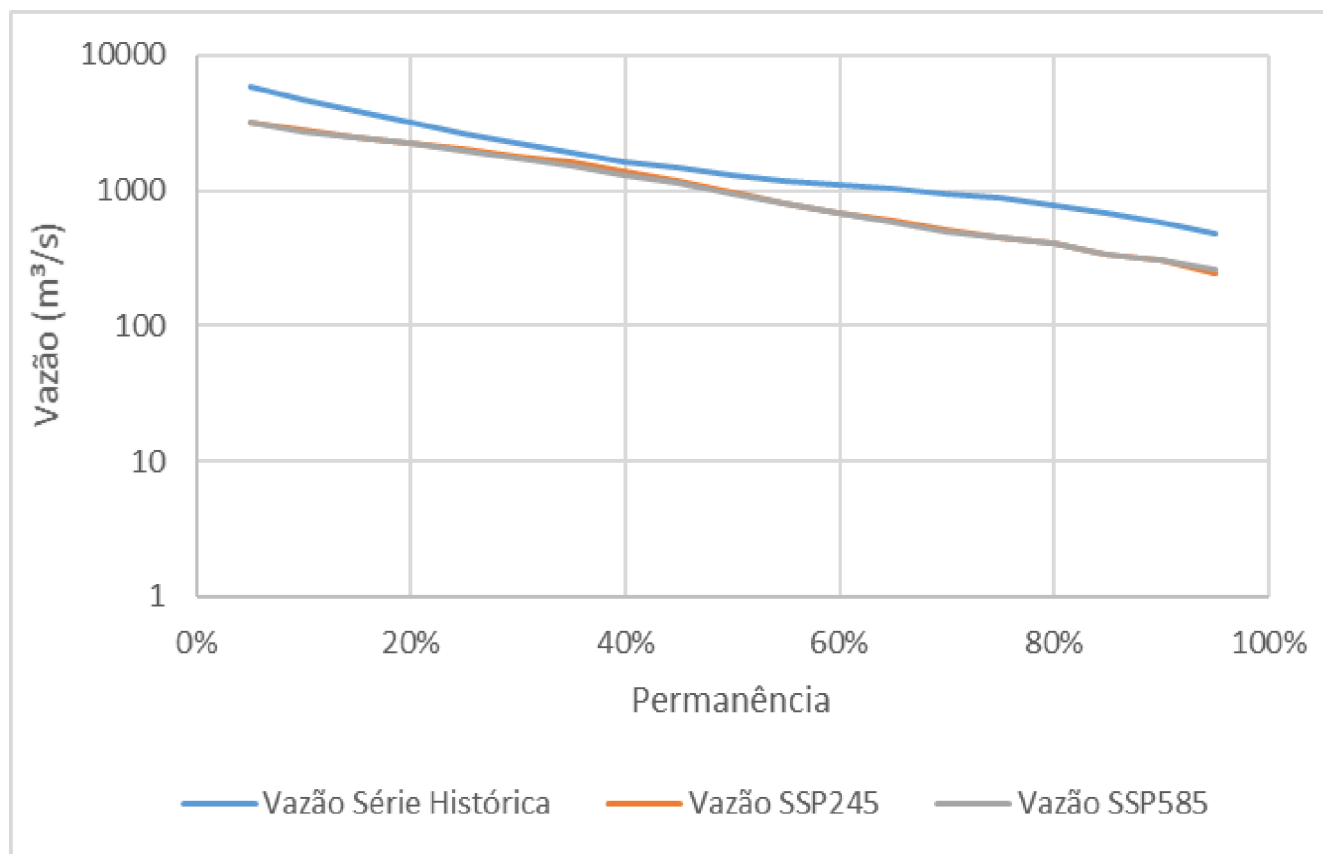




Figura 54 – Curva de Permanência da Estação Manga considerando as vazões obtidas na série histórica e nos cenários SSP245 e SSP585



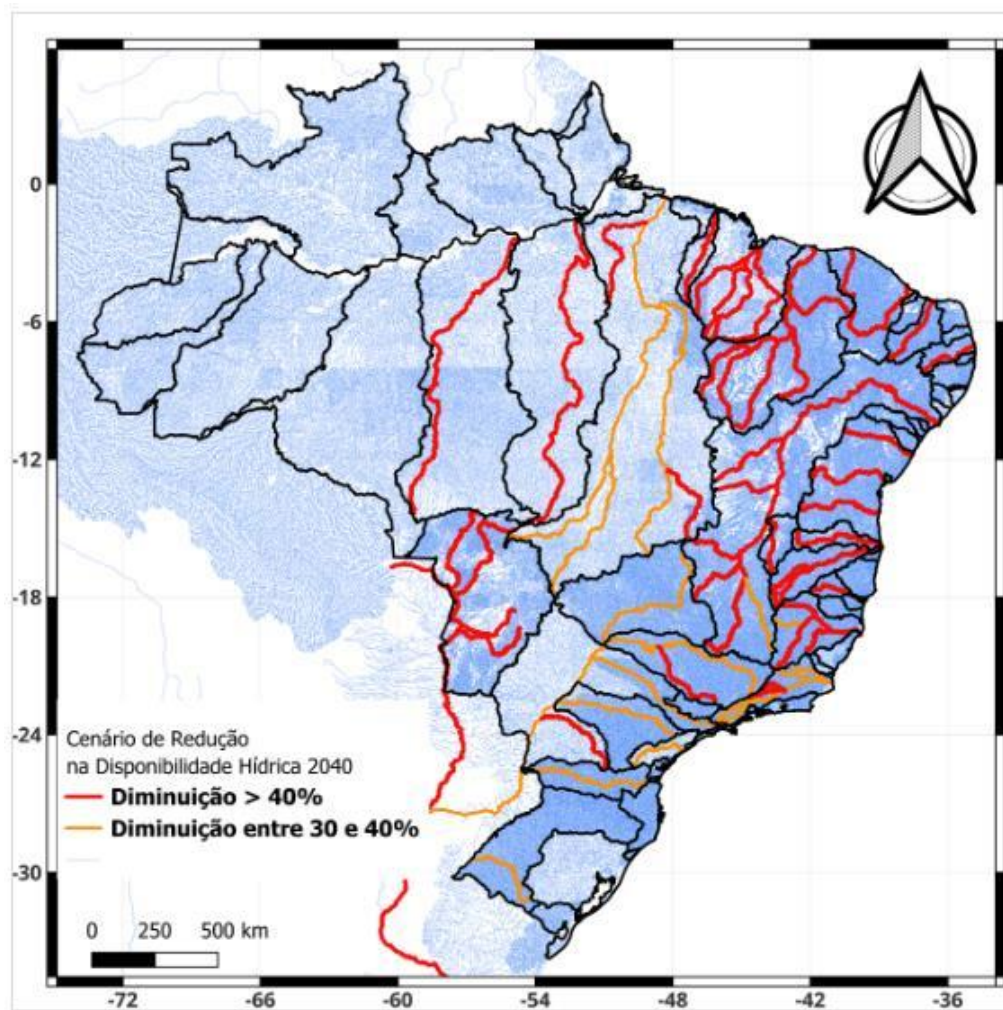
Fonte: elaborado pela autora.

Ao se comparar as vazões obtidas na série histórica com as dos cenários SSP245 e SSP585, 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 SSP245 e SSP585, 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 2050, tendem a permanecerem maiores do que o período histórico observado, na estação fluviométrica de Santo Hipólito, em ambos os cenários: otimista, SSP245 e pessimista, SSP585.

O resultado da previsão de vazão nessa porção da bacia hidrográfica do rio 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 prevê um cenário de redução da disponibilidade hídrica (Figura 55) na bacia hidrográfica do rio São Francisco no cenário de curto prazo (2015 a 2040), podendo impactar a geração hidrelétrica, a agricultura e o abastecimento de água.

Figura 55 – Mapa sobre cenário de redução na disponibilidade hídrica



Fonte: ANA, 2024.

## 7 CONCLUSÃO

A calibração e a validação da porção mineira da bacia hidrográfica Doce apresentaram resultados classificados como “bom a muito bom” para o coeficiente NSE e para o viés percentual, com exceção das estações Vila Rica 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 hidrográfica do rio Doce com série de dados completos de vazão no período estudado no trabalho.

Por sua vez, a calibração e a validação da bacia hidrográfica da porção mineira da bacia do rio São Francisco apresentaram, em sua grande maioria, resultados enquadrados como “bom a muito bom”. Uma vez que a bacia do rio São Francisco possui a UHE de Três Marias e retiradas nas calhas do rio São Francisco, os resultados encontrados podem ser considerados eficazes.

Ao se comparar as duas bacias, a porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco apresentou melhores resultados na calibração e validação do que a porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce. Pode-se atribuir isso, ao fato de que a bacia do rio São Francisco possui mais estações fluviométricas com dados completos no período estudado, o que permite mais pontos de calibração e, conseqüentemente, melhor precisão na calibração. Ademais, a bacia hidrográfica do rio São Francisco possui menos regularização de vazão do que a bacia do rio Doce.

Os resultados da previsão de vazão na bacia hidrográfica utilizando o modelo ACCESS-CM2 e os cenários SSP245 e SSP585 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 para os dois cenários futuros quando comparados com a série histórica das estações fluviométricas. Isso indica que a mudança climática pode afetar a disponibilidade de água na bacia hidrográfica do rio Doce.

## 8. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Por fim, a partir dos resultados desse trabalho, sugere-se as seguintes recomendações para estudos futuros:

- Obter dados mais precisos dos solos, realizando medições de condutividade hidráulica a fim de se ter dados de entrada corretos;
- Utilizar dados de precipitação com um intervalo de tempo mais disponíveis, a fim de melhorar a representação do hidrograma;
- Obter dados de precipitação de outro satélite com a finalidade de verificar a qualidade desse dado de entrada;
- Aplicar outros métodos para a separação do escoamento, a fim de obter o hidrograma, a vazão de base e a propagação do escoamento;
- Realizar a modelagem simulando diferentes cenários de ocupação do solo com o objetivo de analisar o impacto nas vazões;
- Simular a previsão de vazão utilizando outro modelo com dados futuros de precipitação.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **HIDROLOGIA DO RIO DOCE**. v3.3.8361.0. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 02 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR)**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>. Acesso em: 10 mar. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (2023a). **Plano de Recursos Hídricos do Rio Doce**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/rio-doce/rio-doce-saiba-mais>. Acesso em: 19 maio. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (2023b). **Região Hidrográfica São Francisco**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/sao-francisco>. Acesso em: 21 maio 2023.

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, 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.

ALMEIDA, L.; VALDÉS SERRA, J. C. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações utilizadas. **Revista da FAE**. [S. l.]. v. 20. n. 1. p. 129–137. 2017.

BOJILOVA, E. K. (2020). Applicability Of Rainfall-Runoff Models To The Conditions Of River Runoff In Bulgaria. *In: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Anais [...]* <https://doi.org/10.5593/sgem2020/3.1/s12.004>.

BRASIL. 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 8.034 de 2004 e o art. 16º da Lei nº 4.907 de 1966. Brasília, 2007. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1997/leis\\_9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1997/leis_9433.htm).

CARVALHO, P.; FILHO, W.; FONSECA, L.; RIBEIRO, C. Modelagem Hidrológica e uma revisão sistemática utilizando o StArt. 21º Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. **Anais** [...] Poços de Caldas, 2024. ISSN: 2175-3877.

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

CEMIG (2024b). **UHE Três Marias**. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usina/tres-marias/>. Acesso em: 11 set. 2024.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS - CEMADEN. **Inundação**. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/inundacao/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2015). **Hidrologia para Engenharia de Ciências Ambientais**. Volume: 1. Impressão: 2. ISBN: 978-85-8868-634-8.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE – CBH-DOCE. **Atuação**. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>. Acesso em: 16 maio. 2023.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO – CBHSF. **Atuação**. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>. Acesso em: 31 maio. 2023.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO – CODEVASF. **Rio São Francisco**. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2019/06/Cartilha-sobre-o-Rio-Sao-Francisco.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2024.

CUNHA, D. M. **Bacia hidrográfica do Rio Doce – MG/ES: Variabilidade e impactos das chuvas**. Curitiba: CRV, 2020.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Base de dados de solo**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sistema-de-dados-de-solos>. Acesso em: 16 maio. 2023.

**Informatics**, Volume 66, 2021,101453, ISSN 1574-9541.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101453>.

FUNK, Chris; PETERSON, Pete; MARTIN, Landsfeld; PEDREROS, Diego; VE James; SHUKLA, Shraddhanand; HUSAK, Gregory; ROWLAND, James; HARRF Laura; HOELL, Andrew; MICHAELSEN, Joel. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes **Scientific Data 2**, 150066. 2015. DOI:10.1038/sdata.2015.66.

GHUMMAN, AR.; RAUF, A; Alodah, A; HAIDER, H; SHAFIQUZZAMAN, M (20 Evaluating the impact of climate change on stream flow: integrating GCM. hydro modelling and functional data analysis. **Arabian J Geosci** 13(17):1–5.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-020-05881-y>.

GOOGLE EARTH ENGINEE. **CHIRPS Daily: Climate Hazards Center Infrared Precipitation With Station Data (Version 2.0 Final)**. Disponível em: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG\\_CHIRPS\\_DAILY](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY). Acesso em: 20 out. 2023.

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

GUMINDOGA, W.; RWASOKA, D.T.; NHAPI, I.; DUBE, T. Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment. Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. **Phys. Chem. Earth**, 2016, 100, 371–382.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET (2021). **Análise das Chuvas na Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo em dezembro de 2021**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/an%C3%A1lise-das-chuvas-na-bahia-minas-gerais-e-espir%C3%ADto-santo-em-dezembro-de-2021>. Acesso em: 25 mar. 2022.

JENÍČEK, M. Rainfall-runoff modelling in small and middle-large catchments – overview. **Geografie** 2007, 111, 305–313.

JOSHI, N.; BISTA, A.; POKHREL, I.; KALRA, A.; AHMAD, S. Rainfall-Runoff Simulation in Cache River Basin, Illinois, Using HEC-HMS. In World Environment and Water Resources Congress 2019; American Society of Civil Engineers: **ASCE** [...] Pittsburgh. PA. USA. 2019; pp. 348–360.

LI, Z.; CAO, Y.; DUAN, Y.; JIANG, Z.; SUN., F. Simulation and Prediction of the Impact of Climate Change on the Hydrological Cycle of Typical Watersheds in China

MAPBIOMAS (2023). **Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/> em: 10 abr. 2024.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. (1997). Escalas hidrológicas I: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre/RS, 02 (01), 59-79.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa CERH - MG nº 06, de 04 de outubro de 2002. Estabelece as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Estado de Minas Gerais. **Diário Executivo de Minas Gerais**, 05/10/2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA – MMA. **Ciclo Hidrológico**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/view/id/123/hidrol%C3%B3gico.html>. Acesso em: 26 maio. 2023.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Ambientais) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

MORIASI, D. N.; ARNALD., J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HANSEN, L.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of uncertainty in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineering**. v. 50. n. 3. p. 885-900. 2007. <http://doi.org/10.13031/2013.23111>.

NATARAJAN, S.; RADHAKRISHNAN, N. Simulation of rainfall–runoff process in ungauged catchment using an event-based hydrologic model: A case study of Koraiyar basin in Tiruchirappalli city, India. **J. Earth Syst. Sci.**, vol. 130, n. 1, p. 1-12. DOI: 10.1007/s12040-020-01532-8.

NEMATI, A.; ZAKERI NIRI, Mahmoud; MOAZAMI, Saber. (2015). Assessment of Rainfall-Runoff Simulation Model Based On Satellite Algorithm, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. XL-1-W5. 529-541. 10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-529-2015.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS Climáticas – 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. Cambridge University Press. Cambridge. UK and New York. 167. 2022.

PAIVA, M.; SANTIGO, A.; DIAS, L.; CASTRO, A.; GOMES, P. Simulação de escoamento de um rio em uma bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2010, 15(1), 1-10.



RAUF, A.; GHUMMAN, A. (2018). Impact assessment of rainfall-runoff simulation on the flow duration curve of the Upper Indus River—A comparison of data-driven hydrologic models. **Water**. 10(7). 876.

REVISTA AGROPECUÁRIA (2021). **Evapotranspiração**. Disponível em: <http://www.revistaagropecuaria.com.br/2021/12/22/evapotranspiracao-a-importancia-de-entender-esse-conceito-na-irrigacao/>. Acesso em: 27 maio. 2022.

ROCHA, B; MOURA, M.; GARCIA, C.; MACHADO, B.; LEITOLES, G.; SILVA, J. (2023). Calibração do Modelo HEC-HMS para as sub-bacias do Alto São Francisco. In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais [...]** ISSN 2318-0358

ROCHA, P. C.; SANTOS, A. A. (2018). Análise Hidrológica em Bacias Hidrográficas. **Mercator**. 17. e17025. DOI: 10.4215/RM2018.E17025.

SARDOII, E. R.; ROSTAMI, N.; SIGAROUDI, S. K.; TAHERI, S. Calibration of estimation methods in HEC-HMS for simulation of surface runoff (Case Study: Amirkabir Dam Watershed), Iran., **Adv. Environ. Biol.** 2012, 6, 343–348.

SCHARFFENBERG, W.; HARRIS, J. (2008). Hydrologic engineering center hydrologic modeling system, HEC-HMS: interior flood modeling. In: World Environmental and Water Resources Congress 2008, **Anais [...]** Ahupua'A.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de Bacias Hidrográficas**. Universidade da UESC, 2002.

SENGUPTA, A., ADAMS, S. K., BLEDSOE, B. P., STEIN, E. D., MCCUNE, K., MAZOR, R. D. (2018). Tools for managing hydrologic alteration on a regional scale: Estimating changes in flow characteristics at ungauged sites. **Freshwater Biology** 63(8), 769– 785. <https://doi.org/10.1111/fwb.13074>.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Ciclo Hidrológico**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Ciclo-Hidrologico-1376.html>. Acesso em: 26 maio. 2023.

SOUZA, Dhulia Alves. **Zoneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco-MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2017.

TASSEW, Bitew; BELETE, Mulugeta; MIEGEL, Konrad (2019). Application of HEC-HMS Model for Flow Simulation in the Lake Tana Basin: The Case of Gilgel Abay Catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Hydrology**, 6, 21. DOI: 10.3390/hydro601021

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; MENON, S. R. S. NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) for the 21st Century. *Nature, Scientific Data* volume 9, Article number: 262, 2022, <https://doi.org/10.7917/OFSG3345>.

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

TUCCI, C, E, M (2005). **Modelos hidrológicos**. 2 ed., Porto Alegre: ABRBRAS, Editora da UFRGS.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **HEC-HMS**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 15 maio 2022.

VON SPERLING, M, **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005.

## APÊNDICE A – Artigo “MODELAGEM HIDROLÓGICA: uma revisão sistemática utilizando o StArt”



### MODELAGEM HIDROLÓGICA: uma revisão sistemática utilizando o StArt

Paula Roberta Souza Ca  
 Welson de Avelar Soares  
 Leonardo Golliatt da F  
 Celso Bandeira de Melo R

Estudo das práticas de gestão de recursos hídricos, incluindo conservação, tratamento de água e políticas de uso sustentável.

#### *Resumo*

A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para a gestão dos recursos hídricos, possibilitando o conhecimento da dinâmica da bacia hidrográfica em pouco tempo e de forma econômica. O presente trabalho teve como objetivo a realização de uma revisão sistemática da modelagem hidrológica com foco no modelo chuva-vazão e no software HEC-HMS, utilizando a metodologia StArt - *State of the Art through Systematic Review*. Realizou-se a seleção de artigos publicados nas plataformas *Scopus*, *Science Direct*, *Scielo* e *Science*, sendo avaliado 48 artigos. A plataforma que mais retornou artigos foi a *Scopus* e a revista com mais artigos publicados foi o *Journal of Hydrology*. A maioria das bacias hidrográficas estudadas nos artigos selecionados estão localizadas nos Estados Unidos e China. O ano de 2022 foi o que teve mais publicação nessa área, mostrando um crescente interesse no assunto recentemente. Os estudos apresentaram resultados satisfatórios do HEC-HMS na simulação chuva-vazão e apontaram a importância dos dados de entrada, séries históricas completas de precipitação e vazão, mostrando como a falta desses dados acaba limitando os estudos nas etapas de calibração e validação.

<sup>1</sup>Aluna do Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, e-mail: paula.casalotto@ufjf.edu.br

**Palavras-chave:** Recursos hídricos; Bacia hidrográfica; Modelo Chuva-Vazão; Escoamento Superficial.

## INTRODUÇÃO

O comportamento de uma bacia hidrográfica pode ser demonstrado por um modelo que realiza a previsão e simulação de diferentes condições, permitindo que extremos sejam antecipados e possibilitando, assim, a adoção de medidas preventivas (Guduru *et al.*, 2005).

Conhecer o comportamento da vazão de um rio é de extrema importância para a resolução de diversos problemas na hidrologia, principalmente, na gestão dos recursos hídricos. Há diferentes metodologias para estimar a geração e a propagação da vazão em uma bacia hidrográfica.

Uma dessas metodologias é o estudo e a previsão de vazões por modelos matemáticos do tipo chuva-vazão que consiste na aplicação de um modelo hidrológico matemático para representar os principais componentes do ciclo hidrológico, considerando a ocorrência da precipitação até a resposta hidrológica – referente às vazões na bacia hidrográfica. Assim, o modelo de simulação chuva-vazão é uma ferramenta utilizada para verificar a resposta de precipitação da bacia hidrográfica (Guduru *et al.*, 2022; Guduru *et al.*, 2017).

Diversos softwares são utilizados para estudos de escoamento em bacias, sendo o *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), um software de acesso livre e gratuito, que foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos para a simulação dos processos hidrológicos das bacias dendríticas para diversas finalidades como, por exemplo, estudo de segurança hídrica, drenagem, previsão de vazão, avaliação de impactos da urbanização e mitigação dos danos causados pela inundação (USACE, 2024).

No que tange à previsão de vazão, o HEC-HMS possibilita estimar

visualizados através do mapa da bacia e são gerados em forma de tabela e gráfico temporal.

O presente trabalho faz parte de um Projeto de Pesquisa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) cujo título é Caracterização Hidrológica e Modelagem Hidrológica nas Principais Bacias Hidrográficas de Minas Gerais.

No Brasil, os problemas relacionados aos eventos extremos de precipitação causados diversos prejuízos materiais e de vidas humanas. Minas Gerais foi um dos estados mais afetados com as chuvas intensas nos últimos anos.

Sendo assim, objetiva-se com esse trabalho realizar uma revisão sistemática de modelagem hidrológica com foco, principalmente, no método chuva-vazão e no software HEC-HMS.

## METODOLOGIA

A revisão sistemática, de acordo com a UFScar (2024), é um estudo secundário utilizado para levantamento do estado da arte de estudos primários sobre determinado tema com o objetivo de realizar uma metanálise.

O software StArt (*State of the Art through Systematic Review*) (Fabbri *et al.*, 2019) é uma ferramenta que possui uma interface gráfica simples que facilita o acesso do usuário e oferece suporte nas seguintes etapas do processo de revisão sistemática, conforme apresentado na Figura 01.

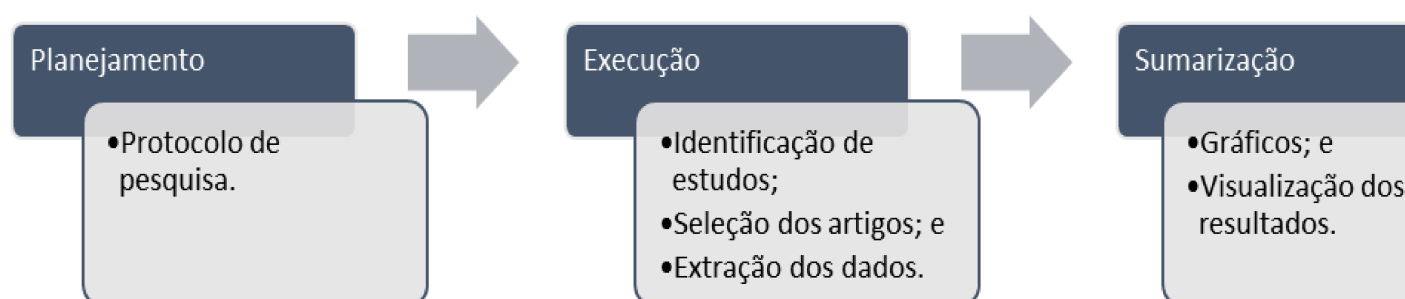


Figura 01: Etapas do processo de revisão sistemática no StArt.

Primeiramente, definiu-se o protocolo do trabalho, no qual foram seguintes palavras-chave: *HEC-HMS; chuva-vazão; precipitation-runoff; precipitation; hidrologia; hydrology; hidrológico; hydrologic; hidráulico; recursos hídricos; e water resources* em bibliotecas digitais abrangentes capazes de acessar arquivos no formato BibTEX. A busca tomou como base as seguintes plataformas: *Science; Science Direct; Scielo; e Scopus*.

Os estudos foram selecionados inicialmente aplicando-se os critérios de inclusão, sendo necessário que todos os critérios de inclusão fossem atendidos simultaneamente. Para a exclusão, bastava que o estudo atingisse pelo menos um critério de exclusão. As palavras-chave definidas nas *strings* foram aplicadas às máquinas de busca nos campos "Abstract" e "Keyword" de forma que apareceram ao menos em um destes campos. Os critérios de exclusão foram: trabalhos sem DOI; score nulo; e trabalhos que não apresentassem o método.

Em seguida, procedeu-se para a etapa de execução, sendo realizada a identificação dos estudos e selecionada a opção de remover automaticamente os artigos duplicados. Os artigos não classificados, selecionou-se cada artigo e classificou-o usando os critérios de inclusão e exclusão. Na sequência, os artigos aceitos na seleção foram analisados para a extração de dados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 02 apresenta um gráfico com os resultados referentes as fontes de dados da revisão sistemática. Foram selecionados 92 artigos nas fontes de pesquisa: 25 da plataforma *Scopus*, 25 da *Science Direct*, 16 da *Scielo* e 14 da *Web of Science*. Foram extraídos 48 artigos.

Os artigos aceitos na parte de extração de dados tiveram os seus resumos sumarizados. A Figura 03 mostra a frequência dos critérios de extração dos artigos, sendo abordar o modelo do tipo chuva-vazão o critério de inclusão mais frequente.

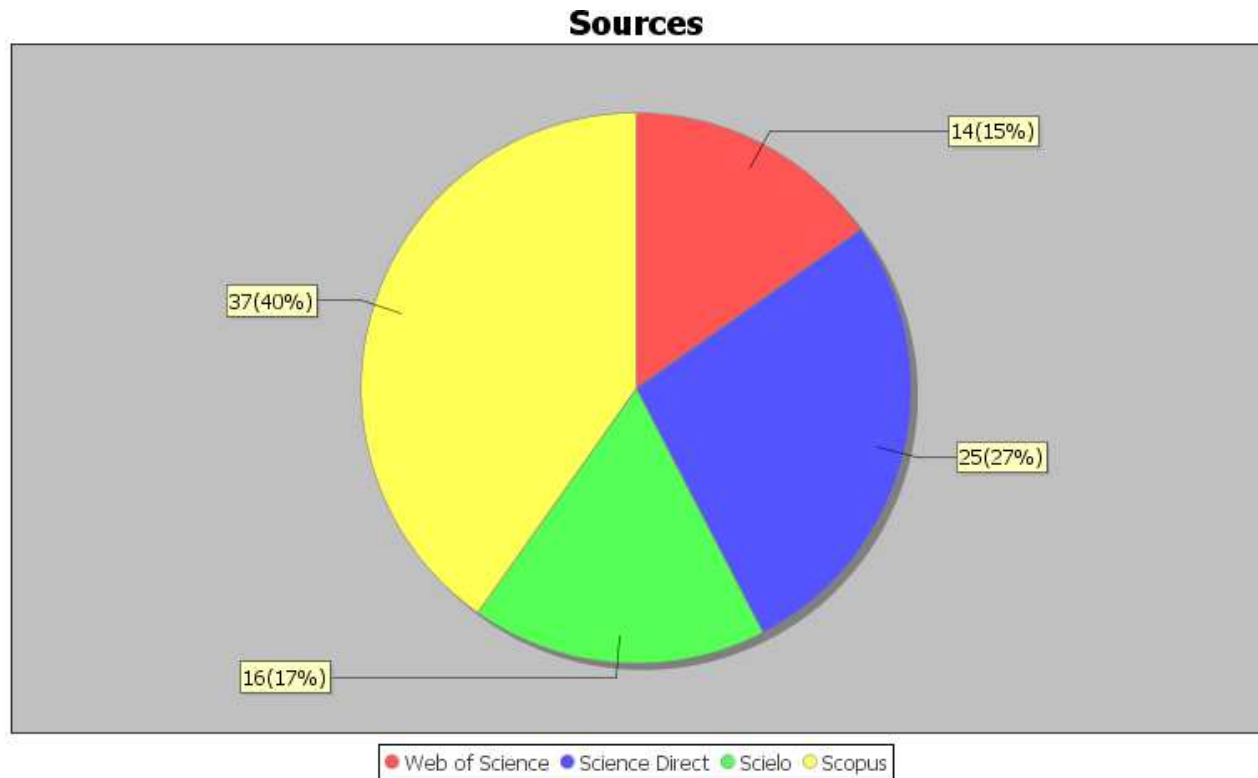
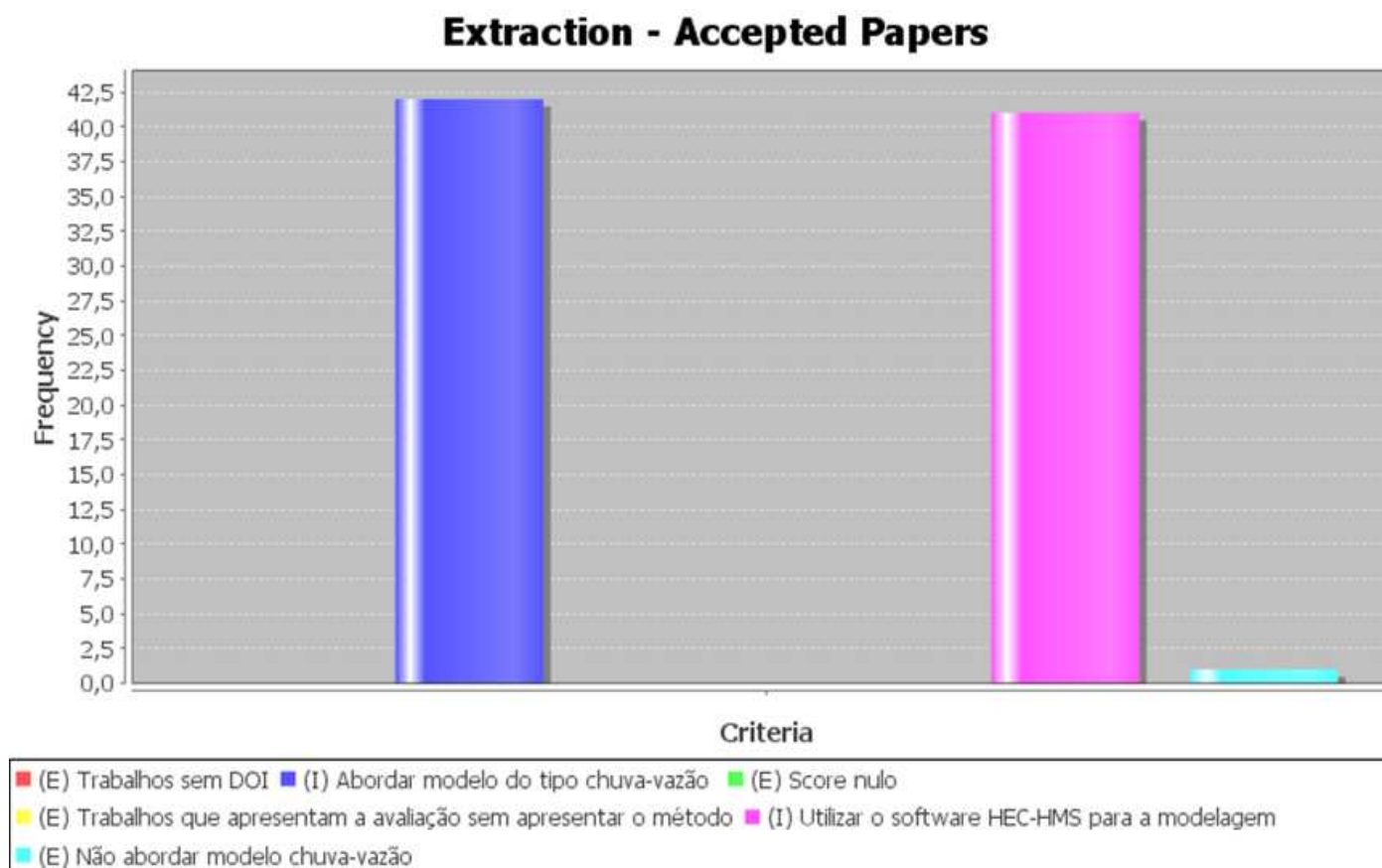


Figura 02: Fontes de pesquisa da revisão sistemática.







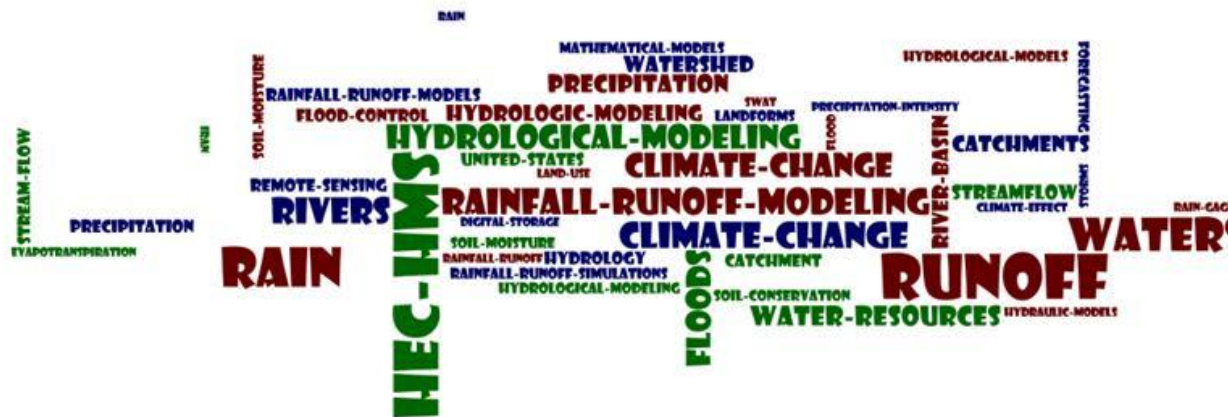


Figura 06: Nuvem de palavras da palavra-chave.

O Quadro 01 apresenta as principais informações dos artigos extraídos na pesquisa realizada:

Quadro 01: Artigos extraídos pelo método StArt

AUTORES (ANO)	REVISTA	ÁREA DE ESTUDO	MODELO H
RAUF, ATEEQ-UR; GHUMMAN, ABDUL RAZZAQ (2018)	WATER	BACIA DO RIO INDUS - PAQUISTÃO	HEC-HMS E R ARTIFICIAL
JOSHI, ET AL. (2019)	WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2019	RIO CACHE – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS
NEMATİ, A. R.; NIRI, M. ZAKERI ; MOAZAMI, S. (2015)	INTERNATIONAL CONFERENCE ON SENSORS & MODELS IN REMOTE SENSING & PHOTOGRAMMETRY	BACIA HIDROGRÁFICA DE GORGANROUD – IRÃ	HEC-HMS MODELOS OR DADOS (MOD NEURAL DO I MULTICAMA REGRESSÃO SUPORTE)
LI, ET AL. (2022)	WATER	BACIAS HIDROGRÁFICAS TÍPICAS NAS MONTANHAS CHANGBAI - CHINA	HEC-HMS
SHARMA, DEVESH; BABEL, MUKAND S. (2018)	METEOROLOGICAL APPLICATIONS	BACIA DE MAE KLONG, TAILÂNDIA	HEC-HMS
CANDELA, LUCILA; TAMOH, KARIM; SUNANDA, SRIWATI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	BACIA HIDROGRÁFICA DE SUNANDA, SRIWATI	HEC-HMS

MESTA <i>ET AL.</i> (2019)	PAMUKKALE UNIVERSITY JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES- PAMUKKALEUNIVERSI TESI MUHENDISLIK BILIMLERI DERGISI	YENICEGORUCE - TURQUIA	HEC-HM
SZYDŁOWSKI <i>ET AL.</i> (2015)	14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM - WATER MANAGEMENT AND HYDRAULIC ENGINEERING 2015	BACIA HIDROGRÁFICA DE STRZY EM GDANSK - POLÂNIA	HEC-HM
SENGUPTA <i>ET AL.</i> (2018)	FRESHWATER BIOLOGY	REGIÃO SUL DA CALIFÓRNIA – ESTADOS UNIDOS	HEC-HM
MARKUS <i>ET AL.</i> (2007)	JOURNAL OF HYDROLOGY	NORTHEASTERN ILLINOIS – ESTADOS UNIDOS	HEC-HM
BEILICCI, ERIKA; BEILICCI, ROBERT (2015)	WATER RESOURCES, FOREST, MARINE AND OCEAN ECOSYSTEMS, SGEM 2015, VOL I	-	HEC-HM (WATER PREDIC GEOLO
MOURAD, KHALDOON A. ; NORDIN, LINA ; ANDERSSON-SKÅLD, YVONN (2022)	CLIMATE RISK MANAGEMENT	SUÉCIA	HEC-HM
GUMINDOGA <i>ET AL.</i> (2017)	PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EARTH, PARTS A/B/C	MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS DE UPPER MANYAME - ZIMBABUÉ	HEC-HM
ZHANG <i>ET AL.</i> (2022)	ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	BACIA HIDROGRÁFICA AFETADA PELO TERREMOTO DE WENCHUAN - CHINA	HEC-HM
CASTRO, CYNDI V. ; MAIDMENT, DAVID R. (2020)	ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	-	HEC-HM
LIN, <i>ET AL.</i> (2022)	ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	BACIA HIDROGRÁFICA DE CHUANCHANG - CHINA	HEC-HM
ZHANG, <i>ET AL.</i> (2021)	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	BACIA HIDROGRÁFICA AFETADA PELO TERREMOTO DE WENCHUAN - CHINA	HEC-HM
WIJAYARATHNE, DAYAL BUDDIKA; COULIBALY, PAULIN	JOURNAL OF HYDROLOGY: REGIONAL STUDIES	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO WATERFORD -	TRÊS M CONCE UM MO

FERREIRA, <i>ET AL.</i> (2021)	ECOLOGICAL INFORMATICS	BACIA HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL	HEC-HMS E S
LIU, <i>ET AL.</i> (2022)	INTERNATIONAL JOURNAL OF DISASTER RISK REDUCTION	TAITOU CATCHMENT - CHINA	HEC-HMS
GUDURU, <i>ET AL.</i> (2023)	JOURNAL OF AFRICAN EARTH SCIENCES	BACIA DO RIO MEKI – ETIÓPIA	HEC-HMS
TOUFIK, <i>ET AL.</i> (2022)	MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS	WADI TAMDMADT - BNI DRAR - EGITO	HEC-HMS
ABDELAL, <i>ET AL.</i> (2021)	JOURNAL OF HYDROLOGY	ANTIGO SISTEMA NABATEUS DE CONTROLE DE ENCHENTES EM PETRA - JORDÂNIA	HEC-HMS
ABBAS, M.; ATANGANA NJOCK, P.G.; WANG, Y. (2022)	APPLIED SCIENCES (SWITZERLAND)	MULTAN – PAQUISTÃO	HEC-HMS
LI, Z. AND CAO, Y.; DUAN, Y. ; JIANG, Z. AND SUN, F. (2022)	WATER (SWITZERLAND)	BACIAS HIDROGRÁFICAS NAS MONTANHAS CHANGBAI - CHINA	HEC-HMS
DARJI, K; PATEL, D.; PRAKASH, I. (2022)	LECTURE NOTES IN CIVIL ENGINEERING	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACHHU - ÍNDIA	HEC-HMS E S
BOJILOVA, E.K. (2020)	INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SURVEYING GEOLOGY AND MINING ECOLOGY MANAGEMENT, SGEM	BACIA DO RIO DANÚBIO - BULGÁRIA.	HEC-HMS
GHUMMAN, <i>ET AL.</i> (2020)	ARABIAN JOURNAL OF GEOSCIENCES	BACIA DO RIO INDUS - PAQUISTÃO	HEC-HMS
SONG, <i>ET AL.</i> (2019)	WATER (SWITZERLAND)	PEQUENO RIACHO URBANO NA COREIA DO SUL	HEC-HMS
AZMAT, <i>ET AL.</i> (2018)	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	BACIA DO RIO JHELM - PAQUISTÃO	HEC-HMS E M ESCOAMENT (SRM)
NYAUPANE, <i>ET AL.</i> (2018)	WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2018	IRWIN CREEK - CAROLINA DO NORTE	HEC-HMS
JUAN, A.; FANG, Z.; BEDIENT. P.B. (2017)	JOURNAL OF HYDROLOGIC	BACIA HIDROGRÁFICA DE	HEC-HMS

ZHANG, <i>ET AL.</i> (2013)	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	BACIA HIDROGRÁFICA DE CLEAR CREEK EM IOWA – ESTADOS UNIDOS	HEC-HM
TAHMASBINEJAD, <i>ET AL.</i> (2012)	JOURNAL OF APPLIED SCIENCES	RIO KARUN - IRÃ	HEC-HM
MOTEVALLI, <i>ET AL.</i> (2012)	AUSTRALIAN JOURNAL OF BASIC AND APPLIED SCIENCES	BACIA HIDROGRÁFICA DO KAN - IRÃ	HEC-HM
BIGGS, E.M.; ATKINSON, P.M. (2011)	HYDROLOGICAL PROCESSES	BACIA HIDROGRÁFICA SEVERN UPLANDS – REINO UNIDO	HEC-HM
LIM, Y.H.; HASSELL, J.; TENG, W. (2010)	MODELLING FOR ENVIRONMENT'S SAKE: PROCEEDINGS OF THE 5TH BIENNIAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE SOCIETY, IEMSS 2010	LAGO DEVILS – ESTADOS UNIDOS	HEC-HM
MILLER, <i>ET AL.</i> (2008)	WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2008: AHUPUA'A - PROCEEDINGS OF THE WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2008	-	HEC-HM
GARCIA, <i>ET AL.</i> (2008)	JOURNAL OF HYDROLOGY	BACIAS DO NORTE DA ESPANHA	HEC-HM
MARKUS, <i>ET AL.</i> (2007)	JOURNAL OF HYDROLOGY	ILLINOIS – ESTADOS UNIDOS	HEC-HM
JENÍČEK, M. (2006)	GEOGRAFIE-SBORNÍK CGS	BACIAS HIDROGRÁFICAS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE	HEC-HM SACRA NASIM
KNEBL, <i>ET AL.</i> (2005)	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT	BACIA DO RIO SAN ANTONIO – ESTADOS UNIDOS	HEC-HM
ANDERSON, <i>ET AL.</i> (2002)	JOURNAL OF HYDROLOGIC	BACIA HIDROGRÁFICA DO	HEC-HM

Analisando os artigos extraídos, pode-se concluir que houve um crescimento nos estudos de modelagem hidrológica utilizando o modelo chuva-vazão nos últimos 10 anos, sendo 2022 o ano que mais teve publicações nessa área.

A plataforma que mais retornou artigos foi a *Scopus*, seguida pela *Science Direct* e *Web of Science*. Por sua vez, as revistas que mais tiveram artigos selecionados foram: *Journal of Hydrology*, *Water* e *Environmental Modelling & Software*.

Ademais, pode-se observar que a modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS está sendo aplicada em vários lugares do mundo com destaque para os Estados Unidos, China e Paquistão. Somente um estudo dentre os artigos extraídos teve como área de estudo uma bacia hidrográfica brasileira, apontando a carência de estudos de previsão de vazão utilizando o HEC-HMS no Brasil.

Os artigos selecionados demonstraram a importância da compreensão do comportamento hidrológico – processo chuva-vazão – na gestão dos recursos hídricos (Guduru *et al.*, 2022; Joshi *et al.*, 2019). Além disso, mostraram a sensibilidade de alguns parâmetros de entrada nas etapas de calibração e validação e os coeficientes estatísticos utilizados para avaliar os resultados.

Esses estudos confirmaram a capacidade do modelo HEC-HMS na previsão de vazão e que as previsões do modelo são melhores para anos que possuem dados de precipitação completos (Li *et al.*, 2022, Sengupta *et al.*, 2018).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizou uma revisão sistemática da modelagem hidrológica, principalmente, do modelo chuva-vazão e do software HEC-HMS utilizando a ferramenta STArt. Nesse sentido, pode-se concluir que a modelagem hidrológica é essencial na gestão dos recursos hídricos, possibilitando a previsão de eventos extremos e a adoção de medidas preventivas.

Ademais, foi possível observar a escassez de trabalhos de modelagem hi bacias hidrográficas brasileiras e a necessidade desse tipo de estudo, tendo desastres relacionados a inundação que aconteceram recentemente no Brasil.

De maneira geral, os artigos apontaram resultados satisfatórios e a imp conhecer o comportamento hidrológico para desenvolver estratégias que desafios causados pelas mudanças climáticas.

## **A**GRADECIMENTOS

**Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas apoio – processo APQ-01226-22.**

## **R**EFERÊNCIAS

FABBRI, S., Octaviano, F., Silva, C., Di THOMMAZO, A., HERNANDES, E., BELGAMO, A. (2016). Improvements in the Start tool to better support the syst process. In Proc. of the 20th International Conference on Evaluation and Assess Software Engineering (EASE'16), **Anais [...]** Limerick, Ireland, June 2016.

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

JOSHI, N.; BISTA, A.; POKHREL, I.; KALRA, A.; AHMAD, S. Rainfall-Runo in Cache River Basin, Illinois, Using HEC-HMS. In World Environmental and V Resources Congress 2019; American Society of Civil Engineers: **Anais [...]** Pitt USA, 2019; pp. 348–360.

LI, Z.; CAO, Y.; DUAN, Y.; JIANG, Z.; SUN, F. **Simulation and Prediction of of Climate Change Scenarios on Runoff of Typical Watersheds in Changbai China.** Water 2022, 14, 792.

SENGUPTA, A., ADAMS, S. K., BLEDSOE, B. P., STEIN, E. D., MCCUNE, F.

TUCCI, C. E. M (2005). **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH: Editora d UFRGS.

UFScar - DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO - UNIVERSIDADE FEDERAL D CARLOS, LABORATÓRIO DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE SOFTWARE. Disponível em: <https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools-1/start-1>. Acesso em: 10 set. 2024.

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

**APÊNDICE B – PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A PORÇÃO MI  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE**

Tabela 15 – Parâmetros de entrada do método *Deficit and Constant* para  
mineira da bacia do rio Doce

Sub-bacia	<i>Initial Deficit</i> (mm)	<i>Maximum Storage</i> (mm)	<i>Constant Rate</i> (mm/hr)	<i>Imp</i>
<i>Subbasin-1</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-2</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-3</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-4</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-5</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-6</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-7</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-8</i>	10	100	1	20
<i>Subbasin-9</i>	10	100	1	40
<i>Subbasin-10</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-11</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-12</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-13</i>	10	100	1	20
<i>Subbasin-14</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-15</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-16</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-17</i>	10	100	1	40
<i>Subbasin-18</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-19</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-20</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-21</i>	10	100	1	30
<i>Subbasin-22</i>	10	100	1	0



Sub-bacia	<i>Initial Deficit (mm)</i>	<i>Maximum Storage (mm)</i>	<i>Constant Rate (mm/hr)</i>	<i>Impervio</i>
<i>Subbasin-27</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-28</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-29</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-30</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-31</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-32</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-33</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-34</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-35</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-37</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-38</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-39</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-40</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-41</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-42</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-43</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-44</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-45</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-46</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-47</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-48</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-49</i>	10	100	1	60
<i>Subbasin-50</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-51</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-52</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-53</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-54</i>				

Sub-bacia	<i>Initial Deficit (mm)</i>	<i>Maximum Storage (mm)</i>	<i>Constant Rate (mm/hr)</i>	<i>Imp</i>
<i>Subbasin-58</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-59</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-60</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-61</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-62</i>	10	100	1	0

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 16 – Parâmetros de entrada do método *Clark Unit Hydrograph* porção mineira da bacia do rio Doce

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (
<i>Subbasin-1</i>	3263.0	140.34432	260.3797436	25.
<i>Subbasin-2</i>	1898.6	132.97829	210.4564869	23.
<i>Subbasin-3</i>	864.31	73.08633	168.7445215	29.
<i>Subbasin-4</i>	3953.3	181.71221	269.5910844	22.
<i>Subbasin-5</i>	2477.6	174.64517	224.0956818	20.
<i>Subbasin-6</i>	1718.0	145.51994	198.9344451	21.
<i>Subbasin-7</i>	2545.3	173.63215	226.8105095	20.
<i>Subbasin-8</i>	1766.5	147.16164	200.8347341	21.
<i>Subbasin-9</i>	2109.7	124.71266	222.163656	24.
<i>Subbasin-10</i>	907.76	68.24892	174.1883726	31.
<i>Subbasin-11</i>	3228.3	220.19307	240.131974	18.
<i>Subbasin-12</i>	861.97	53.40087	177.7935015	36.
<i>Subbasin-13</i>	1783.4	127.59610	206.5698586	23.
<i>Subbasin-14</i>	904.85	100.52628	162.875659	23.
<i>Subbasin-15</i>	959.79	94.67421	168.5699589	25.
<i>Subbasin-16</i>	869.69	95.68475	161.6007937	24.
<i>Subbasin-17</i>				

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (hr)
<i>Subbasin-21</i>	1810.1	158.16233	200.3816053	20.35
<i>Subbasin-22</i>	2587.1	135.98762	238.0158304	24.56
<i>Subbasin-23</i>	3782.5	291.70770	244.2842909	15.71
<i>Subbasin-24</i>	2281.9	167.75744	218.1488977	20.60
<i>Subbasin-25</i>	2493.7	210.99448	217.5842002	17.90
<i>Subbasin-26</i>	848.79	78.10025	165.6168461	28.02
<i>Subbasin-27</i>	1994.6	135.49715	214.0721025	23.19
<i>Subbasin-28</i>	2088.5	126.07260	220.8380653	24.65
<i>Subbasin-29</i>	1188.5	74.58016	191.624494	31.26
<i>Subbasin-30</i>	594.19	62.18035	148.7427028	30.28
<i>Subbasin-31</i>	293.99	46.74390	117.0066179	31.45
<i>Subbasin-32</i>	275.28	47.76665	113.4759206	30.51
<i>Subbasin-33</i>	584.15	63.40088	147.2197633	29.75
<i>Subbasin-34</i>	1048.2	87.88811	176.9951231	27.08
<i>Subbasin-35</i>	1091.9	120.71389	170.5310873	21.89
<i>Subbasin-37</i>	73.596	23.68464	74.439	36.80
<i>Subbasin-38</i>	855.95	64.08801	171.8696159	32.24
<i>Subbasin-39</i>	1503.7	93.84418	202.9430397	28.10
<i>Subbasin-40</i>	357.01	59.42620	121.63821	27.80
<i>Subbasin-41</i>	60.530	17.75384	72.157	43.05
<i>Subbasin-42</i>	654.71	71.05256	151.3069382	28.20
<i>Subbasin-43</i>	995.71	69.18245	180.5021937	31.64
<i>Subbasin-44</i>	290.59	44.24235	117.5438465	32.59
<i>Subbasin-45</i>	1034.9	84.42970	177.2766207	27.77
<i>Subbasin-46</i>	106.68	19.15193	89.864	46.51
<i>Subbasin-47</i>	802.80	52.33400	173.2778572	36.61
<i>Subbasin-48</i>	2939.5	122.05779	255.4602323	27.27

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (
<i>Subbasin-53</i>	1042.5	63.92160	186.4225334	33.
<i>Subbasin-54</i>	43.040	13.44085	65.781	48.
<i>Subbasin-55</i>	0.2522	0.98273	12.475	92.
<i>Subbasin-56</i>	1179.5	97.50592	182.5190535	25.
<i>Subbasin-57</i>	2371.8	138.38362	229.0049803	23.
<i>Subbasin-58</i>	151.29	32.86789	94.606	34.
<i>Subbasin-59</i>	369.44	47.72688	128.0414564	32.
<i>Subbasin-60</i>	406.99	42.48198	135.8882303	36.
<i>Subbasin-61</i>	330.32	50.70009	121.0484214	30.
<i>Subbasin-62</i>	242.58	36.69795	112.6804979	35.

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 17 – Parâmetros de entrada do método *Recession* para a porção  
bacia do rio Doce

Sub-bacia	<i>Initial Discharge</i> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	<i>Recession Constant</i>	<i>Ratio to Peak</i>
<i>Subbasin-1</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-2</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-3</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-4</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-5</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-6</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-7</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-8</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-9</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-10</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-11</i>	0	0.8	0.5

<i>Sub-bacia</i>	Initial Discharge (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Recession Constant	Ratio to Peak
<i>Subbasin-15</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-16</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-17</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-18</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-19</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-20</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-21</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-22</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-23</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-24</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-25</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-26</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-27</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-28</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-29</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-30</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-31</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-32</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-33</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-34</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-35</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-37</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-38</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-39</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-40</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-41</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-42</i>	0	0.8	0.5

<i>Sub-bacia</i>	Initial Discharge (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Recession Constant	Ratio to Peak
<i>Subbasin-46</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-47</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-48</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-49</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-50</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-51</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-52</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-53</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-54</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-55</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-56</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-57</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-58</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-59</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-60</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-61</i>	0	0.8	0.5
<i>Subbasin-62</i>	0	0.8	0.5

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 18 – Parâmetros de entrada do método *Muskingum-Cunge* para a  
mineira da bacia do rio Doce

Trecho	<i>Length (m)</i>	<i>Slope (m/m)</i>	<i>Manning's n</i>	<i>Index Celer (m<sup>3</sup>/s)</i>
<i>Reach-1</i>	208.96	0.00001	0.025	1.5
<i>Reach-2</i>	9351.06	0.00075	0.025	1.5
<i>Reach-3</i>	38021.23	0.00071	0.025	1.5
<i>Reach-4</i>	9832.05	0.00092	0.025	1.5

Trecho	Length (m)	Slope (m/m)	Manning's n	Index Celerity (m <sup>3</sup> /s)	V
Reach-8	43128.88	0.00044	0.025	1.5	3
Reach-9	40238.75	0.00057	0.025	1.5	1
Reach-10	9304.08	0.00021	0.025	1.5	2
Reach-11	42275.24	0.00064	0.025	1.5	2
Reach-12	51195.07	0.00045	0.025	1.5	1
Reach-13	38511.74	0.00044	0.025	1.5	2
Reach-14	24946.46	0.00072	0.025	1.5	2
Reach-15	19157.49	0.00068	0.025	1.5	2
Reach-16	39554.13	0.00056	0.025	1.5	1
Reach-17	52710.84	0.00157	0.025	1.5	1
Reach-18	69240.87	0.00123	0.025	1.5	2
Reach-19	57725.42	0.00111	0.025	1.5	1
Reach-20	74210.02	0.00172	0.025	1.5	2
Reach-21	94141.38	0.0022	0.025	1.5	1
Reach-22	57117.63	0.00119	0.025	1.5	1
Reach-23	47924.1	0.00217	0.025	1.5	1
Reach-24	29578.46	0.00118	0.025	1.5	1
Reach-25	30598.9	0.00046	0.025	1.5	1
Reach-26	58951.31	0.00051	0.025	1.5	1
Reach-27	110389.86	0.00293	0.025	1.5	1
Reach-28	66477.09	0.00131	0.025	1.5	1
Reach-29	2763.77	0.00072	0.025	1.5	1
Reach-30	17601.04	0.00068	0.025	1.5	2
Reach-31	24262.51	0.00058	0.025	1.5	2
Reach-32	21.11	0.00001	0.025	1.5	2
Reach-33	24996.8	0.00132	0.025	1.5	1
Reach-34	177.61	0.00563	0.025	1.5	

**APÊNDICE C – PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A PORÇÃO MI  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**

Tabela 19 – Parâmetros de entrada do método *Deficit and Constant* para a sub-bacia mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	<i>Initial Deficit</i> (mm)	<i>Maximum Storage</i> (mm)	<i>Constant Rate</i> (mm/hr)	<i>Imp</i>
<i>Subbasin-1</i>	10	100	1	35
<i>Subbasin-2</i>	10	100	1	1
<i>Subbasin-3</i>	10	100	1	40
<i>Subbasin-4</i>	10	100	1	40
<i>Subbasin-5</i>	10	100	1	30
<i>Subbasin-6</i>	10	100	1	25
<i>Subbasin-7</i>	10	100	1	2
<i>Subbasin-8</i>	10	100	1	30
<i>Subbasin-9</i>	10	100	1	30
<i>Subbasin-10</i>	10	100	1	25
<i>Subbasin-11</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-12</i>	10	100	1	65
<i>Subbasin-13</i>	10	100	1	40
<i>Subbasin-14</i>	10	100	1	0
<i>Subbasin-15</i>	10	100	1	10
<i>Subbasin-16</i>	10	100	1	2
<i>Subbasin-17</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-18</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-19</i>	10	100	1	25
<i>Subbasin-20</i>	10	100	1	1
<i>Subbasin-21</i>	10	100	1	30
<i>Subbasin-22</i>	10	100	1	5



<i>Sub-bacia</i>	Initial Deficit (mm)	Maximum Storage (mm)	Constant Rate (mm/hr)	<i>Impervio</i>
<i>Subbasin-26</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-27</i>	10	100	1	30
<i>Subbasin-28</i>	10	100	1	15
<i>Subbasin-29</i>	10	100	1	10
<i>Subbasin-30</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-31</i>	10	100	1	10
<i>Subbasin-32</i>	10	100	1	65
<i>Subbasin-33</i>	10	100	1	5
<i>Subbasin-34</i>	10	100	1	10
<i>Subbasin-35</i>	10	100	1	25
<i>Subbasin-36</i>	10	100	1	30

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 20 – Parâmetros de entrada do método *Clark Unit Hydrograph* para a p  
mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (hr)
<i>Subbasin-1</i>	3473.8	147.00625	265.0514621	24.88
<i>Subbasin-2</i>	4328.4	165.85986	284.1747763	24.05
<i>Subbasin-3</i>	3609.6	159.77241	265.466813	23.68
<i>Subbasin-4</i>	11049.9	360.22671	365.7685286	17.34
<i>Subbasin-5</i>	3522.6	143.03243	267.8165526	25.45
<i>Subbasin-6</i>	3265.9	165.30680	253.3255985	22.60
<i>Subbasin-7</i>	4303.7	210.47830	272.2558924	20.33
<i>Subbasin-8</i>	4273.4	178.77510	279.1079946	22.76
<i>Subbasin-9</i>	4682.8	137.24314	303.0966999	27.97
<i>Subbasin-10</i>	9577.2	226.10208	373.3561858	23.24

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	TC (hr)	S (
<i>Subbasin-14</i>	2254.9	162.28825	218.3135552	21.
<i>Subbasin-15</i>	12887.4	510.91638	367.1095003	14.
<i>Subbasin-16</i>	13360.0	296.93129	408.579386	20.
<i>Subbasin-17</i>	15438.4	369.65900	417.684191	18.
<i>Subbasin-18</i>	14966.9	506.74995	390.8736979	14.
<i>Subbasin-19</i>	6506.1	248.55199	313.536342	19.
<i>Subbasin-20</i>	3728.4	140.78829	274.862335	26.
<i>Subbasin-21</i>	12174	327.09653	386.8833683	18.
<i>Subbasin-22</i>	3799.7	177.54428	266.2946233	22.
<i>Subbasin-23</i>	5006.9	256.37079	280.1321289	18.
<i>Subbasin-24</i>	2569.3	122.88067	241.4677779	26.
<i>Subbasin-25</i>	5419.4	164.42063	312.071954	25.
<i>Subbasin-26</i>	2541.8	123.50788	240.1967839	26.
<i>Subbasin-27</i>	3476.7	145.56939	265.585259	25.
<i>Subbasin-28</i>	5805.4	205.57852	309.038284	22.
<i>Subbasin-29</i>	3173.0	136.93580	258.4890537	25.
<i>Subbasin-30</i>	2324.8	111.17157	235.7471639	27.
<i>Subbasin-31</i>	2479.1	108.46480	243.0573603	28.
<i>Subbasin-32</i>	5503.3	322.28186	280.0933051	15.
<i>Subbasin-33</i>	4981.0	191.64256	293.7132007	22.
<i>Subbasin-34</i>	9322.7	196.58764	378.141953	25.
<i>Subbasin-35</i>	3926.0	142.93805	280.0217747	26.
<i>Subbasin-36</i>	10857	234.88120	390.5207795	23.

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 21 – Parâmetros de entrada do método *Recession* para a porção mineira da bacia do rio São Francisco

Sub-bacia	<i>Initial Discharge</i> ( $m^3/s/km^2$ )	<i>Recession Constant</i>	<i>Ratio to Peak</i>
<i>Subbasin-1</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-2</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-3</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-4</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-5</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-6</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-7</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-8</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-9</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-10</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-11</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-12</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-13</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-14</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-15</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-16</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-17</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-18</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-19</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-20</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-21</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-22</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-23</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-24</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-25</i>			

Sub-bacia	<i>Initial Discharge</i> ( $m^3/s/km^2$ )	<i>Recession Constant</i>	<i>Ratio to Peak</i>
<i>Subbasin-28</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-29</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-30</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-31</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-32</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-33</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-34</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-35</i>	0	0.8	0.8
<i>Subbasin-36</i>	0	0.8	0.8

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 22 – Parâmetros de entrada do método *Muskingum-Cunge* para a sub-bacia mineira da bacia do rio São Francisco

Trecho	<i>Length (m)</i>	<i>Slope (m/m)</i>	<i>Manning's n</i>	<i>Index Celerity</i> ( $m^3/s$ )
<i>Reach-1</i>	158.14022	0.00008	0.025	1.5
<i>Reach-2</i>	90.88431	0.00009	0.025	1.5
<i>Reach-3</i>	64.98758	0.00008	0.025	1.5
<i>Reach-4</i>	31.78721	0.00013	0.025	1.5
<i>Reach-5</i>	46.50696	0.00009	0.025	1.5
<i>Reach-6</i>	27.78229	0.00018	0.025	1.5
<i>Reach-7</i>	142.00494	0.00021	0.025	1.5
<i>Reach-8</i>	126.01883	0.00045	0.025	1.5
<i>Reach-9</i>	114.68646	0.00016	0.025	1.5
<i>Reach-10</i>	268.78909	0.00021	0.025	1.5
<i>Reach-11</i>	103.16721	0.00016	0.025	1.5

<i>Trecho</i>	Length (m)	Slope (m/m)	Manning's n	Index Celerity (m <sup>3</sup> /s)	W (m)
<i>Reach-15</i>	53.83727	0.00017	0.025	1.5	23
<i>Reach-16</i>	104.71859	0.00018	0.025	1.5	10
<i>Reach-17</i>	4.91350	0.00020	0.025	1.5	17
<i>Reach-18</i>	104.55461	0.00034	0.025	1.5	20
<i>Reach-19</i>	39.36021	0.00028	0.025	1.5	15
<i>Reach-20</i>	74.26196	0.00018	0.025	1.5	10
<i>Reach-21</i>	31.52337	0.00006	0.025	1.5	29
<i>Reach-22</i>	12.20259	0.00001	0.025	1.5	38
<i>Reach-23</i>	32.14247	0.00012	0.025	1.5	55
<i>Reach-24</i>	51.21881	0.00008	0.025	1.5	45
<i>Reach-25</i>	133.16565	0.00008	0.025	1.5	60
<i>Reach-26</i>	30.81678	0.00016	0.025	1.5	10
<i>Reach-27</i>	79.06439	0.00016	0.025	1.5	18
<i>Reach-28</i>	77.86121	0.00013	0.025	1.5	19
<i>Reach-29</i>	68.74604	0.00013	0.025	1.5	11
<i>Reach-30</i>	153.67218	0.00026	0.025	1.5	11

Fonte: elaborado pela autora.