

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – DEC**

**GIULIANA CRISTOFOLINI DOS SANTOS**

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS A PARTIR DE  
DADOS DE VAZÃO GERADOS POR MODELO HIDRODINÂMICO-HIDROLÓGICO  
ACOPLADO**

**JOINVILLE**

**2024**

**GIULIANA CRISTOFOLINI DOS SANTOS**

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS A PARTIR DE  
DADOS DE VAZÃO GERADOS POR MODELO HIDRODINÂMICO-HIDROLÓGICO  
ACOPLADO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Leonardo Romero Monteiro

Coorientador: Eng. João Luiz da Rocha Borin

**JOINVILLE**

**2024**

**GIULIANA CRISTOFOLINI DOS SANTOS**

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS A PARTIR DE  
DADOS DE VAZÃO GERADOS POR MODELO HIDRODINÂMICO-HIDROLÓGICO  
ACOPLADO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Leonardo Romero Monteiro

Coorientador: Eng. João Luiz da Rocha Borin

**BANCA EXAMINADORA:**

Professor Dr. Leonardo Romero Monteiro  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Professor Dr. Leonardo Romero Monteiro  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Professor Dr. João Marcos Bosi Mendonça de Moura  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Professora Dra. Franciele Maria Vanelli  
Pesquisadora do CNPq

Joinville, 31 de outubro de 2024

Aos meus pais, Marli e Juarez, aos demais  
membros da minha família, ao meu namorado,  
aos meus amigos e, principalmente, aos  
professores que me encorajaram nessa jornada!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Leonardo Romero Monteiro, por ter aceitado esse desafio comigo e por ter me auxiliado não só no meu trabalho de conclusão de curso, mas também desde quando eu estava na metade da graduação trilhando meu caminho por projetos de monitoria, ensino e pesquisa. Além dos eventos e seminários participados cooperativamente. É imensurável a minha gratidão.

Ao meu coorientador, João Luiz da Rocha Borin, por me guiar e agregar na minha pesquisa através de seus conselhos e, principalmente, contribuir na coleta de dados. Gostaria de agradecer também a todos do LaCia, que me deram suporte e acolhimento durante o período em que fui bolsista e posteriormente a isso. Além disso, vale ressaltar um agradecimento especial à minha banca, por ter aceitado avaliar meu desempenho com toda a expertise nessa área incrível que é a de recursos hídricos.

Ao meu namorado, Yago Chede Collaço, que desde 2023 me apoiou sempre, mesmo à distância, esteve mais presente do que eu poderia imaginar e me deu o conforto nos momentos em que precisava. Sou imensamente grata por tê-lo encontrado nesse momento tão crucial de minha formação.

À minha família, principalmente aos meus pais, Marli e Juarez, por terem me ajudado a me manter até o fim, por todo o apoio que me deram em geral, o conforto que me proporcionaram, emocional e financeiro. Aos meus primos e tios que também acompanharam essa jornada nos últimos anos e me apoiaram.

Aos amigos que participaram da minha jornada na UDESC, especialmente, à Nicole e Luiz e aos "Parças": Matheus, Dafne, Luiza, Anice, Nátalie e Pedro. Certamente, tornaram minha experiência mais leve, além da ótima parceria ao longo de todos esses anos. Às demais amizades que criei durante este curso, tanto no período de pandemia, quando fora dele.

Um obrigada, em particular, ao pessoal que conheci na Atrium Engenharia Júnior que me fez dar boas risadas e passar ótimos momentos de desenvolvimento pessoal para o mercado de trabalho, se me senti mais confiante para este fim, com certeza, tudo começou ali. Ao MEJ, que sempre me motivou e me instigou a acreditar em um Brasil melhor no futuro, diluindo minhas preocupações.

Por fim, gostaria de agradecer a todo o corpo docente da UDESC, sinto que neste lugar pude aprender muito mais do que as matérias, mas também sobre resiliência e persistência na busca em dar o meu melhor na medida do possível.

## RESUMO

Em Joinville, desastres frequentemente causam perdas econômicas e humanas, sendo as inundações um exemplo proeminente disso. A calibração e validação de modelos hidrológicos a partir de dados de vazão gerados por modelo hidrodinâmico-hidrológico acoplado, resultam hidrogramas que podem ser analisados por meio de comparações. Esse é um processo que possibilita estudos para aperfeiçoar os parâmetros numéricos utilizados na análise destes fenômenos. O presente estudo teve como objetivo comparar hidrogramas criados por modelagem hidrodinâmica-hidrológica acoplada (MHHA) e hidrológica concentrada numa região de sub-bacias do Rio Cachoeira onde não há interferência da maré na vazão do rio. Para isso, foram coletados os dados de vazão em campo para estimar o escoamento base e, a partir de dados de chuva observados, foram simulados três eventos de chuva com o MHHA, o qual foi validado com os níveis observados próximos do exutório da bacia hidrográfica estudada. Os hidrogramas gerados na modelagem hidrodinâmica foram utilizados como dados de referência para os modelos hidrológicos concentrados, que, por falta de curva-chave, não podem ser calibrados e nem validados diretamente com dados de nível no HEC-RAS, mas sim no HEC-HMS. A análise envolveu diferentes parâmetros matemáticos em cada *software*, permitindo avaliar o desempenho de cada modelo por meio do processo de calibração e validação. O MHHA foi capaz de obter dados de vazão com precisão a partir de dados de chuva e nível, gerando hidrogramas válidos para calibrar e validar os modelos com o intuito de identificar o mais eficaz. Notou-se que, comparando as análises das simulações do MHHA e modelo hidrológico por sistema de bacias concentradas, os resultados foram mais assertivos do que para um modelo hidrológico de bacia concentrada única. A desvantagem do MHHA foi o tempo de simulação na grandeza de horas, enquanto o modelo hidrológico concentrado levava segundos, não considerando o seu processo de calibração. Com os resultados, inferiu-se que o comportamento hidrológico, na área de estudo da bacia do rio Cachoeira, possui um baixo coeficiente de armazenamento e uma alta impermeabilidade, onde as condições de infiltração são significativamente reduzidas.

**Palavras-chave:** Rio Cachoeira. Modelagem Hidrológica. Modelagem Hidrodinâmica. Hidrograma. Bacia hidrográfica.

## ABSTRACT

In Joinville, disasters frequently result in significant economic and human losses, with floods representing a prominent example. The calibration and validation of hydrological models using flow data generated by a coupled hydrodynamic-hydrological model (CHHM) produce hydrographs that can be analyzed through comparative assessments. This process facilitates the refinement of numerical parameters applied in the analysis of such phenomena.

The present study aimed to compare hydrographs generated by coupled hydrodynamic-hydrological modeling (CHHM) and lumped hydrological modeling in a sub-basin region of the Cachoeira River, where tidal influence on river flow is absent. Field measurements of discharge were collected to estimate baseflow, and three rainfall events were simulated using the CHHM based on observed precipitation data. The model was validated using observed water levels near the basin's outlet. Hydrographs produced through hydrodynamic modeling served as reference data for the lumped hydrological models, which, due to the absence of a rating curve, could not be directly calibrated or validated using water level data in HEC-RAS but were processed in HEC-HMS. The analysis involved evaluating various mathematical parameters within each software, thus enabling performance assessments through calibration and validation processes.

The CHHM accurately derived flow data from rainfall and water level inputs, generating valid hydrographs to calibrate and validate models, thereby identifying the most effective approach. Comparative analyses between CHHM simulations and lumped hydrological basin systems indicated that the results were more accurate than those obtained from a single-basin hydrological model. However, a noted drawback of the CHHM was its computational time, measured in hours, whereas the lumped hydrological model required mere seconds, excluding calibration processes.

Based on the findings, it was inferred that the hydrological behavior within the study area of the Cachoeira River basin exhibits low storage coefficients and high impermeability, significantly limiting infiltration conditions.

**Keywords:** Cachoeira River. Hydrological Modeling. Hydrodynamic Modeling. Hydrograph. Watershed.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de uma bacia hidrográfica . . . . .	17
Figura 2 – Características do hidrograma. . . . .	21
Figura 3 – Discretização de bacias. a- representa um modelo concentrado, b- representa um modelo concentrado, mas dividido em sub-bacias, e c- representa um modelo distribuído por malha. . . . .	23
Figura 4 – Características de um hidrograma unitário. . . . .	25
Figura 5 – Esquema metodológico do presente trabalho. . . . .	29
Figura 6 – Mapa da área de estudo. À direita a relação do Brasil, Santa Catarina e Município de Joinville de baixo para cima. À esquerda uma representação do local do exutório posicionado no local da estação meteorológica. . . . .	31
Figura 7 – Mapa de localização da Bacia de estudo. . . . .	33
Figura 8 – Etapas para estudo e modelagem hidrodinâmica-hidrológica acoplada. . . .	35
Figura 9 – Esquema das simulações. . . . .	38
Figura 10 – Etapas para estudo e modelagem hidrológica. . . . .	42
Figura 11 – Dados das séries históricas de precipitação. . . . .	47
Figura 12 – Mapa Pedológico. . . . .	48
Figura 13 – Mapa de uso do solo. . . . .	49
Figura 14 – Mapa de determinação das nascentes. . . . .	50
Figura 15 – Representação gráfica do Evento 1. Na esquerda superior apresenta-se o Evento 1.1; na direita superior é apresentado o Evento 1.2; na esquerda inferior mostra-se o Evento 1.3; e na direita inferior é mostrado o Evento 1.4. . . . .	56
Figura 16 – Representação gráfica do Evento 2. Na esquerda superior apresenta-se o Evento 2.1; na direita superior é apresentado o Evento 2.2; na esquerda inferior mostra-se o Evento 2.3; e na direita inferior é mostrado o Evento 2.4. . . . .	58
Figura 17 – Representação gráfica do Evento 3. Na esquerda superior apresenta-se o Evento 3.1; na direita superior é apresentado o Evento 3.2; na esquerda inferior mostra-se o Evento 3.3; e na direita inferior é mostrado o Evento 3.4. . . . .	61
Figura 18 – Mapa de sub-bacias. . . . .	64
Figura 19 – Resultado da calibração do modelo no exutório para o Evento 1. . . . .	66
Figura 20 – Vazão de saída acumulada da calibração. . . . .	66
Figura 21 – Resultado da validação do modelo no exutório para o Evento 2. . . . .	67
Figura 22 – Vazão de saída acumulada da validação do evento 2. . . . .	67
Figura 23 – Resultado da validação do modelo no exutório para o Evento 3. . . . .	68
Figura 24 – Vazão de saída acumulada na validação do evento 3. . . . .	69
Figura 25 – Mapa da Bacia concentrada. . . . .	70
Figura 26 – Resultado do modelo concentrado. . . . .	71
Figura 27 – Plotagem da seção transversal do rio no exutório. . . . .	92



Figura 28 – Visualização da seção transversal do rio no exutório em campo. . . . .	93
--	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equações de tempo de concentração. . . . .	19
Quadro 2 – Dados dos prejuízos contabilizados em Joinville. . . . .	30
Quadro 3 – Referência dos dados coletados ou processados. . . . .	32
Quadro 4 – Informações sobre os dados de campo. . . . .	34
Quadro 5 – Informações sobre as condições e configurações para o modelo. . . . .	36
Quadro 6 – Coeficientes de Manning por Tipo de Cobertura do Solo (Método NLCD). . . . .	37
Quadro 7 – Configurações do sistema para as condições iniciais dos eventos. . . . .	39
Quadro 8 – Configurações do sistema para cada evento do escoamento não permanente. . . . .	40
Quadro 9 – Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras. . . . .	44
Quadro 10 – Cobertura do solo e condição hidrológica por grupo de solo. . . . .	45
Quadro 11 – Resumo das simulações. . . . .	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidades mínimas recomendadas para incidência de estações pluviométricas.	20
Tabela 2 – Dados de posicionamento da estação. . . . .	34
Tabela 3 – Coeficientes de Manning e de CN. . . . .	48
Tabela 4 – Dados de infiltração. . . . .	49
Tabela 5 – Declividades. . . . .	51
Tabela 6 – Vazão média das medições em dias sem chuva. . . . .	51
Tabela 7 – Lâminas d’água máximas para cada evento. . . . .	52
Tabela 8 – Níveis mínimos e máximos do rio para cada evento. . . . .	52
Tabela 9 – Alturas arbitradas para ajustes da simulação. . . . .	53
Tabela 10 – Dados de níveis d’água do Evento 1. . . . .	55
Tabela 11 – Verificação do erro para a simulação do Evento 1. . . . .	55
Tabela 12 – Dados de níveis d’água do Evento 2. . . . .	57
Tabela 13 – Verificação do erro para a simulação do Evento 2. . . . .	57
Tabela 14 – Dados de níveis d’água do Evento 3. . . . .	60
Tabela 15 – Verificação do erro para a simulação do Evento 3. . . . .	60
Tabela 16 – Características de Sub-bacias. . . . .	63
Tabela 17 – Tabela de tempo de concentração e coeficientes de armazenamento das sub-bacias. . . . .	63
Tabela 18 – Coeficiente de forma das sub-bacias. . . . .	64
Tabela 19 – <i>Initial abstraction</i> otimizada. . . . .	66
Tabela 20 – Coeficiente de forma da bacia concentrada. . . . .	69
Tabela 21 – Parâmetros da sub-bacia concentrada. . . . .	71
Tabela 22 – Resumo dos resultados. . . . .	72
Tabela 23 – Dados do Evento 1. <b>(CONTINUAÇÃO)</b> . . . . .	83
Tabela 3.1 – Dados do Evento 1. <b>(CONTINUAÇÃO)</b> . . . . .	84
Tabela 3.1 – Dados do Evento 1. <b>(CONTINUAÇÃO)</b> . . . . .	85
Tabela 3.1 – Dados do Evento 1. <b>(CONCLUSÃO)</b> . . . . .	86
Tabela B.27–Dados do Evento 2. <b>(CONTINUAÇÃO)</b> . . . . .	87
Tabela 3.1 – Dados do Evento 2. <b>(CONTINUAÇÃO)</b> . . . . .	88
Tabela 3.1 – Dados do Evento 2. <b>(CONCLUSÃO)</b> . . . . .	89
Tabela 3.1 – Dados do Evento 3. <b>(CONTINUAÇÃO)</b> . . . . .	90
Tabela 3.1 – Dados do Evento 3. <b>(CONCLUSÃO)</b> . . . . .	91

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1	<b>JUSTIFICATIVA . . . . .</b>	<b>15</b>
1.2	<b>OBJETIVO GERAL . . . . .</b>	<b>16</b>
1.2.1	<b>Objetivos específicos . . . . .</b>	<b>16</b>
1.3	<b>SÍNTESE CAPITULAR . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>17</b>
2.1	<b>BACIA HIDROGRÁFICA . . . . .</b>	<b>17</b>
2.1.1	<b>Declividade média do rio e da bacia . . . . .</b>	<b>18</b>
2.1.2	<b>Forma da bacia . . . . .</b>	<b>18</b>
2.1.3	<b>Tempo de concentração . . . . .</b>	<b>18</b>
2.2	<b>PRECIPITAÇÃO . . . . .</b>	<b>19</b>
2.2.1	<b>Discretização Espacial . . . . .</b>	<b>20</b>
2.3	<b>HIDROGRAMA . . . . .</b>	<b>20</b>
2.4	<b>MODELAGEM HIDROLÓGICA . . . . .</b>	<b>21</b>
2.4.1	<b>Classificação dos modelos hidrológicos . . . . .</b>	<b>21</b>
2.4.1.1	<i>Determinístico × Estocástico . . . . .</i>	<i>22</i>
2.4.1.2	<i>Conceitual (fisicamente embasado) × Empírico . . . . .</i>	<i>22</i>
2.4.1.3	<i>Discreto × Contínuo . . . . .</i>	<i>22</i>
2.4.1.4	<i>Concentrado × Semi-distribuído × Distribuído . . . . .</i>	<i>22</i>
2.4.2	<b>Modelo Chuva-Vazão . . . . .</b>	<b>23</b>
2.4.3	<b>Perdas de precipitação . . . . .</b>	<b>24</b>
2.4.4	<b>Hidrograma unitário . . . . .</b>	<b>24</b>
2.4.5	<b>Escoamento de base . . . . .</b>	<b>24</b>
2.5	<b>MODELAGEM HIDRODINÂMICA . . . . .</b>	<b>25</b>
2.5.1	<b>Modelo Hidrodinâmico-hidrológico acoplado . . . . .</b>	<b>25</b>
2.5.2	<b>Escoamento Permanente × Escoamento Não Permanente . . . . .</b>	<b>26</b>
2.5.3	<b>Verificações . . . . .</b>	<b>26</b>
2.5.3.1	<i>Calibração e otimização de Modelos . . . . .</i>	<i>26</i>
2.5.3.2	<i>Validação de Modelos . . . . .</i>	<i>27</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1	<b>JOINVILLE . . . . .</b>	<b>29</b>
3.2	<b>ÁREA DE ESTUDO . . . . .</b>	<b>30</b>
3.2.1	<b>Obtenção de dados da área de estudo . . . . .</b>	<b>31</b>
3.3	<b>BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA . . . . .</b>	<b>32</b>
3.3.1	<b>Características físicas da bacia hidrográfica . . . . .</b>	<b>33</b>

3.4	VAZÕES DE BASE . . . . .	34
3.5	PRECIPITAÇÃO E NÍVEIS . . . . .	34
3.6	MODELAGEM HIDRODINÂMICA-HIDROLÓGICA ACOPLADA . . . .	34
3.6.1	<b>Criação da geometria e aplicação da rugosidade . . . . .</b>	<b>36</b>
3.6.2	<b>Simulação de escoamento não permanente . . . . .</b>	<b>38</b>
3.6.3	<b>Validação . . . . .</b>	<b>39</b>
3.7	MODELAGEM HIDROLÓGICA . . . . .	41
3.7.1	<b>Discretização espacial . . . . .</b>	<b>41</b>
3.7.2	<b>Tempo de concentração e Coeficiente de armazenamento . . . . .</b>	<b>42</b>
3.7.3	<b>Modelo Chuva-Vazão . . . . .</b>	<b>43</b>
3.7.3.1	<i>Perdas de precipitação . . . . .</i>	<i>43</i>
3.7.3.2	<i>Tempo de propagação de onda de cheias . . . . .</i>	<i>45</i>
3.7.3.3	<i>Transformada em escoamento superficial . . . . .</i>	<i>45</i>
3.7.3.4	<i>Escoamento de base . . . . .</i>	<i>46</i>
3.7.4	<b>Validação e Calibração . . . . .</b>	<b>46</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>47</b>
4.1	PARÂMETROS GERAIS . . . . .	47
4.1.1	<b>Dados pedológicos . . . . .</b>	<b>47</b>
4.1.2	<b>Uso do solo: número de Manning e CN . . . . .</b>	<b>48</b>
4.1.3	<b>Perdas de precipitação . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1.4	<b>Declividades . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1.4.1	<i>Vazão de base . . . . .</i>	<i>50</i>
4.1.4.2	<i>Condições Meteorológicas . . . . .</i>	<i>51</i>
4.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA-HIDROLÓGICA ACOPLADA . . . .	52
4.2.1	<b>Simulação de escoamento não permanente . . . . .</b>	<b>52</b>
4.2.1.1	<i>Evento 1 . . . . .</i>	<i>54</i>
4.2.1.2	<i>Evento 2 . . . . .</i>	<i>57</i>
4.2.1.3	<i>Evento 3 . . . . .</i>	<i>59</i>
4.2.1.4	<i>Análise geral das simulações hidrodinâmicas . . . . .</i>	<i>62</i>
4.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA: SISTEMA DE MODELOS CONCEN- TRADOS . . . . .	62
4.3.0.1	<i>Calibração: Evento 1 . . . . .</i>	<i>65</i>
4.3.0.2	<i>Análise da validação do Evento 2 . . . . .</i>	<i>67</i>
4.3.0.3	<i>Análise da validação do Evento 3 . . . . .</i>	<i>68</i>
4.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA: BACIA ÚNICA . . . . .	69
5	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>76</b>

	<b>APÊNDICE A – EVENTO 1 . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B – EVENTO 2 . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE C – EVENTO 3 . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>D</b>	<b>– PRINCIPAIS DIFICULDADES . . . . .</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A relação das cidades com os desastres socionaturais é tão antiga quanto as cidades em si, entretanto as perdas econômicas resultantes dessas catástrofes aumentaram, com grande variabilidade espacial e interanual (IFRC; UNDP, 2014). Uma maior exposição das pessoas foi identificada como uma das causas dos aumentos a longo prazo nas perdas econômicas provenientes de desastres relacionados ao clima, de acordo com os mesmos autores. Para Siebert (2017), as áreas urbanas, com suas complexas regiões industriais, são reconhecidas como corresponsáveis pelo fenômeno do aquecimento global, um dos principais impulsionadores das mudanças climáticas. Além disso, os autores trazem que também essas regiões sofrem diretamente com as consequências adversas desses eventos climáticos extremos.

Em virtude das alterações no ciclo hidrológico induzidas pelo aquecimento global, além das mudanças no uso e ocupação do solo (Brêda et al., 2020), observa-se nas cidades brasileiras uma manifestação acentuada dos desastres já recorrentes, como inundações, deslizamentos de terra, ondas de calor e escassez de recursos hídricos potáveis, segundo PBMC (2016). A mesma fonte também descreve que tais eventos climáticos têm o potencial de desencadear efeitos em cascata na infraestrutura urbana, podendo afetar o abastecimento de água, o saneamento, a energia e o transporte. A fim de reduzir os impactos disso, utilizam-se modelos hidrológicos que permitem simular e prever o comportamento da bacia hidrográfica por meio da previsão de vazões e enchentes, do planejamento e uso do solo, e estimativas de disponibilidade hídrica (Pereira, 2013). Uma das formas de diminuir esses impactos, é através de modelos hidrodinâmicos que podem servir de complemento para gerenciar inundações em áreas urbanas, atenuar picos de cheias e prever enchentes (Ferraz, 2019).

Estudos mostram tendências de aumento na intensidade e na frequência de eventos de chuvas intensas em partes das regiões Sul e Sudeste do Brasil, o que aumenta a preocupação em relação aos eventos extremos e sua consequência na vida das pessoas (Cavalcanti, 2016). Para Silveira et al. (2009), historicamente, a parte urbanizada de Joinville enfrenta problemas relacionados às inundações desde sua fundação em 1851. Os danos associados a isso intensificaram-se devido ao crescimento populacional e à expansão urbana em áreas suscetíveis a este fenômeno (Silveira et al., 2009). No município, foi noticiado pelo menos um evento de inundação por ano entre os anos de 2009 a 2019, de acordo com Smagalla et al. (2020).

Nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2024, foram registrados, no município, 98 mm de chuva em apenas 3 horas, e 148 mm em 24 horas, de acordo com a estação Itinga, do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Conforme os dados da Defesa Civil de Joinville (2024), contabilizaram-se dezenas de ocorrências de alagamentos e inundações em residências, devido à sobrecarga no sistema de drenagem urbana e ao transbordamento dos rios que cortam a área urbana. Em muitas casas, o nível da água chegou a cerca de 1 metro de altura. Como consequência direta do desastre, 50 pessoas desocuparam suas residências, embora não tenham precisado de abrigo público, e cerca de 45.000 pessoas foram afetadas diretamente

pelo evento (Defesa Civil de Joinville, 2024).

De acordo com Koehntopp et al. (2012), devido às características fisiográficas e climatológicas do município de Joinville de ocorrer inundações, combinados com a falta de um planejamento urbano integrado às variáveis climáticas e às zonas de risco de ocupação, podem debilitar a população local diante dessa questão. Os autores comentam que outro fator que intensifica este problema é a prática, dos governos, de lidar com questões geralmente pontuais e localizadas, sem considerá-las em seu contexto temporal e espacial. Os autores, ainda, complementam que essa fragilidade sugere a necessidade de ações imediatas por parte dos setores público, privado e da sociedade civil, visando à redução desse risco.

Segundo Smagalla et al. (2020), a frequência das inundações se dá principalmente pela influência de maré alta na cidade. Desse modo, o conhecimento sobre os desastres ocorridos no município ao longo da história contribui para a criação de medidas estruturais e não-estruturais para evitar o risco de desastres e ainda minimizar os danos causados (Smagalla et al., 2020).

Para aperfeiçoar as medidas propostas para a redução de risco de desastres, é fundamental que estas sejam baseadas em informações confiáveis. A obtenção destas informações é realizada muitas vezes por pesquisas de campo e, de forma frequente nos últimos anos, a partir de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos (Fagundes, 2018). Nesse sentido, é essencial a aplicação para cada caso em específico da melhor metodologia de simulação hidrológica e hidrodinâmica possível, para o caso estudado.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista o contexto abordado, vale destacar o posicionamento de Tucci (1998), que menciona que os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos são ferramentas utilizadas para melhor entender e representar o comportamento do escoamento em uma bacia hidrográfica, podendo prever condições diferentes das observadas.

A utilização do modelo é definida por características da bacia e dos processos envolvidos. Assim, ocorre a necessidade de se desenvolver diversos outros modelos que se diferenciam em função dos dados a serem inseridos, discretização espacial e temporal, prioridades da representação dos processos e objetivos a serem alcançados (Tucci, 1998). Entretanto, muitas vezes, os usuários utilizam estas ferramentas de forma mecânica, confiando exclusivamente nos algoritmos sem sua devida compreensão (Harari, 2013). Portanto, é importante estudar e comparar diferentes perspectivas na modelagem para identificar as melhores formas de utilizar estes programas.

Sendo assim, deve-se realizar um diagnóstico abrangente e atualizado dos problemas de inundação, baseado em informações confiáveis. Para isso, o estudo dos hidrogramas é essencial a fim de analisar o comportamento do escoamento ao longo do tempo, considerando as características hidrológicas da bacia. Isso permite uma compreensão mais profunda da situação e auxilia na formulação de estratégias eficazes para mitigar a ocorrência dos eventos extremos de



maneira viável (Vanelli, 2019).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo delineado no presente estudo é calibrar e validar modelos hidrológicos a partir de dados de vazão gerados por modelo hidrodinâmico-hidrológico acoplado, com o intuito de identificar o mais eficaz.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Obter as vazões de um exutório a partir da validação do modelo hidrodinâmico, com de dados de nível e chuva de estação meteorológica existente;
- Criar um hidrograma a partir dos dados de precipitação e nível através de um modelo hidrodinâmico-hidrológico acoplado;
- Avaliar a capacidade dos modelos hidrodinâmico-hidrológico acoplado, hidrológico concentrado em sub-bacias e hidrológico concentrado em bacia única em replicar o comportamento hidrológico da bacia para diferentes dados de precipitação;
- Investigar as diferenças nos parâmetros matemáticos adotados por cada *software*.

## 1.3 SÍNTESE CAPITULAR

Este trabalho divide-se em 5 capítulos. No primeiro capítulo, tem-se a introdução, onde aborda-se o problema da pesquisa, a justificativa, bem como os objetivos gerais e específicos e a presente síntese capitular.

O segundo capítulo trata-se da fundamentação conceitual dos principais termos que compõem a pesquisa, permeando bacias hidrográficas, hidrogramas e os tipos de modelagens utilizadas, contribuindo para o entendimento da questão apresentada e suas formas de resolução.

Já o capítulo III contém a metodologia para atingir o objeto da pesquisa, sendo apresentadas: a Bacia do Rio Cachoeira; as ferramentas metodológicas, e; os procedimentos de aplicação dos modelos, demonstrando as equações utilizadas e sua aplicação para as resoluções. Ainda neste capítulo, são apresentadas as hipóteses assumidas e as condições iniciais e de contorno.

No quarto capítulo, contém tanto detalhes da aplicação da metodologia quanto os resultados. Por fim, no quinto e último capítulo, apresentam-se a conclusão e os possíveis trabalhos futuros que podem ser originados a partir dessa pesquisa.

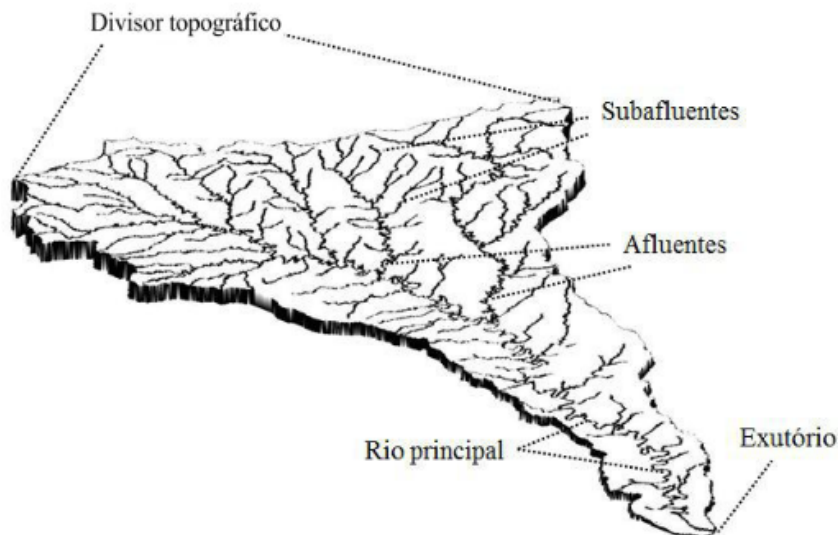
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente fundamentação conceitual aborda os principais aspectos referentes aos termos e expressões utilizados no texto para o qual o leitor deverá ter ciência de seus conceitos, visando à compreensão do presente trabalho.

### 2.1 BACIA HIDROGRÁFICA

De acordo com Tucci et al. (1993), a bacia hidrográfica pode ser compreendida como um sistema físico cuja entrada é o volume de água precipitado e, saída, o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evapotranspirados e também os infiltrados no solo. Para Teodoro et al. (2007), a classificação delas em grandes e pequenas não é vista somente na sua superfície total, mas considerando os efeitos de certos fatores dominantes na geração do deflúvio. Os autores comentam que as microbacias possuem características distintas por terem uma grande sensibilidade tanto às chuvas de alta intensidade e curta duração, quanto ao uso do solo. Do mesmo modo, pode-se dizer que a bacia hidrográfica é uma área de captação natural de água advinda da precipitação composta por um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um exutório, situado na foz (Tucci et al., 1993), como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de uma bacia hidrográfica



Fonte: Bernardi et al. (2012).

### 2.1.1 Declividade média do rio e da bacia

Para Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015), a declividade média de um rio é a relação entre a diferença de cotas e o comprimento do rio, conforme

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad (1)$$

sendo  $S$  é a declividade média do rio (m/m),  $H_{max}$  é a cota máxima (m),  $H_{min}$  é a cota mínima (m) e  $L$  é o comprimento do rio (m). Quanto maior a declividade de um terreno, maior a velocidade de escoamento, menor  $t_c$  e maior as perspectivas de picos de enchentes. A magnitude desses picos de enchente e a infiltração da água, dependem da declividade média da bacia, associada à cobertura vegetal, tipo de solo e tipo de uso da terra.

Para o cálculo da declividade média da bacia, divide-se a bacia em faixas de altitude e, a partir disso, faz-se uma ponderação da declividade individual de cada faixa com a área (Neto, 2017). Métodos numéricos a partir de dados matriciais podem ser utilizados para este cálculo, em que se calcula a declividade individual de cada célula matricial, e a declividade da bacia é a média de todas estas células, segundo Rosniecek e Imai (2013).

### 2.1.2 Forma da bacia

As características físicas, como a forma de uma bacia hidrográfica, possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico (Teodoro et al., 2007). Para medir a forma de uma bacia hidrográfica, encontra-se o Coeficiente de Compacidade (Equação 2),

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2)$$

onde  $K_c$  é o Índice de Compacidade,  $P$  é o perímetro de uma bacia e  $A$  é a área dela. Índices iguais a 1 representam bacias circulares e índices maiores do que 3 representam bacias alongadas. Valores menores de  $K_c$  indicam picos maiores de enchente, de acordo com Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015).

### 2.1.3 Tempo de concentração

De acordo com Chow et al. (1988), o tempo de concentração é o período necessário para que uma gota de chuva percorra a distância total desde o ponto mais distante da bacia hidrográfica até sua foz. Adicionalmente, o tempo de concentração não se refere apenas a um conceito, mas também um parâmetro relacionado à distância percorrida pela água e à velocidade de escoamento, conforme McCuen, Wong e Rawls (1984). Existem diversas equações que podem ser utilizadas para se determinar o tempo de concentração de acordo com as características da bacia, e alguns exemplos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Equações de tempo de concentração.

Nome	Equações	Observações
Kirpich (Adaptado de Mota e Kobiyama (2015) e Kirchner (2024))	$t_c = 9,67 \cdot 10^{-5} L^{0,798} S^{-0,399}$ , onde $t_c$ é o tempo de concentração, em horas, $L$ o comprimento da bacia medido ao longo do curso d'água a partir da exutória até o ponto mais elevado da bacia, em milhas, e $S$ a declividade do curso de água, calculado como $H/L$ , sendo adimensional.	Desenvolvida com dados de sete pequenas bacias rurais do Tennessee com declividades variando de 3 a 10% e áreas de, no máximo, $2,6 \text{ km}^2$ . Embora o tipo de informação que a fórmula necessite ( $L$ e $S$ ) seja uma indicação de que ela reflete o escoamento em canais, por ser para pequenas bacias, os parâmetros devem representar o escoamento em superfícies. Quando o valor de $L$ é superior a $10 \text{ km}$ , a fórmula parece subestimar o valor de $t_c$ .
Schaake (Jr; Geyer; Knapp, 1967)	$t_c = 0,0869 L^{0,24} S^{-0,16} A_{imp}^{-0,26}$ , onde $t_c$ é em horas, $L$ é o comprimento do talvegue, em km, e $A_i$ é a área impermeável da bacia, em $\text{km}^2$ .	Equação utilizada para bacias urbanas com área menor que $0,7 \text{ km}^2$ , declividade menor que 7% e comprimento do rio principal da sub-bacia era menor que $1,8 \text{ km}$ .
Chow et al. (1962)	$t_c = 0,160 L^{0,64} S^{-0,32}$ , onde $t_c$ é em horas, $L$ é o comprimento do rio principal em km e $S$ é a declividade do mesmo, sendo adimensional.	Esta equação se baseia em dados coletados de 20 bacias hidrográficas rurais e é recomendada para áreas variando entre $1,1$ e $19 \text{ km}^2$ .

Fonte: Complementado de Franco e Fill (2004).

## 2.2 PRECIPITAÇÃO

Em concordância com Pinto et al. (1976), compreende-se por precipitação o fenômeno em que as gotículas de água, formadas por condensação, atingem um tamanho suficiente para cair em forma de chuva. Os autores ainda comentam que, se essas gotículas atravessam zonas de temperatura abaixo de zero durante sua queda, podem se transformar em granizo. Além disso, eles abordam que, quando a condensação ocorre em temperaturas abaixo do ponto de congelamento, a precipitação acontece na forma de neve. Outrossim, se a condensação se verifica diretamente sobre uma superfície sólida, formam-se orvalho ou geada, dependendo se a temperatura está acima ou abaixo de zero grau centígrado, respectivamente (Pinto et al., 1976).

Na representação matemática dos fenômenos hidrológicos, para Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015), as precipitações consideradas em modelos podem ser precipitações medidas, de projeto ou previstas. Para Moreira, Mine e Filho (2007), compreender não apenas a quantidade de chuva de um modelo, mas também sua intensidade, é fundamental. Os autores abordam que as chuvas de alta intensidade, com volumes consideráveis em curtos períodos, geram escoamentos

superficiais significativos, mesmo em solos não saturados. Eles explicam que isso ocorre devido ao volume de água que atinge a superfície e excede a taxa de infiltração do solo.

### 2.2.1 Discretização Espacial

Outro aspecto relevante é a estimativa da distribuição espacial da chuva que, tradicionalmente, é feita através de medidas pontuais que são extrapoladas ou interpoladas na área de interesse por métodos específicos, como citado por Moreira, Mine e Filho (2007). No entanto, essa abordagem pressupõe uma estimativa de precipitação para áreas distantes dos pontos de medição, sem considerar a quantidade real de chuva ocorrida, conforme discorrem os mesmos autores.

De acordo com Tucci et al. (1993), a maneira como a intensidade da chuva pode variar significativamente de um lugar para outro dentro de uma determinada área na distribuição espacial das chuvas máximas, leva à padronização de isoietas para condições desfavoráveis. Segundo o mesmo autor, essa padronização é aplicável em áreas com pequenas diferenças de relevo e a determinação da curva altura pluviométrica-área-duração, que permite transferir resultados pontuais para uma escala espacial, é válida. Ele ainda traz que os valores pontuais de intensidades médias são representativos de áreas entre 2,5 e 25 km<sup>2</sup>. Para áreas maiores, o autor aborda que a precipitação média é menor que a pontual, e este valor é ajustado de acordo com a área. Essas isoietas mostram que a precipitação média sobre a área é proporcional à precipitação pontual reduzida por fatores específicos (Tucci et al., 1993). O guia de práticas hidrológicas da *World Meteorological Organization* (WMO) de 1994 apresenta as densidades mínimas populacionais para a incidência de instalação de pluviômetros, dependendo das suas características fisiográficas e se há a necessidade ou não de registro de dados gravados (Tabela 1). Nota-se que áreas urbanas, em geral, com população superior a 10.000 habitantes, devem ter prioridade para o registro desses dados, segundo a WMO (1994).

Tabela 1 – Densidades mínimas recomendadas para incidência de estações pluviométricas.

Unidade Fisiográfica	Densidades mínimas por estação (km <sup>2</sup> /estação)	
	Sem prioridade	Com prioridade
Litorânea	900	9000
Montanhosa	250	2500
Planícies interiores	575	5750
Colinas/ondulante	575	5750
Pequenas ilhas	25	250
Polar/árido	10000	100000

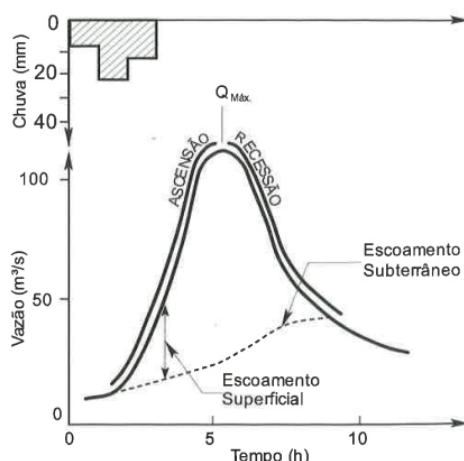
Fonte: Adaptado de WMO (1994).

## 2.3 HIDROGRAMA

O hidrograma demonstra graficamente a relação entre a vazão em uma seção transversal específica do curso de água e o tempo, em concordância com o ilustrado na Figura 2. Este gráfico

possibilita identificar os momentos de ocorrência das vazões máximas e mínimas e avaliar sua intensidade, bem como estimar os volumes de escoamento que passaram pelo local, segundo Fagundes (2018). De forma complementar, podemos compreender que o hidrograma caracteriza o comportamento hídrico da bacia, cujas divisões retratam o volume de água no rio ao longo do tempo e essa representação é fundamental para o planejamento dos recursos hídricos (Medeiros; Sousa; Ribeiro, 2011).

Figura 2 – Características do hidrograma.



Fonte: Collischonn e Dornelles (2013).

Outro ponto destacado por Fagundes (2018) é que os hidrogramas desenvolvidos podem ser utilizados como dado de entrada para a simulação hidrodinâmica juntamente com os dados referentes às seções transversais do leito do rio. A autora comenta que as seções podem ser obtidas a partir de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de técnicas de topografia, sendo possível gerar hidrogramas para locais à jusante de onde são determinados no modelo hidrodinâmico. Assim, também é possível obter informações acerca da velocidade e profundidade do escoamento em determinados pontos de interesse (Fagundes, 2018).

## 2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Para Rennó e Soares (2003), o modelo hidrológico pode ser definido como uma tentativa de representação matemática do fluxo hídrico e seus parâmetros. Uma forma de se analisar os dados de uma bacia hidrográfica pode ser a partir de hidrogramas gerados por simulação computacional com modelos hidrológicos (Silva et al., 2008). O mesmo autor aborda que são considerados os dados fisiográficos de áreas, comprimentos, declividades e coberturas do solo para análise de uma bacia hidrográfica.

### 2.4.1 Classificação dos modelos hidrológicos

Cada modelo é classificado por diversas características. A seguir, são sumarizadas as principais características dos modelos hidrológicos.

#### 2.4.1.1 *Determinístico × Estocástico*

Nas simulações de modelos determinísticos, os resultados não se comportam através de probabilidades estatísticas (Gisch, 2018). Já nos modelos estocásticos existem parâmetros que conferem aleatoriedade à simulação, assim, analisam-se os resultados probabilisticamente, como descreve a mesma autora.

#### 2.4.1.2 *Conceitual (fisicamente embasado) × Empírico*

O modelo conceitual, aqui considerado como fisicamente embasado, considera a dependência entre eventos, em que a ocorrência de determinado evento modifica a probabilidade de outro evento (Silva et al., 2020). Por exemplo, na modelagem numérica, os aspectos naturais de uma bacia hidrográfica são considerados como funções que os relacionam, para fornecer o resultado (Rennó; Soares, 2003). Já, os modelos empíricos Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015) abordam que os dados são processados por meio de operações matemáticas que não necessariamente correspondem a leis ou princípios reais. Para os mesmos autores, essas equações geralmente são desenvolvidas utilizando análises estatísticas e probabilísticas, baseadas em dados observados. Eles ainda acrescentam que os modelos empíricos são empregados para tratar fenômenos extremamente complexos, onde adotar outras abordagens seria impraticável.

#### 2.4.1.3 *Discreto × Contínuo*

O modelo hidrológico discreto objetiva a modelagem de períodos isolados da série de um evento, que pode durar horas ou dias, para representar eventos de cheia ou recessão, conforme Santos (2009). Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, em geral, esses fenômenos são representados por modelos discretos (Rennó; Soares, 2007).

Conforme Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015), nos modelos contínuos, períodos prolongados são simulados integrando múltiplos eventos chuvosos em uma única simulação. Os autores ainda comentam que esses modelos são amplamente utilizados quando se acopla um modelo hidrológico a um modelo meteorológico.

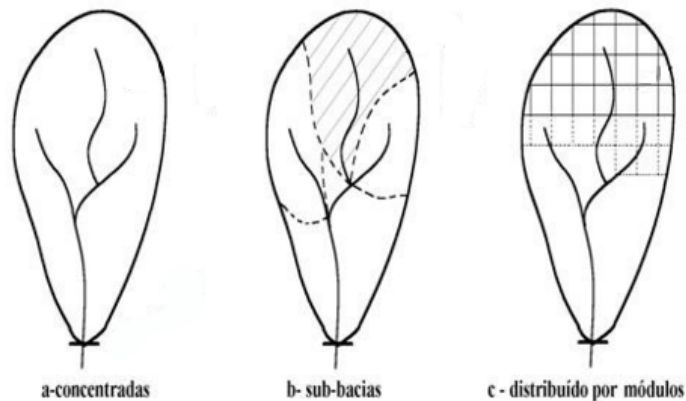
#### 2.4.1.4 *Concentrado × Semi-distribuído × Distribuído*

De acordo com Almeida e Serra (2017), o modelo hidrológico concentrado é aquele que atribui, para toda a área da bacia, valores médios demonstrativos de acordo com cada parâmetro do modelo. Para Santos (2009), diz-se concentrado o modelo que não considera a variabilidade espacial da bacia, onde a principal variável é o tempo. Na modelagem concentrada do processo chuva-vazão de uma bacia hidrográfica, por exemplo, todas as variáveis do sistema são avaliadas em termos da média espacial (Rocha et al., 2020). Isso significa que a chuva, a evaporação, a infiltração e demais variáveis são consideradas em termos médios considerando a área da bacia (Fayal, 2008). Este mesmo autor considera que todas as variáveis de entrada e saída

são representativas de toda a área estudada. Segundo Liu e Weller (2008), os modelos semi-distribuídos, contrastando com os modelos concentrados, incorporam a heterogeneidade, isto é, a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas, dos processos hidrológicos, dos dados de entrada e das condições de contorno.

Consoante Almeida e Serra (2017) mencionam que o modelo hidrológico distribuído divide em unidades toda a área da bacia, onde para a manipulação dos dados considera-se sua variabilidade espacial. Segundo Tucci (1998), esses modelos permitem uma análise mais completa da influência das modificações que ocorrem nas bacias hidrográficas. Os modelos de discretização de bacias possíveis para modelos distribuídos são demonstrados consoante à Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Discretização de bacias. a- representa um modelo concentrado, b- representa um modelo concentrado, mas dividido em sub-bacias, e c- representa um modelo distribuído por malha.



Fonte: Adaptado de Tucci et al. (1993).

#### 2.4.2 Modelo Chuva-Vazão

Tucci (1998) comenta que os modelos de chuva-vazão descrevem parte da fase do ciclo hidrológico que transcorre entre a precipitação e a vazão. Os autores também comentam que esses modelos tem a capacidade de abordar a distribuição geoespacial da precipitação, as perdas decorrentes de fenômenos como interceptação, evaporação, armazenamento superficial, e movimento subsuperficial e subsuperficial da água, incluindo infiltração, percolação e fluxo subterrâneo, bem como o escoamento superficial e fluvial.

A principal variável considerada na entrada de modelos chuva-vazão é a precipitação (Moreira; Mine; Filho, 2007). Este elemento, essencial no ciclo hidrológico, possui características intrínsecas de ocorrência, como: localização, intensidade e duração, conforme abordam os mesmos autores. Já segundo Wagener, Wheeler e Gupta (2004), quando o foco principal na utilização de um modelo chuva-vazão está na estimativa da resposta hidrológica em escala de bacia hidrográfica, os modelos teóricos e concentrados muitas vezes são suficientes para bacias menores. Já para bacias maiores, modelos embasados fisicamente podem ter uma aplicação



impraticável por conta da quantidade de dados de entrada (Buarque, 2015), a fim de tornar isso possível, pode-se aplicar um *up-scaling* das equações do modelo (Medeiros et al., 2010).

### **2.4.3 Perdas de precipitação**

Para compreender os fatores inclusos em uma precipitação, pode-se dizer que existe uma parte cuja função é gerar o escoamento superficial e outra que é ser absorvida no ciclo hidrológico, de acordo com Silva et al. (2015). Esta absorção, chamada muitas vezes de perda, pode ocorrer através de interceptação, evapotranspiração, infiltração e armazenamento em depressões e detenções, conforme os mesmos autores.

As principais perdas se dão devido à infiltração, determinada pela análise do uso e tipo de solo da bacia. Diversos modelos são usados para calcular a precipitação efetiva, como: o Perda inicial e Taxa Constante; o Deficit e Taxa Constante; o Retenção Potencial Máxima utilizando o SCS Curve Number (CN), e; o Green-Ampt, segundo Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015).

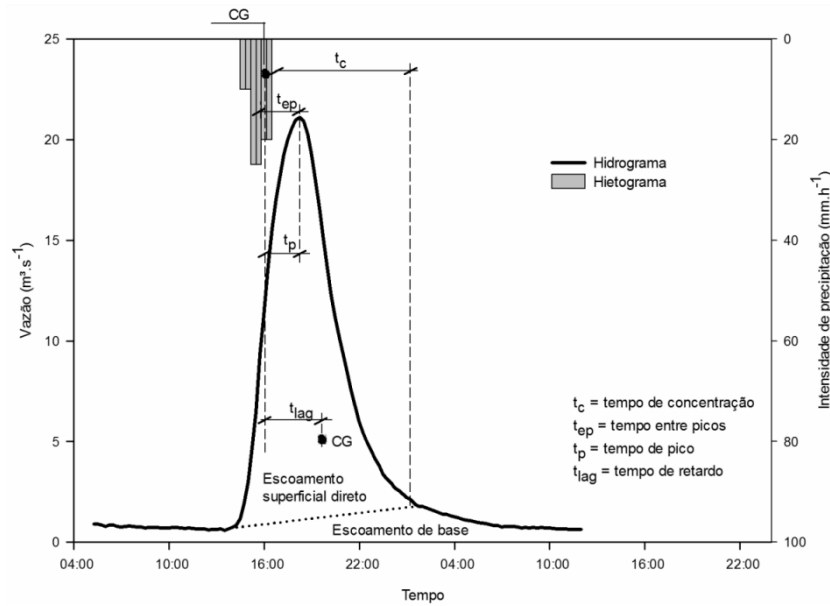
### **2.4.4 Hidrograma unitário**

Na simulação hidrológica, uma das maneiras mais usuais para transformar a precipitação efetiva em escoamento superficial é a partir da aplicação de um hidrograma unitário (HU) (Monteiro; Kobiyama; Zambrano, 2015). De acordo com Tucci (2003), o HU é função dos dados observados de precipitação e vazão com intervalo de tempo compatível com o tempo de concentração da bacia. Na Figura 4, ilustra-se o HU, embasado por Nunes (2015). O HU é muitas vezes aplicado para simular a resposta de uma bacia hidrográfica em sistemas de previsão e alerta de inundações, especialmente em bacias que possuem dados de precipitação e escoamento observados (Yi et al., 2022). Para os autores, com ele se estima o escoamento superficial resultante de uma precipitação excessiva uniformemente distribuída sobre a bacia por um determinado período de tempo. Assim, é possível vincular as condições meteorológicas com vazões com esta técnica. A diferença principal entre o HU e outros hidrogramas reside no fato de que o HU considera uma resposta padronizada a uma chuva unitária que permite estimar o comportamento do escoamento para eventos de chuvas mais complexos, conforme os mesmos autores.

### **2.4.5 Escoamento de base**

À medida que a água se infiltra no subsolo, parte do volume pode ser perdida para o armazenamento em aquíferos profundos (USACE, 2024). No entanto, como mencionado no mesmo manual, outra parte é armazenada temporariamente, retornando rapidamente à superfície. A combinação deste fluxo de base e do escoamento direto resulta em um hidrograma de escoamento total, de acordo com USACE (2024).

Figura 4 – Características de um hidrograma unitário.



Fonte: Nunes (2015).

Segundo Ricardo et al. (2020), os escoamentos de base representam as taxas mínimas dos fluxos de água em um curso d'água (Nascimento et al., 2019). Além de ser o responsável pela alimentação do curso d'água durante o período de estiagem, conforme Pruski, Griebeler e Silva (2001), é mantido pela contribuição lateral do lençol freático (Nascimento et al., 2019). Apesar da existência de diversos métodos para separar o escoamento superficial da vazão de base, estimar a contribuição do escoamento subsuperficial continua a ser um desafio (Monteiro; Kobiyama; Zambrano, 2015).

## 2.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Para Tucci (1998), a modelagem hidrodinâmica é uma ferramenta que utiliza métodos numéricos para resolver as equações diferenciais do escoamento. O autor descreve suas principais características, como se assemelhando a um modelo hidrológico distribuído, em que há efeito tanto de jusante quanto de montante no escoamento. Além disso, o autor comenta, por se considerar o termo de inércia, pode-se ter grande variação temporal e espacial da velocidade do sistema, que também considera a equação da quantidade de movimento. Esse tipo de modelo, portanto, permite maior precisão, melhor representação física do escoamento, o que permite simular modificações da região estudada com maior precisão (Tucci, 1998).

### 2.5.1 Modelo Hidrodinâmico-hidrológico acoplado

Para Santos (2009), os modelos hidrodinâmico-hidrológicos acoplados são aqueles que se baseiam em abordagens físicas dos processos hidrológicos, onde, para isso, utilizam-se as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento. Para Lopes (2017), o

acoplamento externo de modelos hidrológicos-hidráulicos com modelos hidrodinâmicos em duas ou três dimensões permite simular as vazões dos rios afluentes utilizando o primeiro modelo e, em seguida, inserir esses dados no modelo hidrodinâmico para representar os grandes corpos hídricos. Esse método possibilita uma análise detalhada da dinâmica hídrica desses sistemas, permitindo que suas características sejam consideradas com maior precisão, segundo comenta a mesma autora.

## **2.5.2 Escoamento Permanente × Escoamento Não Permanente**

O escoamento em regime permanente é aquele em que as propriedades do fluido são invariáveis com o passar do tempo, segundo Camargo (2017). O escoamento permanente ocorre quando não há variação de velocidade e nível, podendo ser uniforme, de gradiente de profundidade nulo e velocidade constante, ou não uniforme, onde há variação espacial (Filho et al., 2011). O escoamento permanente e não uniforme é utilizado para cálculos de remanso, análise de perfis de cheias, escoamentos em estiagem, análise da qualidade da água e dimensionamento de obras hidráulicas (Tucci et al., 1993).

Ferreira (2013) explica que o escoamento não permanente é aquele em que a velocidade e a pressão variam com o tempo. O escoamento em superfície livre não permanente considera a variação temporal e geralmente também espacial das variáveis, comum em problemas hidrológicos de escoamento superficial, rios e canais. Este tipo de escoamento pode ser descrito pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento, conhecidas como equações de Saint-Venant (Tucci et al., 1993). O autor ainda explica que a equação de conservação de massa é derivada da avaliação das massas internas e externas que atuam no sistema, como as vazões a montante, contribuição lateral e vazão de saída em um trecho de rio.

## **2.5.3 Verificações**

Para se obterem as informações mais adequadas na modelagem, realizam-se calibrações e validações, segundo Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015), como abordado a seguir.

### **2.5.3.1 Calibração e otimização de Modelos**

Calibrar um modelo é modificar parâmetros dentro de faixas aceitáveis para obter resultados simulados que reproduzam condições conhecidas (USACE, 2024). Isso é necessário para ajustar modelos hidrológicos de modo que representem de forma mais precisa as condições reais de uma bacia hidrográfica (Moriassi et al., 2007). Essa etapa garante que as simulações de vazão, escoamento e outros processos hidrológicos estejam alinhadas com os dados observados, principalmente para redução de incertezas, adaptação de condições locais e melhoria de precisão do modelo, por exemplo (Moriassi et al., 2007). Assim, é possível haver a confiança de que os resultados simulados representam adequadamente o sistema modelado (USACE (2024)).

A fim de otimizar os modelos hidrológicos a partir da calibração, definem-se quais são os parâmetros a serem calibrados e quais as variações permitidas a estes. Para realizar a calibração de forma quantitativa, podendo ser automática, define-se a função-busca e a função-objetivo a ser utilizada.

Um exemplo de resolução equacionamento de função-busca é o Método da Evolução Diferencial (*Differential Evolution*) o qual, por sua vez, define posições de avaliação do modelo através de um número aleatório. De acordo com Storn e Price (1997), o método é adequado para otimizar problemas complexos, é uma técnica de otimização estocástica inspirada em processos evolutivos naturais. Segundo o autor, este método é eficaz para encontrar soluções ótimas em espaços de busca amplos e para problemas onde a função objetivo pode ter múltiplos picos (soluções em potencial) ou ser complexa e não diferenciável. Esse método ajusta uma população de soluções candidatas ao longo de várias gerações, promovendo a diversidade e evitando mínimos locais.

Outro método possível de ser utilizado para a otimização é o *Simplex*, no entanto, ele tem uma abordagem mais simples que o método anterior. No contexto da programação linear, visa encontrar soluções ótimas para problemas com restrições lineares (Peixoto, 2011). Este método se aplica particularmente em cenários onde o objetivo é minimizar ou maximizar uma variável, mantendo o desempenho dentro de uma região viável definida por restrições, segundo o mesmo autor. Em resumo, ele aborda que o *Simplex* resolve esses problemas ao percorrer iterativamente os vértices de um polígono até alcançar o ponto de máximo ou mínimo da função objetivo.

Por fim, outro método bastante utilizado é o da Análise Univariada (*Univariate*). A abordagem univariada foca em uma única variável ao longo do tempo e, conforme Almeida et al. (2023), este método permite uma análise mais direta das flutuações e padrões dessa variável específica, e o uso de parâmetros como iterações máximas e tolerância garante que a entrada de dados seja realizada de forma a evitar ajustes excessivos que poderiam comprometer a integridade dos dados de entrada. Nesse caso, a função-objetivo pode ser analisada separadamente em termos de cada variável, simplificando cálculos e permitindo uma avaliação linear de cada dimensão do problema, uma de cada vez, segundo o mesmo autor.

Já na função-objetivo, um dos métodos que pode ser utilizado é o Método de Nash, cuja função é maximizar os coeficientes de desempenho para aproximá-los de 1 e, assim, obter-se a melhor otimização para a simulação numérica (Monteiro; Kobiyama; Zambrano, 2015). De outro modo, uma análise que, a depender dos resultados, deve ser feita é a da vazão de pico. Consoante Salas e Obeysekera (2014), o ajuste das vazões de pico e a aplicação de modelos hidrológicos que considerem variações temporais e espaciais na ocupação do solo podem fornecer uma melhor compreensão das implicações das enchentes.

### 2.5.3.2 Validação de Modelos

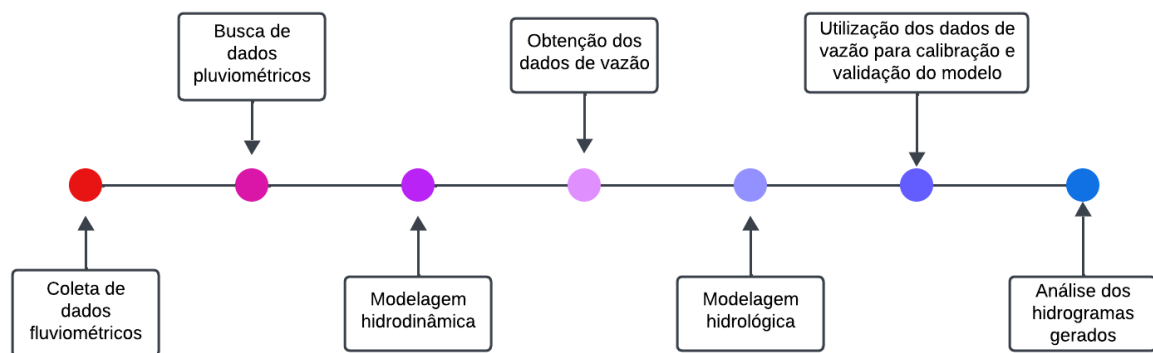
Além da calibração do modelo, USACE (2024) traz a importância de realizar um processo de validação. Nesse processo, os resultados são calculados, sem quaisquer ajustes adicionais

de parâmetros. Esses resultados são utilizados para calcular saídas que são subsequentemente comparadas com dados observados de eventos independentes não considerados durante a calibração. Os eventos de chuva empregados tanto na calibração quanto na validação do modelo devem possuir magnitude aproximadamente equivalente à dos eventos considerados na aplicação específica (USACE, 2024).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em calibrar e validar modelos hidrológicos comparando hidrogramas a partir de dados gerados por modelo hidrodinâmico-hidrológico acoplado. A metodologia do presente trabalho consistiu em cinco etapas. Na primeira etapa, foram coletados os dados fluviométricos do objeto de estudo. Em seguida, na segunda etapa, foi pesquisado acerca dos dados pluviométricos e os arquivos com as características do local, como o Modelo Digital de Terreno (MDT) e os *shapefiles* de relevo, uso do solo e demais aspectos. Em seguida, foram feitas as simulações através de modelagens hidrodinâmicas e hidrológicas para a calibração e adaptação destes modelos e, então, a geração dos hidrogramas. Por último, analisaram-se os dados, foram criados os hidrogramas para a Bacia do Rio Cachoeira e foram realizadas as determinadas considerações e sugestões para futuras análises. Esse procedimento pode ser visto por meio do esquema linear apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema metodológico do presente trabalho.



Fonte: Autora (2024).

#### 3.1 JOINVILLE

Joinville, situada na região Sul do Brasil, está localizada na latitude de 26°S e longitude 48°O, próximo à transição da zona subtropical para a área tropical (Joinville, 2024). Localiza-se em um ponto estratégico de Santa Catarina, considerado um polo industrial e o município com a maior população do estado, correspondente a 616.317 pessoas, para uma área de 1.127,947 km<sup>2</sup> (IBGE, 2022). A maioria das estações de monitoramento hidrológico em Joinville é unicamente pluviométrica, e a mais antiga está em funcionamento desde a década de 1930 (Mello; Koehntopp, 2017). No entanto, em relação a outros parâmetros, como temperatura, ventos e vazão, as séries históricas são deficientes, segundo Mello e Koehntopp (2017), que são parâmetros fundamentais para a gestão dos desastres.

Sendo assim, o rio Cachoeira, apesar de sua importância histórica, é muitas vezes negligenciado em termos de medidas preventivas e de gestão adequada de inundação, segundo

abordam Zschornack e Oliveira (2017). O SEDEC (2020) avaliou quantitativamente os prejuízos econômicos e quais fenômenos se relacionam com a problemática das inundações em Joinville (Quadro 2).

Quadro 2 – Dados dos prejuízos contabilizados em Joinville.

DATA	CAUSA E LOCAIS AFETADOS	PESSOAS AFETADAS	PREJUÍZOS FINANCEIROS
23 de outubro de 2016	Chuvas intensas elevaram o nível nos Rios Cubatão e Cachoeira, causando inundações que afetaram os bairros Bucarein, Profipo, Boehmerwaldt, Petrópolis, Itaum, Guanabara, Centro, Anita Garibaldi, Floresta, Santa Catarina, Vila Nova, São Marcos, Morro do Meio e Nova Brasília	50.615 pessoas afetadas	Os danos materiais totalizaram R\$ 780.000, para unidades habitacionais, instituições públicas. Além disso, causaram prejuízos sociais nos serviços essenciais de R\$ 400.000 e R\$ 8.572.000 de prejuízos econômicos privados
27 de dezembro de 2016	Ocorreram inundações nos bairros Petrópolis, Jarivatuba, Boehmerwaldt, Floresta, Itinga, Santa Catarina, Guanabara, Itaum, Fátima, Paranaguamirim, Itaum, João Costa, Parque Guarani, Profipo, Nova Brasília e Pirabeiraba	5.002 pessoas ficando desalojadas e desabrigadas	Os danos materiais somaram R\$ 690.000, com obras de infraestrutura pública e unidades habitacionais, R\$ 700.000 de prejuízos sociais nos serviços essenciais, R\$ 450.000 de prejuízos econômicos privados
27 de janeiro de 2017	Chuvas fortes ocasionaram a rápida elevação dos níveis dos rios, causando enxurrada e alagamentos nos bairros de diversas áreas do município	Mais de 50.000 pessoas foram afetadas por alagamentos	Outros prejuízos calculados foram de R\$ 78.335.000 em danos materiais, R\$ 5.000 em serviços essenciais e R\$ 8.000 e prejuízos econômicos

Fonte: Adaptado de SEDEC (2020).

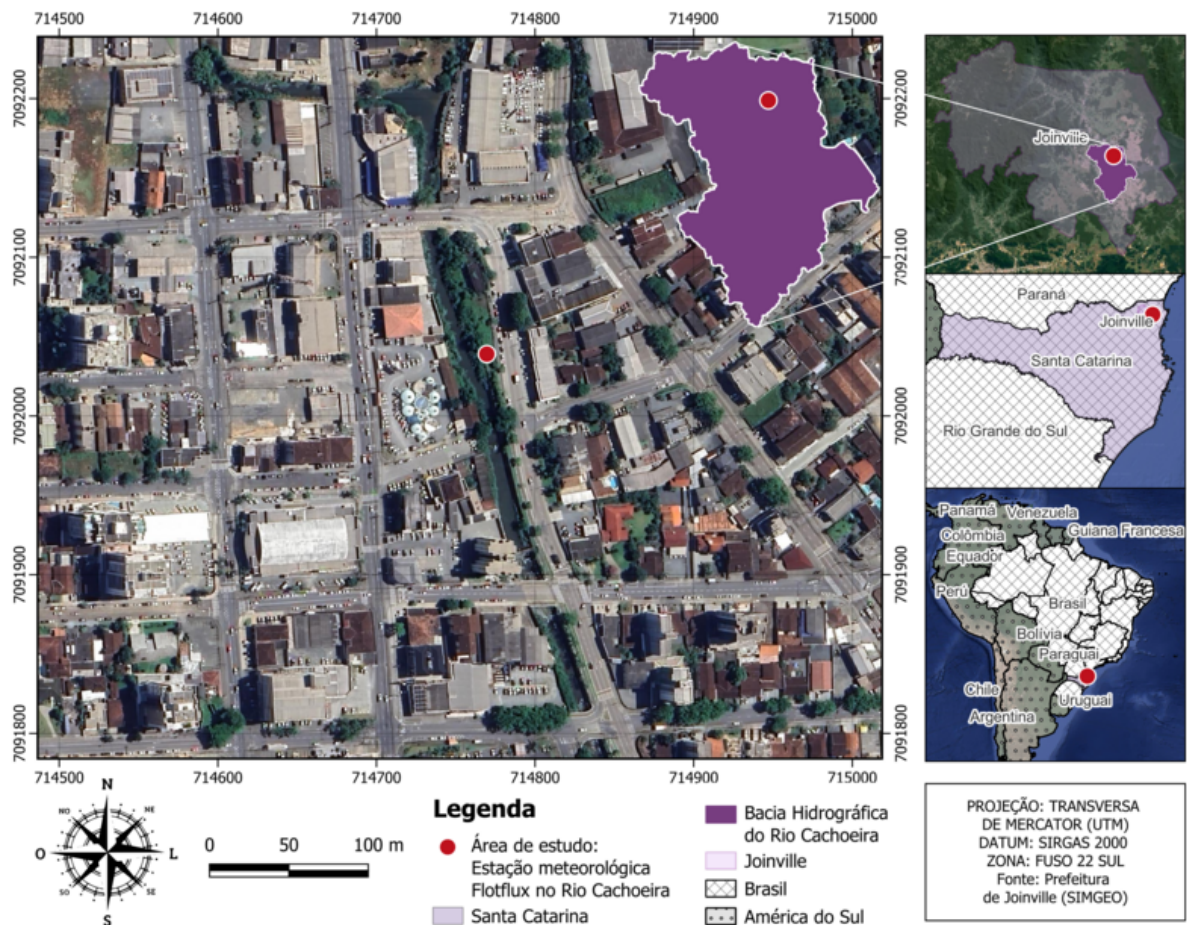
Nesse aspecto, o Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Joinville (PDDMAPJ) foi desenvolvido para gerenciar os desastres voltados à inundações a partir de medidas estruturais e não estruturais (Joinville, 2011). Apesar da criação de tais medidas, percebe-se que a implementação prática do plano diretor ainda enfrenta desafios significativos, em grande parte devido ao caráter corretivo das medidas (Barros; Oneda, 2022). Logo, tais iniciativas de drenagem urbana limitam-se a mitigar os problemas em locais densamente urbanizados, onde a impermeabilização do solo e o aumento do escoamento dificultam soluções mais preventivas e sustentáveis, impactando a qualidade de vida e a infraestrutura urbana, segundo as mesmas autoras.

### 3.2 ÁREA DE ESTUDO

A região escolhida para a análise deste estudo foi a Bacia do Rio Cachoeira. Este rio é caracterizado pela influência de maré em parte dele e por fazer parte de um estuário, o que contribui para a complexidade das inundações enfrentadas em Joinville (Destefani; Jr, 2019). Por isso, é interessante avaliar a partir de um ponto onde não há essa influência, uma vez que, entre as dificuldades da modelagem hidrológica, está a calibração dos parâmetros utilizados, de modo

a que as previsões do modelo sejam significativamente próximas dos resultados observados (Duarte et al., 2004). Para isso, visou-se a área entre a ponte Alfredo Stein e a ponte da rua Maceió, bairro América, em Joinville/SC, onde se encontra a estação meteorológica Flotflux, conforme mostrado na Figura 6. Assim, foi definida a área da bacia delimitada a montante do ponto escolhido, que foi determinado como o exutório, considerando que nessa parte não há influência de maré usualmente.

Figura 6 – Mapa da área de estudo. À direita a relação do Brasil, Santa Catarina e Município de Joinville de baixo para cima. À esquerda uma representação do local do exutório posicionado no local da estação meteorológica.



Fonte: Autora (2024).

### 3.2.1 Obtenção de dados da área de estudo

De modo a pensar nos fatores que interfeririam no estudo, isto é, dados de precipitação, solo, relevo, dados de classificação e uso do solo e de cobertura vegetal, conforme Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015), buscaram-se as informações necessárias às simulações. Com o auxílio do *software* QGIS versão 3.34.9, projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGEO, 2024), obtiveram-se os arquivos da base Sistemas de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) (SDS, 2016), Sistemas de Informações Municipais Georreferenciadas de



Joinville (2010) (SIMGEO) e da FlorestaSC: Plataforma de Mapas (MonitoraSC) (2017), como apresentado no Quadro 3. Com relação aos dados geodésicos, utilizou-se os do EPSG:31982 do datum SIRGAS 2000 de sistema de coordenadas UTM zona 22S e, assim, também foi possível visualizar a região de estudo da bacia.

Quadro 3 – Referência dos dados coletados ou processados.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>BASE DE DADOS</b>
Localização	Shapefile do SIGSC
Hidrografia	Shapefile do SIMGEO
Uso e ocupação do solo	Shapefile do Monitora SC (FURB)
Área vegetal	Shapefile do SIMGEO
Pedologia	Shapefile do SIMGEO
Relevo	MDT do SIGSC
Área da bacia	Por meio do shapefile e calculados com auxílio do QGIS
Perímetro da bacia	
Comprimento do rio principal	
Tempo de concentração	
Coeficiente de armazenamento	Por meio do MDT e dados processados com auxílio do QGIS
Altitude aproximada da nascente	
Altitude aproximada do exutório	
Declividade média do rio principal	
Declividade média da bacia	

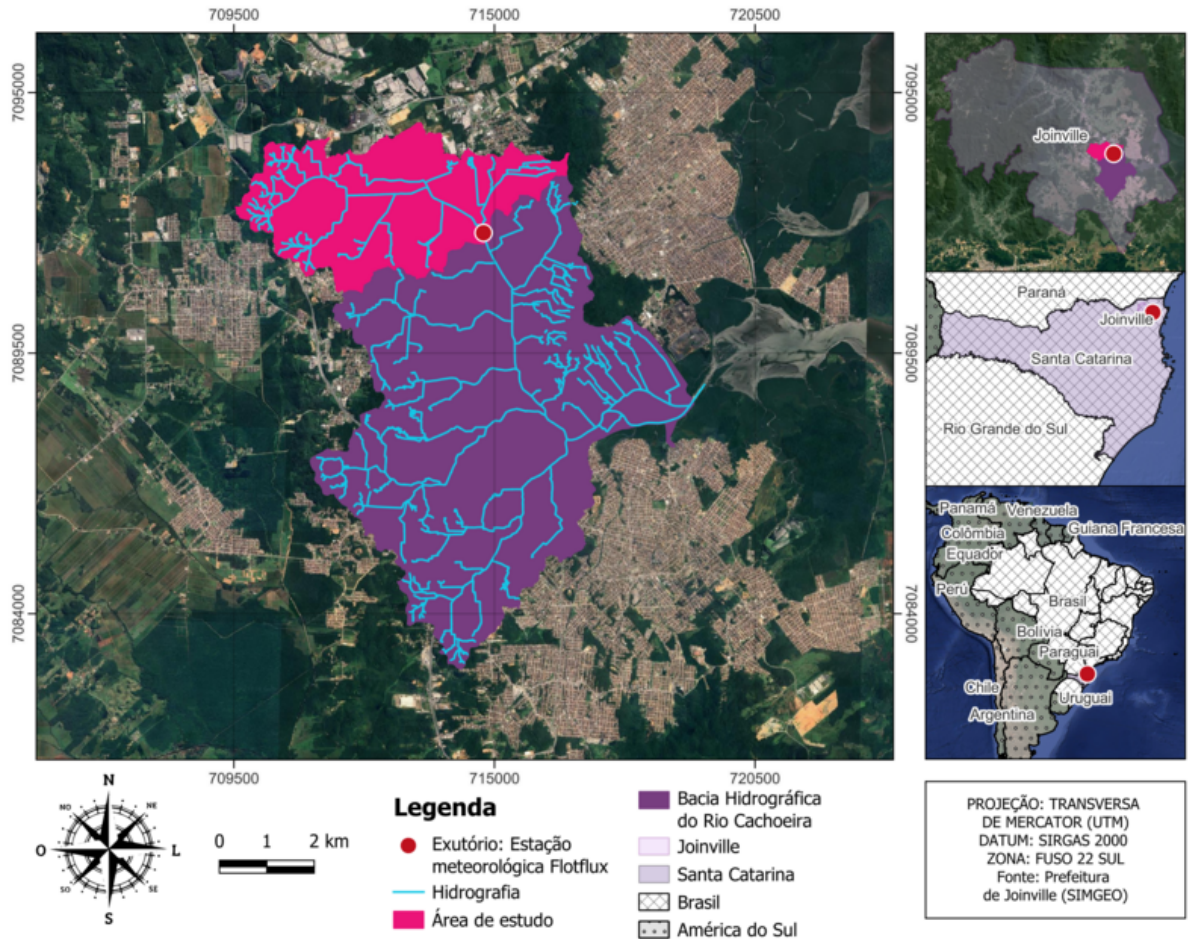
Fonte: Autora (2024).

### 3.3 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA

A Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC) está totalmente inserida no município de Joinville, como ilustrado na Figura 7. Esta bacia drena uma área de 83,12 km<sup>2</sup>, o que representa 7,3% da extensão total do município (Joinville, 2009), e a área de estudo deste trabalho encontra-se ao norte da bacia do Rio Cachoeira e possui 13,91 km<sup>2</sup>. Sua nascente principal está situada em uma área residencial de baixa densidade populacional, no bairro Costa e Silva, no Morro da Tromba, na junção das ruas Rui Barbosa e Estrada dos Suíços, e o rio atravessa a cidade ao longo de seus 14 quilômetros de extensão, recebendo diversos afluentes, entre eles os rios Morro Alto, Mathias e Jaquarão. Na porção central da bacia, encontram-se a zona urbana e uma parte da área industrial de Joinville (Oliveira et al., 2017). O rio deságua na Lagoa do Saguçu, que se conecta à Baía da Babitonga, uma importante região estuarina que abriga remanescentes de áreas de manguezal, conforme Joinville (2009). A pluviosidade anual média dessa bacia é de 1.957,3 mm, o mês mais chuvoso é janeiro e os meses mais secos são junho e julho, de acordo com os dados de Mello e Koehntopp (2017). Visto isso, foi escolhida como área específica de estudo, a área que contempla as sub-bacias do Rio Cachoeira, totalizando uma área de 13,909km<sup>2</sup>. Essa, por sua vez, parte das nascentes, incluindo sua principal nascente, ao ponto de exutório, localizado

na estação Flotflux, onde não se nota a presença da influência de maré, segundo as observações feitas *in loco*.

Figura 7 – Mapa de localização da Bacia de estudo.



Fonte: Autora (2024).

### 3.3.1 Características físicas da bacia hidrográfica

Foram coletados os valores de vazão através de medições de campo utilizando o método do flutuador e foram determinadas as profundidades da seção transversal em análise do rio com uma haste graduada. Os dados de precipitação foram obtidos junto à Prefeitura, pela Defesa Civil de Joinville. Nesta etapa, foram buscados na série de dados 3 eventos: um para a calibração do modelo e outros 2 para a validação, demonstrando que os dados considerados não se restringem apenas ao evento específico utilizado. A declividade média do rio foi determinada conforme o método descrito no item 2.1.1. Para o cálculo da declividade média da bacia, utilizou-se o procedimento descrito no mesmo item. Em relação à forma da bacia, de acordo com o Coeficiente de Compacidade, verificou-se que com um perímetro de praticamente 15 km e uma área de 83,12 km<sup>2</sup>, segundo os dados da Prefeitura de Joinville (2009), o Coeficiente de Compacidade da bacia do Rio Cachoeira em Joinville é aproximadamente 0,46. Isso sugere que o formato da bacia do

Rio Cachoeira não é muito circular, mas também não é muito alongado, conforme definido pelos critérios de compacidade.

### 3.4 VAZÕES DE BASE

Para estimar o escoamento de base, foram realizadas medições das vazões utilizando o método do flutuador. Esta é uma seção retificada do rio com uma calha retangular, portanto, considerou-se uma seção retangular para representar a área molhada do rio, mesmo que existam depósitos de sedimentos no fundo do canal. Na borda do rio, com haste graduada, foi medida a profundidade do escoamento na seção escolhida. A largura foi estimada tanto por imagens de satélite, quanto a partir de observações realizadas a partir de uma ponte existente na proximidade, medindo a sua largura com uma trena. A trena também foi utilizada para medir a distância padronizada para observação de objetos flutuantes naquele trecho de modo a cronometrá-los durante a medição. Abaixo é representado o Quadro 4 com o resumo dos equipamentos utilizados.

Quadro 4 – Informações sobre os dados de campo.

Dado	Equipamento
Perfil hidráulico dos rios	Haste numerada
Distância	Trena

Fonte: Autora (2024).

### 3.5 PRECIPITAÇÃO E NÍVEIS

Nesse caso, foram utilizados dados de precipitação e de nível já observados. A estação meteorológica considerada foi a Estação Flotflux, a mesma escolhida como exutório da sub-bacia hidrográfica do rio Cachoeira, medindo os níveis do rio e a chuva local (Estação 1). Estes dados foram obtidos com a Prefeitura de Joinville (Tabela 2).

Tabela 2 – Dados de posicionamento da estação.

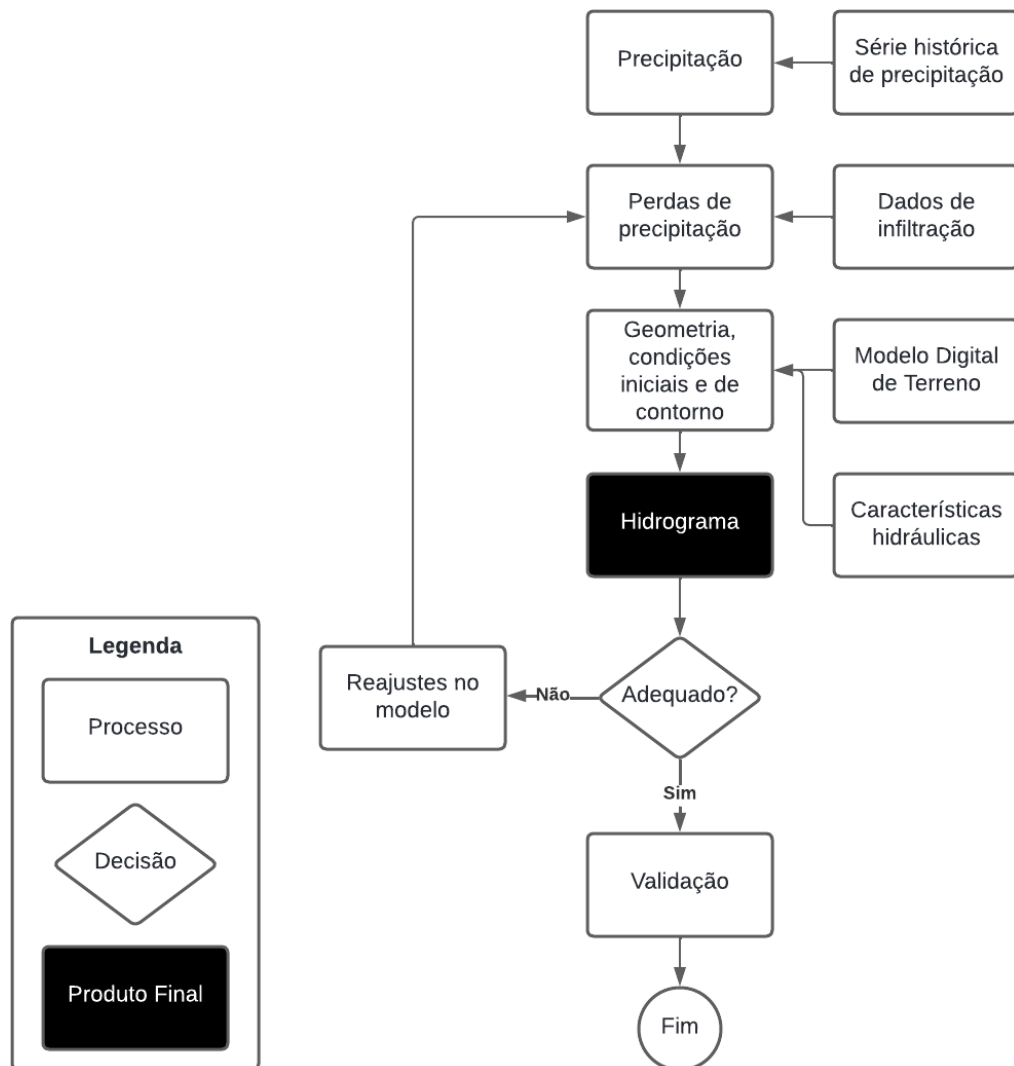
Estação	Altura do pluviômetro (m)	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Latitude (UTM)	Longitude (UTM)
Flotflux	10	-26,275	-48,849	714769,6	7092038,0

Fonte: Autora (2024).

### 3.6 MODELAGEM HIDRODINÂMICA-HIDROLÓGICA ACOPLADA

No presente trabalho, foi utilizado o *software* HEC-RAS versão 6.5. Esse modelo HEC-RAS, foi desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* do *U. S. Army Corps of Engineers* (USACE, 2023) dos Estados Unidos. Um esquema de como se deu essa modelagem pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Etapas para estudo e modelagem hidrodinâmica-hidrológica acoplada.



Fonte: Adaptado de Monteiro e Kobiyama (2013).

O modelo de volumes finitos, como o HEC-RAS permite trabalhar em uma ou duas dimensões. Nesse caso, utilizou-se o modelo 2D, por representar áreas transversais laterais, transversais longitudinais ou horizontais, importantes para as análises deste estudo.

Foram realizadas simulações para criar a condição inicial dos eventos através do equacionamento de *Diffusion Wave*, onde apenas a gravidade, a pressão e a fricção são avaliadas (Monteiro; Kobiyama; Zambrano, 2015). Nesse caso, através dos dados da estação, foram selecionadas as datas de dias imediatamente anteriores aos eventos e simuladas a partir de configurações mais simplificadas a fim de se obter somente uma chuva prévia para preencher áreas mais baixas como a do próprio rio, indicando que o rio tem água.

Para a simulação dos eventos, foi utilizada a equação de águas rasas (*Shallow Water Equations - SWE*) pelo Método Euleriano-Lagrangiano, que leva em conta acelerações locais e convectivas, isto é, aceleração da água e as forças inerciais, gerando uma simulação mais precisa,

o que corrobora em variações de fluxo mais detalhadas, segundo Mignot, Paquier e Haider (2006). Além de que permite maior precisão em cenários de variações rápidas de velocidade e direção da corrente, especialmente em regiões de mudanças abruptas na seção do canal ou em sistemas fluviais com inclinações suaves (USACE, 2023).

Para a evolução temporal da simulação, foi utilizado um passo de tempo variável. Assim, os cálculos realizados no programa foram conforme expressos no Quadro 5.

Quadro 5 – Informações sobre as condições e configurações para o modelo.

<b>Dados de entrada para simulação hidrodinâmica</b>	
<b>MDT com resolução 5x5 m<sup>2</sup></b>	Disponibilizado pelo Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC)(SDS, 2016) - feito procedimento de <i>upscaling</i>
<b>Geometria da bacia</b>	Área e curso d'água principal
<b>Dados para cálculo da infiltração</b>	Uso do solo e o número de Manning, conforme o item 3.6.1
<b>Dados para cálculo da infiltração</b>	Pedologia, conforme os Sistemas de Informações Municipais Georreferenciadas da Prefeitura de Joinville (2010), e o CN, de acordo com o item 3.7.3.1
<b>Condições iniciais e de contorno</b>	
<b>Condições de contorno profundidade normal</b>	Conforme calculado no próprio HEC-RAS - Declividades a serem definidas
<b>Dados de precipitação</b>	Conforme disponibilizado pela Prefeitura na estação Flotflux
<b>Configurações do modelo</b>	
<b>Tamanho da malha</b>	Células de 25 x 25 m <sup>2</sup> e 50 x 50 m <sup>2</sup>
<b>Duração do evento</b>	24 horas
<b>Modelo hidrodinâmico</b>	Equações das Águas Rasas - <i>Shallow Water Equations</i>
<b>Parâmetros para ajuste do passo de tempo da simulação</b>	
Máximo Courant - 0,9	
Mínimo Courant - 0,4	
Número de passos de tempo inicial - 4,0	
Número de passos abaixo do mínimo do Courant antes de duplicar o tempo de passos - 4,0	
Número máximo de duplicação do passo de tempo de simulação - 6,0	
Número máximo de reduzir pela metade o passo de tempo de simulação - 6,0	

Fonte: Autora (2024).

### 3.6.1 Criação da geometria e aplicação da rugosidade

Para criar a geometria do modelo, foi utilizado o modelo digital de terreno (MDT) para delimitar a bacia coincidindo com o agrupamento de sub-bacias a montante da estação FlotFlux. Em sequência, delimitaram-se os rios a partir de *breaklines* e as bordas que correspondem ao limiar entre a malha e as nascentes através de *boundary condition lines*. Feito isso, determinou-se o número de Manning (*n*). Para tal, foram utilizados os valores de Manning presentes no Manual do HEC-RAS 2D para vários tipos de cobertura de terra do *National Land Cover Database* (NLCD), que podem ser considerados de forma análoga para o solo considerado neste estudo, conforme o Quadro 6.

Quadro 6 – Coeficientes de Manning por Tipo de Cobertura do Solo (Método NLCD).

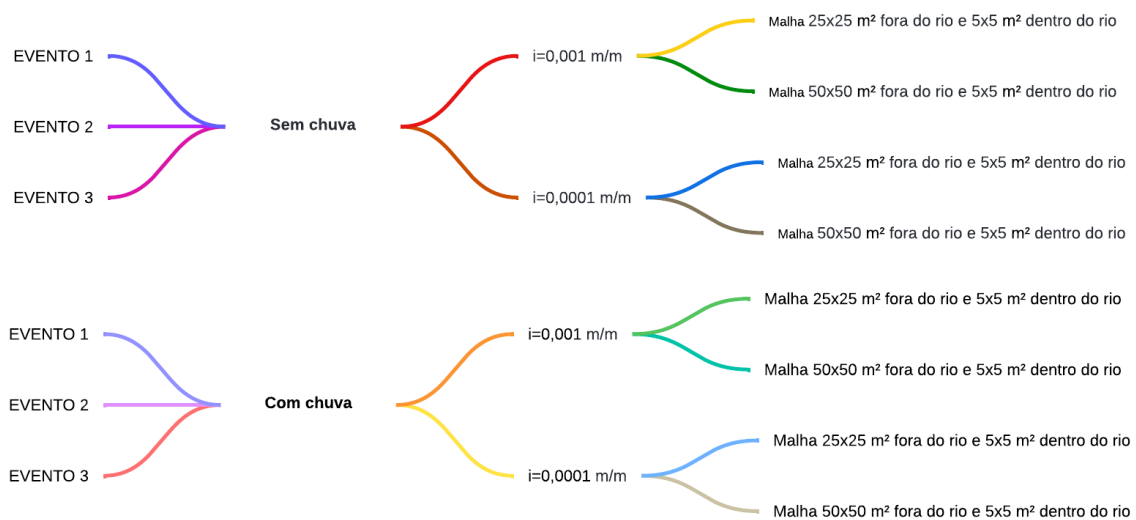
<b>Código NLCD</b>	<b>Tipo de Cobertura do Solo</b>	<b>Número de Manning (n)</b>
21	Espaço Aberto ( <i>Open Space</i> ) - áreas com uma mistura de materiais construídos, mas principalmente vegetação na forma de gramados. Superfícies impermeáveis representam menos de 20% da cobertura total.	0,03 - 0,05
22	Urbanizado, Baixa Densidade ( <i>Urbanized, Low density</i> ) - áreas com uma mistura de materiais construídos e vegetação. Superfícies impermeáveis representam de 20% a 49% da cobertura total.	0,06 - 0,12
23	Urbanizado, Densidade Média ( <i>Urbanized, Medium density</i> ) - áreas com uma mistura de materiais construídos e vegetação. Superfícies impermeáveis representam de 50% a 79% da cobertura total.	0,08 - 0,16
24	Urbanizado, Alta Densidade ( <i>Urbanized, High density</i> ) - áreas altamente desenvolvidas onde as pessoas residem ou trabalham em grande número. Superfícies impermeáveis representam de 80% a 100% da cobertura total.	0,12 - 0,20
43	Floresta Mista ( <i>Mixed Forest</i> ) - áreas dominadas por árvores geralmente maiores que 5 metros de altura e mais de 20% de cobertura vegetal total. Nem as espécies decíduas nem as perenifólias representam mais de 75% da cobertura total de árvores.	0,08 - 0,20
71	Gramíneas/Herbáceas ( <i>Grassland/Herbaceous</i> ) - áreas dominadas por vegetação graminoide ou herbácea, geralmente maior que 80% da vegetação total. Essas áreas não são sujeitas a manejo intensivo, como lavoura, mas podem ser utilizadas para pastagem.	0,025 - 0,05
81	Pastagem/Feno ( <i>Pasture/Hay</i> ) - áreas de gramíneas, leguminosas ou misturas de gramíneas e leguminosas plantadas para pastagem de gado ou produção de sementes ou feno, geralmente em ciclo perene.	0,025 - 0,05
82	Culturas Cultivadas ( <i>Cultivated Crops</i> ) - áreas utilizadas para a produção de culturas anuais, como milho, soja, vegetais, tabaco e algodão, além de culturas lenhosas perenes, como pomares e vinhedos.	0,020 - 0,05

Fonte: Adaptado do Manual da USACE (2023).

### 3.6.2 Simulação de escoamento não permanente

Para realizar as simulações no HEC-RAS, foi feito o esquema conforme a Figura 9. Dessa forma, foram realizadas 48 simulações, sendo 24 delas somente para determinar a condição de entrada do modelo pelo método de distribuição de fluxo inicial, onde se insere o arquivo já processado de condição inicial do evento. Já as 24 outras simulações se referem exclusivamente aos eventos com suas respectivas características. Dessas, somente 12 obtiveram resultados relevantes para se apresentarem neste trabalho, pois as simulações dos eventos sem chuva não agregaram à análise de modo esperado, então foram descartado. Sendo assim, foram observados o declive do canal no exutório que foi calculado pela profundidade normal, com valor de 0,001 ou de 0,0001  $m/m$  e a malha do modelo de  $50 \times 50 m^2$  ou de  $25 \times 25 m^2$  fora do rio, sendo internamente no rio uma malha constante de  $5 \times 5 m$ , inferidos pela *breakline*.

Figura 9 – Esquema das simulações.



Fonte: Autora (2024).

Acerca das condições de contorno iniciais, realizaram-se ajustes às simulações considerando duas formas:

- Para as condições iniciais dos eventos: configuração padrão, sem acréscimo de condições de contorno extras.
- Para os eventos: acréscimo de condição de contorno inicial de aquecimento (método *warm-up*), com 20 número de etapas, iniciando a simulação um pouco antes da data prevista de início. Além disso, foi adicionada uma condição de tempo de aceleração (método *ramp up*), com 10 horas de aceleração. Assim, somando-se duas condições iniciais para garantir melhor preenchimento dos vazios das irregularidades da malha, evitando que a água ficasse retida.

Para ambos os casos, a precipitação adicionada foi junto aos dados meteorológicos, isto é, como condição externa ao evento.

Para a primeira tentativa de simulação, foram estabelecidos os equacionamentos e ajustes descritos no Quadro 5, como pode ser observado no Quadro 7 para as condições iniciais dos eventos. Sendo que, para a condição inicial, a simulação foi feita a partir do método da *Diffusion Wave* e com a precipitação de um evento anterior ao tratado em cada evento.

No Quadro 8, representam-se as configurações dos eventos 1, 2 e 3. Nesta, nota-se que foi inserida uma terceira condição inicial, para dar mais confiabilidade ainda à simulação, através das Equações das Águas Rasas pelo Método Euleriano-Lagrangiano.

Quadro 7 – Configurações do sistema para as condições iniciais dos eventos.

$\theta$ (0,6 – 1,0)	1,0 (padrão)
Aquecimento $\theta$ (0,6 – 1,0)	1,0 (padrão)
Tolerância à superfície da água [máx. = 0,2] (pés)	0,01 (padrão)
Tolerância de volume (pés)	0,01 (padrão)
Máximo (Número de) Iterações (0 – 40)	20 (padrão)
Conjunto de equações	<b>Diffusion Wave</b>
Condições iniciais Tempo de aceleração (horas)	Em branco
Fração de aumento da condição de contorno (0 a 1,0)	0,1 (padrão)
Modelo de turbulência	Nenhum (padrão)
Coeficiente de mistura longitudinal	Em branco
Coeficiente de mistura transversal	Em branco
Coeficiente de Smagorinsky	Em branco
Verificação de volume de condição de contorno	Em branco
Latitude para Coriolis (-90 a 90)	Em branco
Núcleos do Solver	Todos disponíveis
Solucionador de matrizes	PARDISO (padrão)
Tolerância de convergência	Em branco
Número mínimo de iterações	Nenhuma (opcional)
Número máximo de iterações	Nenhuma (opcional)
Coeficiente de Relaxamento	1,3 (padrão)
Reiniciar iterações	10 (padrão)
Iterações do pré-condicionador SOR	10 (padrão)

Fonte: Autora (2024).

### 3.6.3 Validação

A validação do modelo inicialmente foi realizada extraindo os valores obtidos de nível do rio do HEC-RAS e comparando-os com os valores observados, disponibilizados pelos dados da estação Flotflux. Assim, foram utilizados três métodos de avaliação do erro gerado:



Quadro 8 – Configurações do sistema para cada evento do escoamento não permanente.

$\theta$ (0,6 – 1,0)	1,0 (padrão)
Aquecimento $\theta$ (0,6 – 1,0)	1,0 (padrão)
Tolerância à superfície da água [máx. = 0,2] (pés)	0,01 (padrão)
Tolerância de volume (pés)	0,01 (padrão)
Máximo (Número de) Iterações (0 – 40)	20 (padrão)
Conjunto de equações	<b>SWE-ELM (original/mais rápido)</b>
Condições iniciais Tempo de aceleração (horas)	10
Fração de aumento da condição de contorno (0 a 1,0)	0,1 (padrão)
Modelo de turbulência	Nenhum (padrão)
Coeficiente de mistura longitudinal	Em branco
Coeficiente de mistura transversal	Em branco
Coeficiente de Smagorinsky	Em branco
Verificação de volume de condição de contorno	Em branco
Latitude para Coriolis (-90 a 90)	Em branco
Núcleos do Solver	Todos disponíveis
Solucionador de matrizes	PARDISO (padrão)
Tolerância de convergência	Em branco
Número mínimo de iterações	Nenhuma (opcional)
Número máximo de iterações	Nenhuma (opcional)
Coeficiente de Relaxamento	1,3 (padrão)
Reiniciar iterações	10 (padrão)
Iterações do pré-condicionador SOR	10 (padrão)

Fonte: Autora (2024).

- Coeficiente Nash-Sutcliffe *Efficiency* (NSE):

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

onde  $Q_{obs,i}$  é o valor observado no tempo  $i$ ;  $Q_{sim,i}$  é o valor simulado no tempo  $i$ ;  $\overline{Q_{obs}}$  é o valor médio dos valores observados; e  $n$  é o número total de observações.

Neste método, o valor encontrado varia de  $-\infty$  a 1, valores próximos de 1 indicam um bom ajuste do modelo aos dados observados, consoante Moriasi et al. (2007). Estes autores ainda comentam que um valor de NSE maior que 0,50 indica uma simulação satisfatória, valores entre 0,36 e 0,75 são considerados bons, e valores acima de 0,75 são considerados excelentes.

- Coeficiente  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i})^2} \quad (4)$$

Este método varia de 0 a 1, e neste caso também, valores próximos de 1 indicam um bom ajuste do modelo aos dados observados. Segundo Chicco, Warrens e Jurman (2021), o

coeficiente  $R^2$  com valores mais altos também indica menor variância de erro, sendo que, geralmente, valores superiores a 0,5 são considerados aceitáveis também neste caso.

- Coeficiente *Root Mean Square Error* (RMSE), ou seja, Erro Quadrático Médio:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

De acordo com o artigo de Chai e Draxler (2014), o valor do RMSE depende muito da variabilidade e do tamanho da amostra utilizada para cálculo. Os autores abordam que em amostras pequenas, o RMSE tende a ser menos confiável e pode não representar bem a precisão do modelo. Já em amostras maiores, eles relatam que o RMSE se estabiliza em torno do valor verdadeiro do desvio padrão dos erros, tornando-se mais robusto e representativo. De qualquer forma, para os autores, a utilização do RMSE ajuda a fornecer uma visão completa da distribuição de erros. Para Chai e Draxler (2014), o RMSE é uma métrica que penaliza erros maiores, portanto, a interpretação dos resultados nesse método deve ser feita em relação à escala dos dados e ao domínio do problema. Portanto, no caso da análise dos dados de nível d'água, erros que tendem a zero metros são considerados ótimos.

### 3.7 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Para a modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão foram considerados os efeitos de perda da precipitação, transformada do escoamento superficial, além de serem realizados procedimentos de calibração e validação do modelo (Figura 10).

Para efetivar a modelagem hidrológica foi utilizado o *software* o HEC-HMS, versão 4.12, desenvolvido pela USACE (2024). De acordo com Boitrago et al. (2023), este programa possibilita a leitura de arquivos digitais gerados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (USACE, 2024).

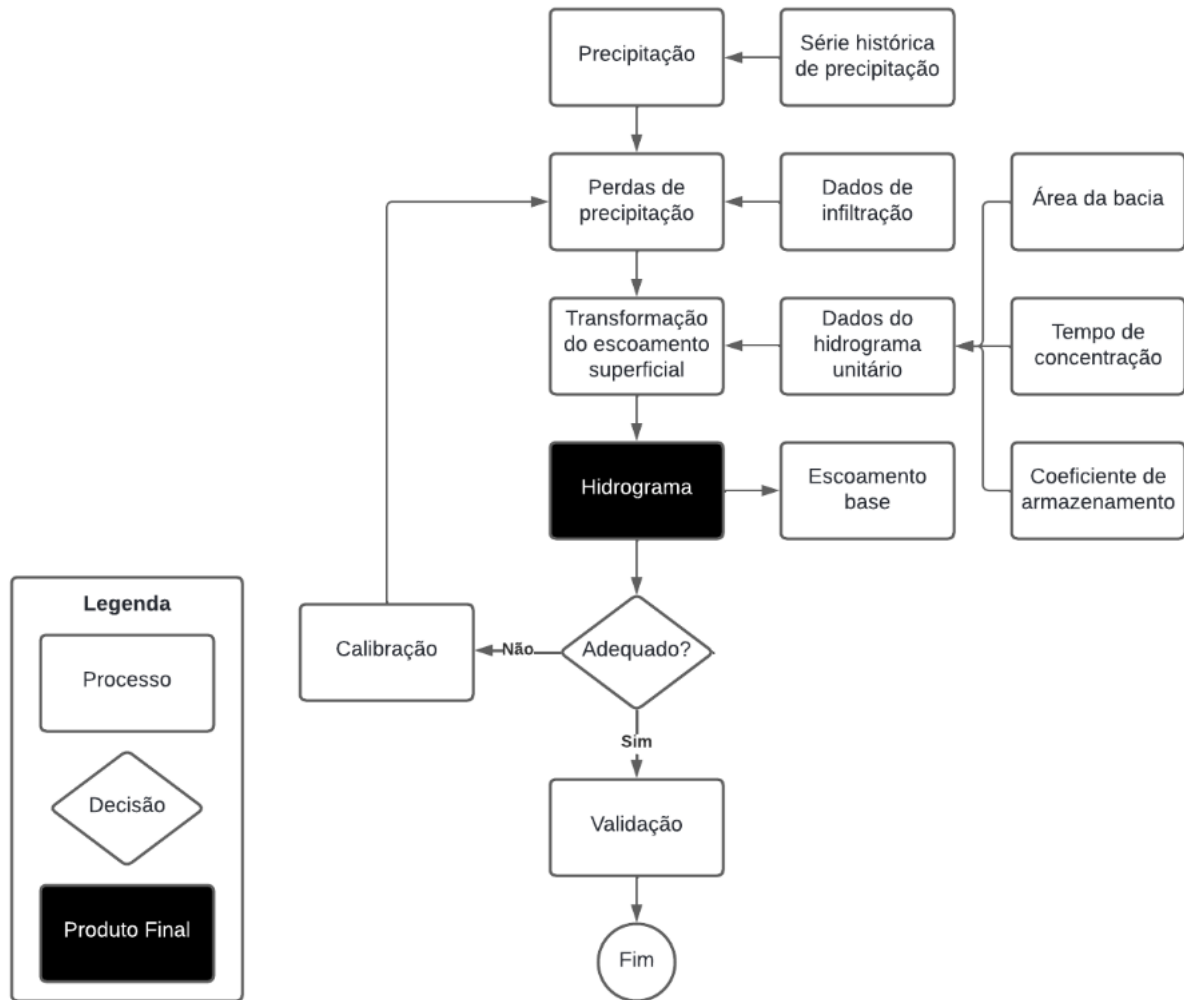
O HEC-HMS é um modelo de transformação de chuva-vazão discreto, concentrado, tanto empírico, quanto conceitual e determinístico, conforme USACE (2024).

#### 3.7.1 Discretização espacial

A discretização espacial do modelo se deu de duas formas, como segue:

- Modelo concentrado: toda a subbacia do rio Cachoeira foi considerada pontualmente, e suas características espaciais foram consideradas como médias.
- Sistema de modelos concentrados: foi realizada a divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias menores, conforme exposto no item 2.2.1 do presente trabalho, utilizando as características locais para a área da sub-bacia hidrográfica do Rio Cachoeira.

Figura 10 – Etapas para estudo e modelagem hidrológica.



Fonte: Adaptado de Monteiro e Kobiyama (2013).

Para ambos os casos, foi utilizada a mesma estação representativa da entrada de chuva no modelo.

### 3.7.2 Tempo de concentração e Coeficiente de armazenamento

Os índices de drenagem foram calculados pelo programa HEC-HMS, conforme a equação abordada no item 2.1.3. Com relação ao tempo de concentração, observando as características da bacia, em que a área da bacia é menor que  $27 \text{ km}^2$ , sendo ela correspondente a  $13,91 \text{ km}^2$  ao todo. Para o sistema de sub-bacias concentradas, optou-se pela equação de Kirpisch para sub-bacias que correspondessem aos parâmetros de aplicabilidade dela, conforme

$$t_c = 0,0633 \times L^{0,77} \times S^{-0,385}. \quad (6)$$

Para os casos enquadrados nos parâmetros descritos em 2.1.3 para a equação de Schaake, o cálculo procedeu com

$$t_c = 0,0869 \times L^{0,24} \times S^{-0,16} \times A_{imp}^{-0,26}. \quad (7)$$

Ambos os casos estão em acordo com o Plano Diretor de Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Joinville (2011). Já para o cálculo da bacia concentrada, foi utilizada a equação de Chow et al. (1962), conforme

$$t_c = 0,160L^{0,64}S^{-0,32}. \quad (8)$$

Para estimar os coeficientes de armazenamento, foi considerada a equação

$$K = 80,7 \times A^{0,23} \times S^{-0,70}. \quad (9)$$

### 3.7.3 Modelo Chuva-Vazão

A seguir, são encontrados os procedimentos para a aplicação da simulação, seja para o modelo concentrado ou para o sistema de modelos concentrados.

#### 3.7.3.1 Perdas de precipitação

A fim de obter o *Curve Number* (CN) no programa, parâmetro empírico que representa a porcentagem do solo impermeável, utilizaram-se as informações descritas por Sartori, Neto e Genovez (2005), baseadas no quadro da USACE (2023). Isso se deu a partir de um CN, variando de 0 a 100, determinado pela classificação hidrológica do solo, condições prévias de umidade e cobertura do solo, como pode ser visto nos Quadros 9 e 10. Dessa forma, a configuração do programa se deu de forma que para definir as perdas de precipitação se utilizou o método SCS *Curve Number* (CN) a partir dos dados de uso do solo.

Para as áreas abertas, foi determinado que eram áreas com menos de 50% de vegetação rasteira, dada a proximidade com a área industrial da região. Para as áreas urbanizadas, com baixa densidade, foi considerado 65% de áreas impermeáveis, para áreas de urbanização de densidade mediana, determinou-se como áreas recém-graduadas. Já para áreas mais intensamente urbanizadas, foi considerado como área impermeável pavimentada. No mais, nas áreas de florestas, foi inserido no programa como sendo 20% impermeável.

A partir desse passo, determinou-se a *Initial Abstraction* ( $I_a$ ), isto é, a quantidade de precipitação que deve cair antes que ocorra o escoamento superficial (Zheng et al., 2020). Para isso, foi necessário calcular a Retenção Potencial Máxima ( $S$ ) através de

$$S = \frac{25400}{CN} - 254. \quad (10)$$

Dessa forma, pode-se resolver a condição de  $I_a$  para zonas rurais, como

$$I_a = 0,2S. \quad (11)$$

Quadro 9 – Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.

<b>Grupo Hidrológico</b>	<b>Solo Brasileiro</b>
<b>A</b>	Latossolo Amarelo; Latossolo Vermelho; Latossolo Vermelho amarelo, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta; Latossolo Amarelo; Latossolo Vermelho amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
<b>B</b>	Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; Latossolo Bruno; Nitossolo Vermelho; Neossolo Quartzarênico; Argissolo Vermelho ou Vermelho amarelo de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança abrupta de textura. Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança abrupta de textura ou Argissolo Vermelho, Argissolo Amarelo e Argissolo Vermelho amarelo, ambos profundos e apresentam mudança abrupta de textura.
<b>C</b>	Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança abrupta de textura ou Argissolo Vermelho, Argissolo Amarelo e Argissolo Vermelho amarelo, ambos profundos e apresentam mudança abrupta de textura; Cambissolo de textura média e Cambissolo Háptico ou Húmico, mas com características físicas semelhantes aos Latossolos; Espodossolo Ferrocárbico; Neossolo Flúvico.
<b>D</b>	Neossolo Litólico; Organossolo; Gleissolo; Chemossolo; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvisolo; Plintossolo; Solos de mangue; Afloramentos de rocha; Demais Cambissolos que não se enquadram no grupo C; Argissolo Vermelho amarelo e Argissolo Amarelo, ambos pouco profundos e associados à mudança de textura abrupta.

Fonte: Adaptado de Sartori, Neto e Genovez (2005).

Para Woodward et al. (2003) e reforçado por Baltas, Dervos e Mimikou (2007), em zonas urbanas, a taxa de abstração pode ser definida pelo índice de 0,05, obtendo a formulação

$$I_a = 0.05S. \quad (12)$$

Sendo esta última, a formulação utilizada no presente trabalho.

Quadro 10 – Cobertura do solo e condição hidrológica por grupo de solo.

Cobertura			Grupo Solo Hidrológico			
Uso da Terra	Descrição	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Espaço aberto	Gramados, parques, campos de golfe, cemitérios, etc.	Pobre (<50% gramíneas)	68	79	86	89
		Justo (50% a 75% gramíneas)	49	69	79	84
		Bom (>75% gramíneas)	39	61	74	80
Áreas impermeáveis	Pavimentado	Estacionamentos, telhados, calçadas, etc	98	98	98	98
	Ruas e Estradas	Pavimentado	98	98	98	98
		Bocas-de-lobo, valas abertas	83	89	92	93
		Cascalho	76	85	89	91
		Sujeira	72	82	87	89
Áreas Urbanas do Deserto Ocidental	Deserto Natural	Apenas áreas permeáveis	63	77	85	88
	Deserto Artificial	Barreira impermeável de rafia de solo	96	96	96	96
Distritos Urbanos	Comercial/Negócios	85% Impermeável	89	92	94	95
	Industrial	72% Impermeável	81	88	91	93
Distritos Residenciais por tamanho médio do lote	2023 m <sup>2</sup> (cidade espalhada)	65% Impermeável	77	85	90	92
	4047 m <sup>2</sup>	38% Impermeável	61	75	83	87
	5445 m <sup>2</sup>	30% Impermeável	57	72	81	86
	8094 m <sup>2</sup>	25% Impermeável	54	70	80	85
	4047 m <sup>2</sup>	20% Impermeável	51	68	79	84
	8094 m <sup>2</sup>	12% Impermeável	46	65	77	82
Desenvolvimento de Áreas Urbanas	Áreas Recém-Graduadas		77	86	91	94
	Apenas áreas permeáveis		77	86	91	94
	Sem vegetação		77	86	91	94

Fonte: Adaptado de USACE (2023).

### 3.7.3.2 *Tempo de propagação de onda de cheias*

Um segmento de alcance pode ser conceituado como uma porção específica de um curso d'água, onde os cálculos são realizados utilizando métodos de propagação de ondas. Cada abordagem adotada segue princípios hidrológicos, em contraposição a métodos hidráulicos que empregam as equações completas de fluxo não permanente. Neste estudo, o método de *lag time* é utilizado para representar a translação de ondas de inundação, sem incluir os efeitos de atenuação ou difusão. Portanto, ele é mais adequado para trechos de fluxo curtos, nos quais o tempo de deslocamento permanece constante e independente da profundidade do fluxo, o que se aplica ao contexto analisado (USACE, 2024).

### 3.7.3.3 *Transformada em escoamento superficial*

Para a transformada da chuva em escoamento superficial, optou-se pelo método do *Clark Unit Hydrograph*, que utiliza valor de tempo de concentração e coeficiente de armazenamento para gerar o hidrograma unitário.

#### 3.7.3.4 *Escoamento de base*

Dado que as simulações do presente trabalho envolvem eventos curtos, considerou-se um escoamento de base (*subbasin baseflow*) constante mensalmente. Para isso, a partir da coleta dos dados em campo, foram analisadas as vazões obtidas, consideradas as nascentes presentes na área de estudo e divididas para cada local. Assim, obteve-se o escoamento base no exutório.

#### 3.7.4 **Validação e Calibração**

No presente trabalho, foi limitado o intervalo de variação dos parâmetros calibráveis para contribuir na estimativa de valores dos parâmetros compatíveis com as condições físicas reais. Para inserir as precipitações e definir a atribuição à bacia por meio do hidrograma de saída do Rio Cachoeira, define-se os eventos de interesse a partir das séries temporais.

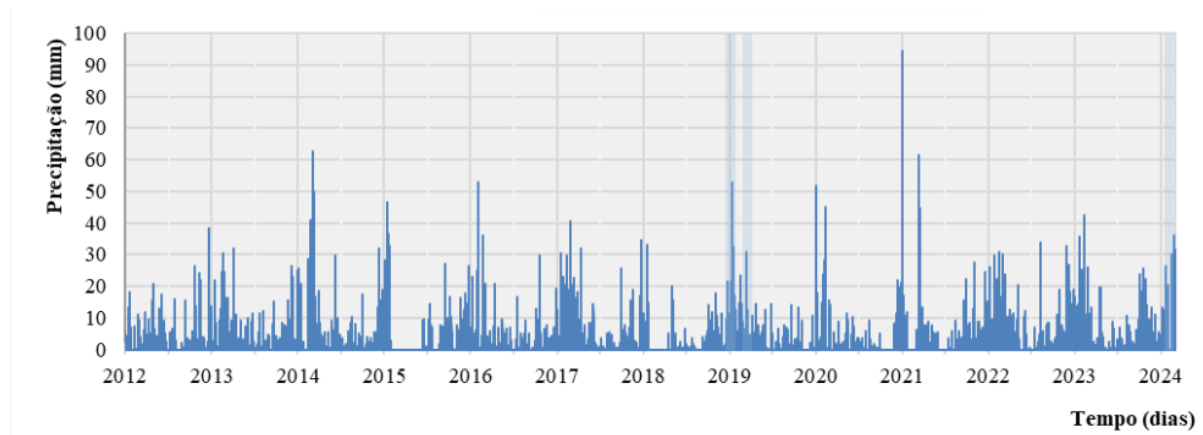
Feito isso, para se analisar os resultados da simulação, avalia-se as informações obtidas por meio dos hidrogramas. O coeficiente de Nash-Sutcliffe é utilizado para identificar qual a aproximação dos resultados obtidos com os valores observados. Nos casos onde não se obteve esses valores adequados de Nash-Sutcliffe, de acordo com Moriasi et al. (2007), caso o valor de Nash-Sutcliffe seja insatisfatório, por exemplo, abaixo de 0,3, então, o processo de otimização deve ser refeito.

Para a validação conjunta dos modelos, foram utilizados os dados de vazão obtidos com as simulações no HEC-RAS. No caso, foram comparados os hidrogramas gerados por meio do HEC-RAS entre si para selecionar os eventos que obtiveram os melhores desempenhos, assim, no HEC-HMS, foi realizada a calibração e validação do modelo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, foram analisados os anos correspondentes ao período de 2012 a 2024 da Estação Flotflux, com base nos quais foram selecionados três eventos específicos de interesse, conforme a Figura 11, onde a área em azul claro representa os eventos escolhidos para o presente estudo. O Evento 1, foi definido como do dia 12/01/2019 às 04 horas até dia 17/01/2019 às 13 horas, o Evento 2 como do dia 14/03/2019 às 04 horas até 18/03/2019 às 08 horas, já o último evento, o Evento 3 foi definido como do dia 24/02/2024 às 14 horas até dia 27/02/2024 às 02 horas da manhã.

Figura 11 – Dados das séries históricas de precipitação.



Fonte: Autora (2024).

As simulações inicialmente foram feitas para o modelo hidrodinâmico-hidrológico HEC-RAS, a fim de se obter os melhores resultados para três eventos diferentes e conseguir obter os valores de vazão para o determinado evento, para que fosse possível calibrar e validar os modelos hidrológicos. Posteriormente, foram realizadas simulações hidrológicas no HEC-HMS, utilizando os resultados de vazão do modelo hidrodinâmico-hidrológico com a finalidade de calibrar, validar o modelo e se compreender os hidrogramas gerados.

### 4.1 PARÂMETROS GERAIS

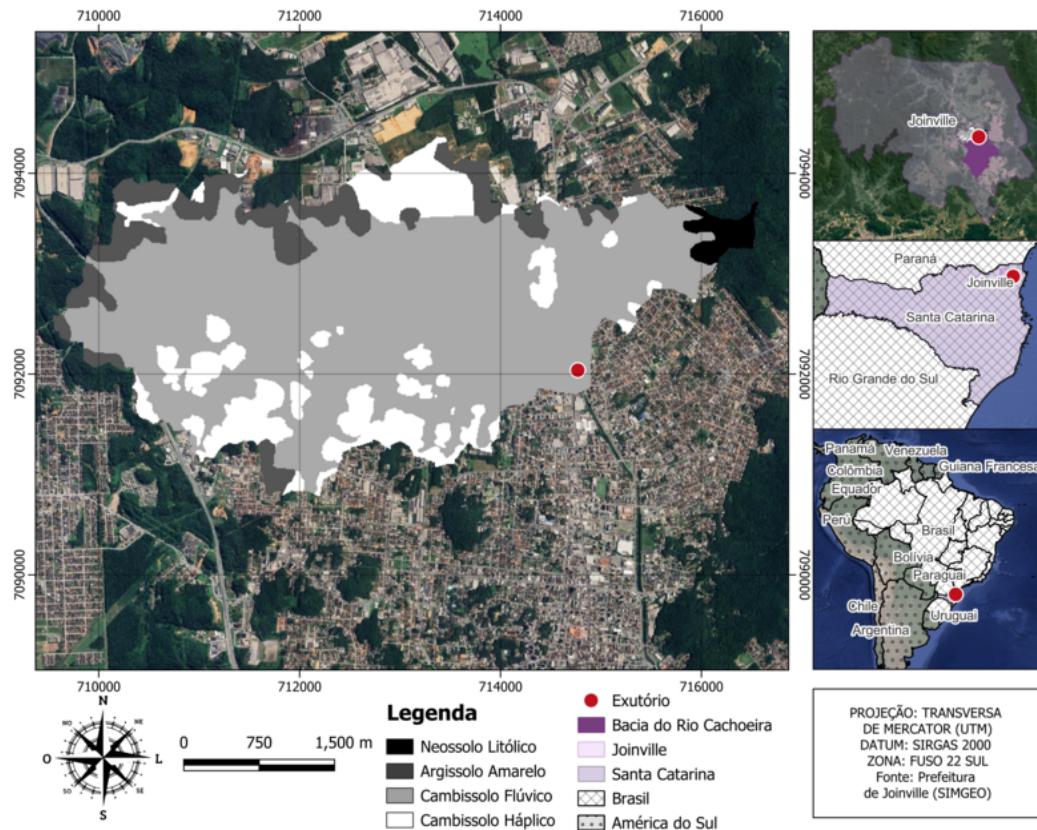
Diversos parâmetros são utilizados na modelagem hidrodinâmica-hidrológica acoplada e hidrológica concentrada. A seguir são apresentados os parâmetros utilizados para ambos os modelos.

#### 4.1.1 Dados pedológicos

Em relação aos dados pedológicos, encontraram-se na bacia de estudo os seguintes tipos de solo: neossolo litólico, cambissolo háptico, cambissolo flúvico e argissolo amarelo, de acordo com o ilustrado na Figura 12.



Figura 12 – Mapa Pedológico.



Fonte: Autora (2024).

#### 4.1.2 Uso do solo: número de Manning e CN

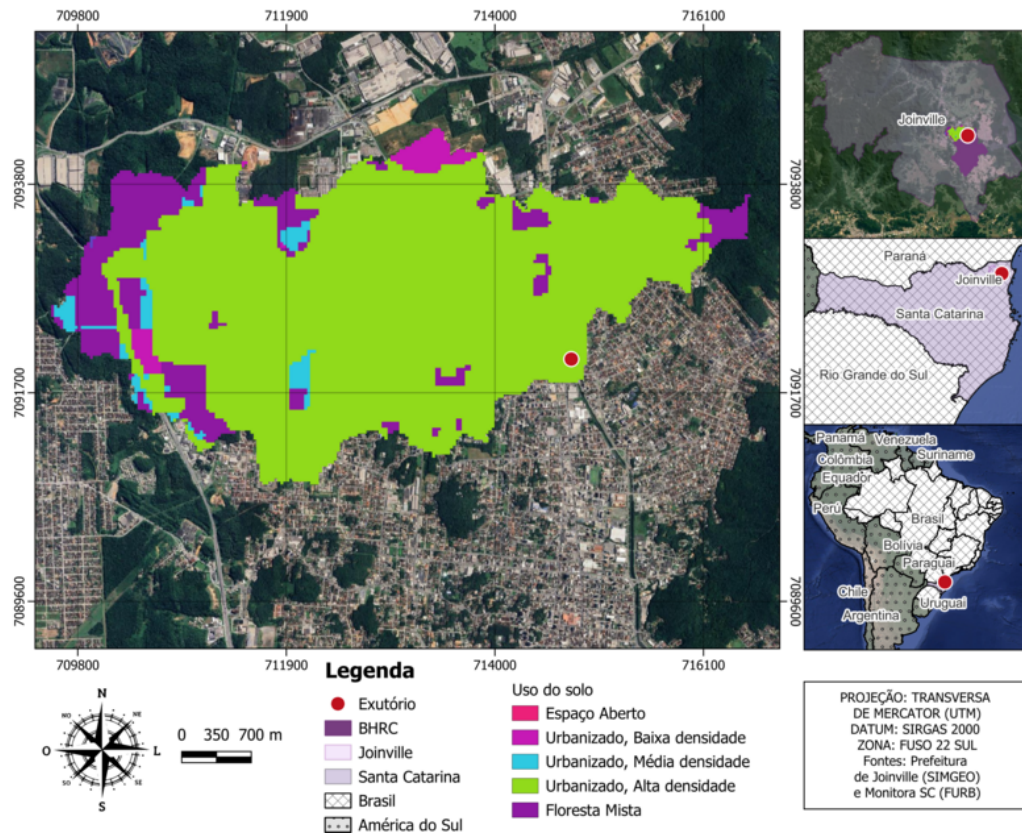
Foram considerados os dados do uso do solo, que podem ser vistos na Figura 13. Com isso, foram obtidos os números de Manning, baseados no Quadro 6 e os coeficientes CN (Tabela 3), observando os dados disponibilizados pela prefeitura de Joinville, que classifica os solos como tipo C para todas as regiões, conforme o Quadro 9. A partir disso, realizou-se o procedimento de acordo com cada classificação presente no Quadro 10.

Tabela 3 – Coeficientes de Manning e de CN.

Classificação da área	Manning (n)	CN
<i>Espaço aberto</i>	0,04	86
<i>Urbanizado, Baixa densidade</i>	0,09	90
<i>Urbanizado, Média densidade</i>	0,12	91
<i>Urbanizado, Alta densidade</i>	0,16	98
<i>Floresta Mista</i>	0,14	79

Fonte: Autora (2024).

Figura 13 – Mapa de uso do solo.



Fonte: Autora (2024).

#### 4.1.3 Perdas de precipitação

Para determinar as perdas de precipitação, como o caso da infiltração, foi realizado o equacionamento descrito em 3.7.3.1, que resultou nos dados presentes na Tabela 4, relacionado a aplicação do método de perdas SCS-CN.

Tabela 4 – Dados de infiltração.

Classificação	CN	S	Ia
Espaço aberto	86	41,35	8,27
Urbanizado, Baixa densidade	90	28,22	5,64
Urbanizado, Média densidade	91	25,12	5,02
Urbanizado, Alta densidade	98	5,18	1,04
Floresta Mista	79	67,52	13,50

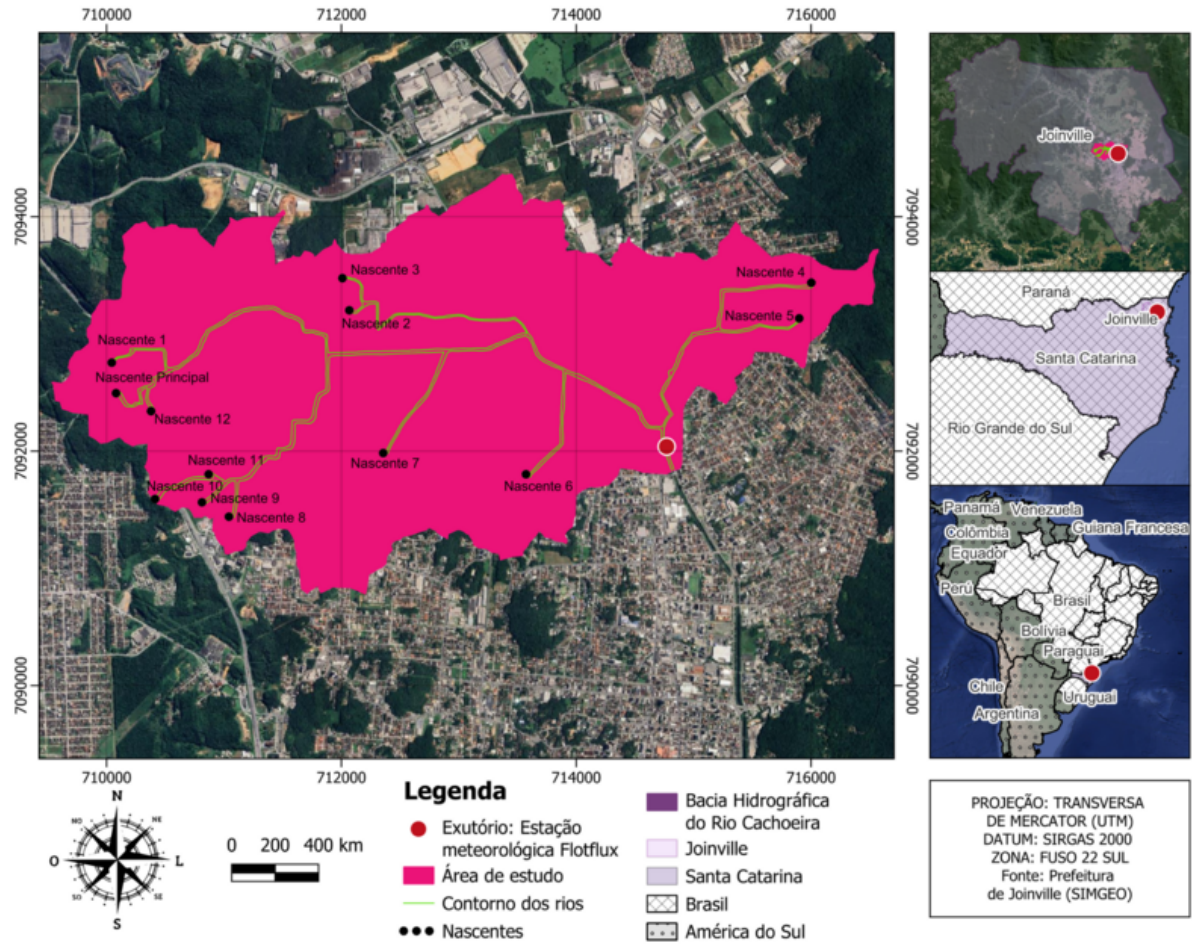
Fonte: Autora (2024).

#### 4.1.4 Declividades

Para se obter os valores do tempo de concentração e coeficiente de armazenamento, utilizados na transformada do modelo hidrológico concentrado, foram determinadas as declividades da bacia através dos dados altimétricos do MDT, relacionando cada nascente com o exutório

considerado, como pode ser visto na Figura 14. Sendo assim, as declividades médias do leito de todos os pontos, bem como as alturas de referência, estão dispostas na Tabela 5.

Figura 14 – Mapa de determinação das nascentes.



Fonte: Autora (2024).

#### 4.1.4.1 Vazão de base

Como proposto no item 3.4, as vazões de base foram medidas em dias secos (Tabela 6), ou seja, em que não foram observadas chuvas nos últimos 2 dias. A partir desses dados, gerou-se uma vazão de base média.

Nos modelos hidrodinâmico-hidrológico e hidrológico concentrado, esta vazão de base média foi dividida entre o número de nascentes consideradas (hidrodinâmico-hidrológico) ou entre o número de sub-bacias consideradas (hidrológico concentrado). Para o modelo hidrodinâmico-hidrológico cada nascente foi alimentada com uma vazão de base e constante de  $0,026 \text{ m}^3/\text{s}$  para todos os eventos e no modelo hidrológico concentrado o valor da vazão de base foi de  $0,338 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tabela 5 – Declividades.

<b>Descrição</b>	<b>Altura 1<sup>1</sup></b> (m)	<b>Altura 2<sup>2</sup></b> (m)	<b>Diferença</b> (m)	<b>Distância</b> (m)	<b>Declividade</b> (m/m)
Nascente Principal	25,055	14,132	10,922	5086	0,0021
Nascente 1	61,608	14,132	47,476	5084	0,0093
Nascente 2	17,081	15,610	1,472	3406	0,0004
Nascente 3	21,075	15,610	5,465	3472	0,0016
Nascente 4	91,589	18,022	73,567	2165	0,0340
Nascente 5	113,182	33,001	80,181	2087	0,0384
Nascente 6	15,323	6,646	8,677	1328	0,0065
Nascente 7	22,863	9,894	12,969	3128	0,0041
Nascente 8	34,003	11,556	22,447	3843	0,0058
Nascente 9	18,636	11,556	7,079	4037	0,0018
Nascente 10	33,140	11,556	21,583	4382	0,0049
Nascente 11	22,498	11,556	10,941	4105	0,0027
Nascente 12	32,509	14,132	18,377	4798	0,0038
Exutório	1,121	0,711	0,410	5085	0,0001

1 - Altura da condição de contorno considerada na descrição.

2 - Altura da cota de um ponto qualquer do rio na vizinhança do local da condição de contorno.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 6 – Vazão média das medições em dias sem chuva.

<b>Data da medição</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão encontrada (<math>m^3/s</math>)</b>
30/07/2024	11:45	0,552564
02/08/2024	9:27	0,350173
06/08/2024	15:40	0,101680
08/08/2024	10:35	0,227414
09/08/2024	9:30	0,544371
13/08/2024	11:06	0,255014

Fonte: Autora (2024).

#### 4.1.4.2 Condições Meteorológicas

Feito o escoamento base, realizou-se a simulação de cada evento a partir da inserção de dados pluviométricos horários da estação Flotflux. A Tabela 7 apresenta esses valores da precipitação máxima inserida para a estação meteorológica em cada evento. Já, a Tabela 8 apresenta aos dados observados de níveis máximos pela mesma estação. Por fim, para a conferência de todos os valores de precipitação e nível dos Eventos 1, 2 e 3, estão descritos nos Apêndices A, B e C, respectivamente.



Tabela 7 – Lâminas d'água máximas para cada evento.

<b>Evento</b>	<b>Chuva máxima</b>
Evento 1	52,93 mm
Evento 2	30,71 mm
Evento 3	36,07 mm

Fonte: Autora (2024).

Tabela 8 – Níveis mínimos e máximos do rio para cada evento.

<b>Evento</b>	<b>Nível mínimo</b>	<b>Nível máximo</b>
Evento 1	1,12 m	4,36 m
Evento 2	1,11 m	4,26 m
Evento 3	0,01 m	3,01 m

Fonte: Autora (2024).

## 4.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA-HIDROLÓGICA ACOPLADA

No modelo HEC-RAS, o primeiro passo consistiu em inserir a geometria 2D, de acordo com o perímetro de interesse. Dessa maneira, foram criadas linhas de contorno de borda das regiões de entrada de água, isto é, as nascentes. Nesse caso, analisando os dados hidrográficos, implementaram-se as principais nascentes catalogadas, incluindo a nascente principal da bacia de estudo. No entanto, não foram colocadas todas elas, e desconsiderou-se, assim, os menores afluentes do rio.

As informações de uso, ocupação do solo, pedologia e MDT também foram inseridas no modelo. A infiltração neste modelo foi considerada utilizando as informações de solo, de acordo com o que foi visto anteriormente. Esta consistiu em um dos principais dados da bacia para o processamento dos seus parâmetros, dado que se definiram os CNs a partir dela. Concluiu-se que a bacia, praticamente em sua totalidade, estava contida em um ambiente urbano e, por consequência, pouco permeável. A seguir são discutidos acerca dos procedimentos de preparação e resultados destas simulações.

### 4.2.1 Simulação de escoamento não permanente

Os eventos simulados foram separados em um tópico para cada evento e abordados a seguir. Os resultados consideram a precipitação também na condição inicial dos eventos. Esta implementação foi realizada devido à necessidade de incluir um escoamento prévio, além do escoamento base, uma vez que o MDT apresenta irregularidades que podem armazenar água e, por vezes, não correspondem precisamente à realidade. Portanto, para ajustar essas discrepâncias e representar melhor a distribuição da água no modelo, foi adotada uma condição inicial para cada evento. O Quadro 11 apresenta um resumo das simulações, diferenciando cada evento analisado.

Quadro 11 – Resumo das simulações.

Nomenclatura dos eventos	Malha ( $m^2$ )	Declive da profundidade ( $m/m$ )
Evento 1.1	25x25	0,001
Evento 1.2	25x25	0,0001
Evento 1.3	50x50	0,001
Evento 1.4	50x50	0,0001
Evento 2.1	25x25	0,001
Evento 2.2	25x25	0,0001
Evento 2.3	50x50	0,001
Evento 2.4	50x50	0,0001
Evento 3.1	25x25	0,001
Evento 3.2	25x25	0,0001
Evento 3.3	50x50	0,001
Evento 3.4	50x50	0,0001

Fonte: Autora (2024).

Para validar os modelos hidrodinâmicos, verificou-se a necessidade de aplicar um coeficiente arbitrário para ajustar a variação da altura dos níveis obtidos pelo programa nos casos em que surgem discrepâncias na representação gráfica dos dados. Esse erro é atribuído a uma divergência entre a referência de base da estação e a base do MDT. Como a estação foi modificada ao longo do tempo e, posteriormente, desativada, não há como verificar no local o nível de base original da estação, impossibilitando uma validação precisa dos dados coletados sem a adição deste coeficiente. Logo, para todos os resultados gerados, realizou-se esse ajuste e, assim, foram obtidos os índices de verificação de erros. Para realizar a comparação dos dados, foi adicionada uma constante arbitrária em cada ponto do gráfico a fim de minimizar a diferença de nível gerada pelo modelo hidrodinâmico. Cada altura arbitrada para o ajuste do nível pode ser visualizada na Tabela 9, sendo negativas aquelas em que o gráfico precisou diminuir a altura do nível para gerar sua compatibilidade.

Tabela 9 – Alturas arbitradas para ajustes da simulação.

Evento	Evento 1.1	Evento 1.2	Evento 1.3	Evento 1.4
Altura arbitrada (m)	-0,2	-0,8	-0,3	-0,8
Evento	Evento 2.1	Evento 2.2	Evento 2.3	Evento 2.4
Altura arbitrada (m)	-0,3	-1,0	-0,3	-1,0
Evento	Evento 3.1	Evento 3.2	Evento 3.3	Evento 3.4
Altura arbitrada (m)	-1,7	-2,5	-1,7	-2,5

Fonte: Autora (2024).

#### 4.2.1.1 *Evento 1*

Para o Evento 1, existem pontos críticos em que é importante que seja feita uma comparação entre os dados observados e simulados de forma mais direta. Estes pontos são: no dia 13/01/2019 à meia-noite; no dia 14/01/2019 às 16 horas; e no mesmo dia às 17 horas. Sendo assim, para sintetizar os níveis de água registrados em todos os testes do Evento 1, foi realizada a Tabela 10, com as informações dos dados observados e simulados em suas respectivas datas e horas de acontecimento. Dessa forma, a Figura 15, mostra um comparativo dos gráficos de todos os eventos, onde os gráficos das mesmas ores tem a mesma declividade considerada no exutório. Os resultados obtidos para este evento estão expressos na Tabela 11.

O Evento 1.1 não apresentou grandes diferenças entre os dados simulados e observados, o que gerou um índice de erro de excelente desempenho com base nas métricas utilizadas (Moriasi et al., 2007) para todos os métodos, sendo o método RMSE, obteve o menor valor de todas as simulações para a diferença de altura.

No Evento 1.2, com relação aos erros calculados, observa-se que a diferença entre os valores previstos e os valores observados pelo RMSE deu 0,43 metros, que é uma diferença um pouco maior que no Evento 1.1, mas continua sendo um bom resultado, até mesmo por conta dos demais índices, considerados como excelentes, conforme Moriasi et al. (2007).

O Evento 1.3 representa a melhor simulação rodada para o Evento 1 e, posteriormente, utilizada para calibração no HEC-HMS. A verificação dos erros calculados demonstrou os melhores índices dentre todos os eventos, com uma diferença de apenas 18 centímetros entre ambos os dados pelo RMSE, também classificado como excelente para os demais métodos de averiguação de erro.

Para o Evento 1.4, notam-se que os resultados e as análises feitas para o Evento 1.2 foram as mesmas para este evento, até mesmo a análise dos erros obtidos foi a mesma, ainda que se diferenciasse na malha, dado que este evento contempla uma malha de 50 metros x 50 metros fora do rio.

Tabela 10 – Dados de níveis d'água do Evento 1.

<b>Evento 1.1</b>	
<i>Dados observados</i>	<i>Dados simulados</i>
13/01/2019 00:00:00	
4,36 metros	4,48 metros
14/01/2019 16:00:00	14/01/2019 17:00:00
3,38 metros	3,97 metros
<b>Evento 1.2</b>	
13/01/2019 00:00:00	13/01/2019 01:00:00
4,36 metros	4,80 metros
14/01/2019 16:00:00	14/01/2019 17:00:00
3,38 metros	4,32 metros
<b>Evento 1.3</b>	
13/01/2019 00:00:00	
4,36 metros	4,39 metros
14/01/2019 16:00:00	14/01/2019 17:00:00
3,38 metros	3,85 metros
<b>Evento 1.4</b>	
13/01/2019 00:00:00	13/01/2019 01:00:00
4,36 metros	4,80 metros
14/01/2019 16:00:00	14/01/2019 17:00:00
3,38 metros	4,32 metros

Fonte: Autora (2024).

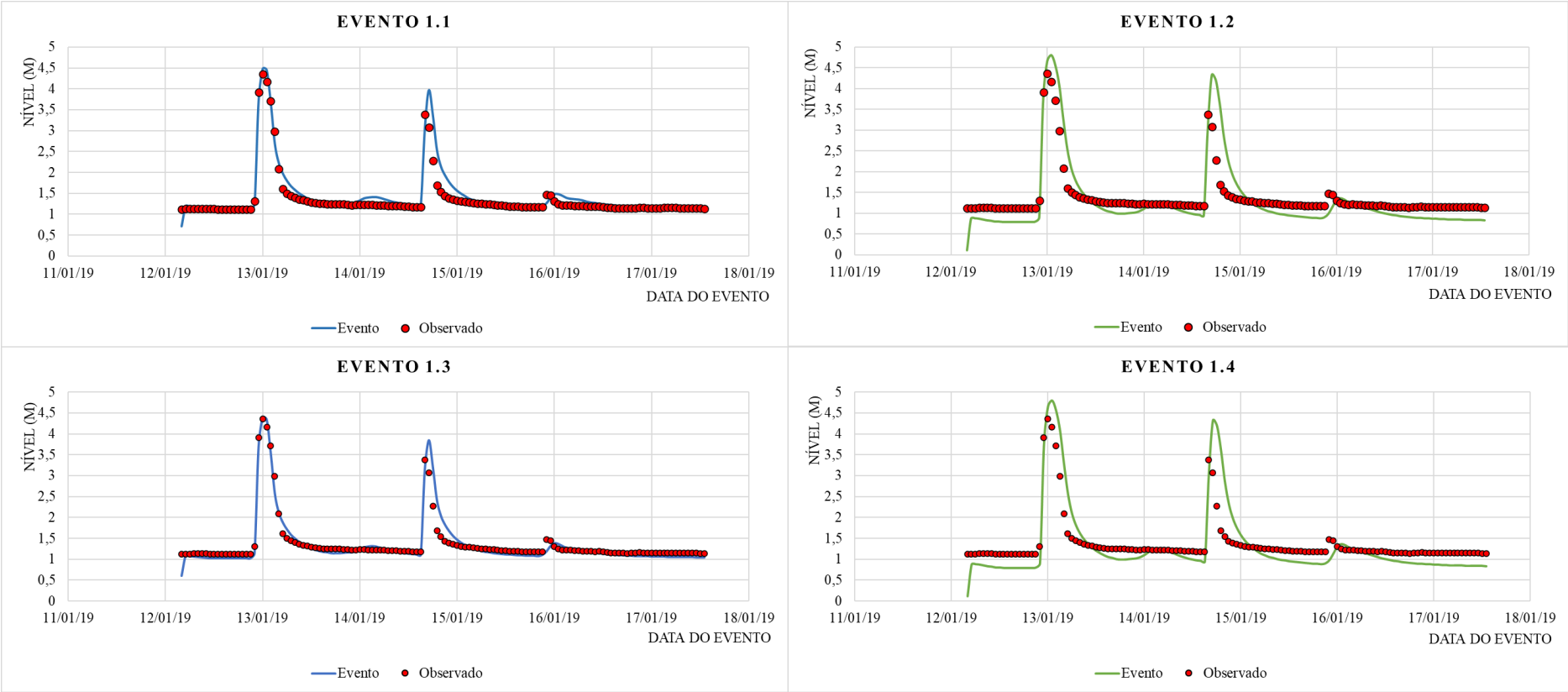
Tabela 11 – Verificação do erro para a simulação do Evento 1.

<b>Evento</b>	<b>NSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE (m)</b>
<b>Evento 1.1</b>	0,98	0,92	0,20
<b>Evento 1.2</b>	0,89	0,81	0,43
<b>Evento 1.3</b>	0,98	0,93	0,18
<b>Evento 1.4</b>	0,89	0,81	0,43

Fonte: Autora (2024).



Figura 15 – Representação gráfica do Evento 1. Na esquerda superior apresenta-se o Evento 1.1; na direita superior é apresentado o Evento 1.2; na esquerda inferior mostra-se o Evento 1.3; e na direita inferior é mostrado o Evento 1.4.



Fonte: Autora (2024).

#### 4.2.1.2 Evento 2

No Evento 2, o primeiro pico ocorreu em 15/03/2019, às 05h, com um valor observado de 4,26 metros. O segundo pico foi registrado em 16/03/2019, às 13h, pela estação Flotflux, apresentando um valor de 1,86 metros. Já na simulação, conforme mostrado na Tabela 12, é possível observar os níveis alcançados e os respectivos horários de ocorrência para todos os casos do Evento 2. Além disso, para todos os casos, apresenta-se o gráfico do Evento 2, na Figura 16. Os resultados gerados para o evento estão representados na Tabela 13.

Tabela 12 – Dados de níveis d'água do Evento 2.

<b>Evento 2.1</b>	
<i>Dados observados</i>	<i>Dados simulados</i>
15/03/2019 05:00:00	
4,26 metros	4,09 metros
16/03/2019 13:00:00	16/03/2019 14:00:00
1,86 metros	3,10 metros
<b>Evento 2.2</b>	
15/03/2019 05:00:00	
4,26 metros	4,54 metros
16/03/2019 13:00:00	16/03/2019 14:00:00
1,86 metros	3,49 metros
<b>Evento 2.3</b>	
15/03/2019 05:00:00	
4,26 metros	4,09 metros
16/03/2019 13:00:00	16/03/2019 14:00:00
1,86 metros	3,08 metros
<b>Evento 2.4</b>	
15/03/2019 05:00:00	15/03/2019 06:00:00
4,26 metros	4,61 metros
16/03/2019 13:00:00	16/03/2019 14:00:00
1,86 metros	3,65 metros

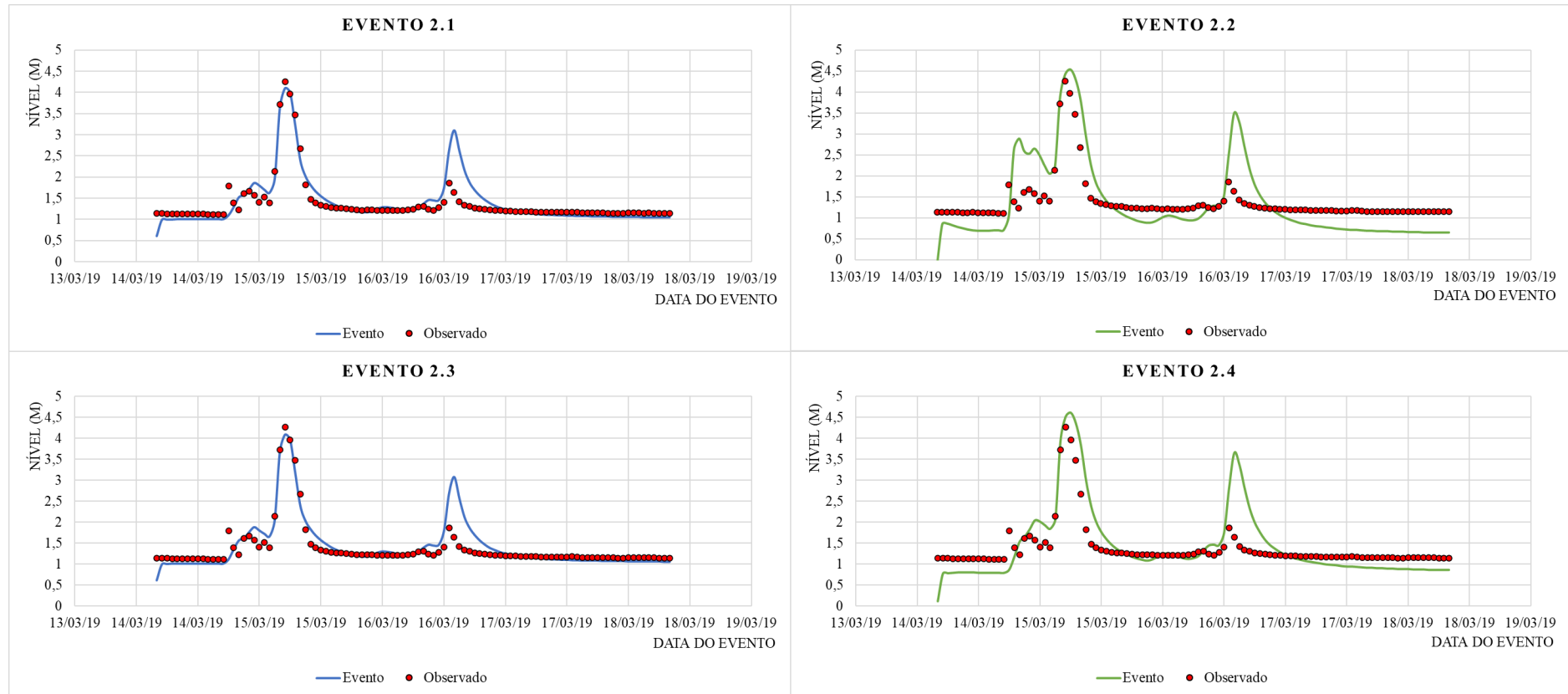
Fonte: Autora (2024).

Tabela 13 – Verificação do erro para a simulação do Evento 2.

<b>Evento</b>	<b>NSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE (m)</b>
<b>Evento 2.1</b>	0,96	0,80	0,28
<b>Evento 2.2</b>	0,75	0,66	0,60
<b>Evento 2.3</b>	0,96	0,80	0,28
<b>Evento 2.4</b>	0,85	0,72	0,50

Fonte: Autora (2024).

Figura 16 – Representação gráfica do Evento 2. Na esquerda superior apresenta-se o Evento 2.1; na direita superior é apresentado o Evento 2.2; na esquerda inferior mostra-se o Evento 2.3; e na direita inferior é mostrado o Evento 2.4.



Fonte: Autora (2024).

O resultado correspondente ao Evento 2.1 gerou uma diferença de 0,28 metros para o RMSE, o que ainda é considerado satisfatório. Paralelamente a isso, os demais resultados deram excelentes, segundo a verificação dos erros calculados. Com isso, dentre as simulações para o Evento 2, essa foi a que se comportou melhor, levando em conta a malha utilizada como critério de desempate, dado que uma malha mais refinada processa informações mais precisas.

A análise do Evento 2.2 demonstra, para os erros calculados, um resultado excelente para o método do NSE, sendo 0,75 (segundo pior de todos os eventos), um resultado considerado bom no método  $R^2$ , com 0,66 (pior entre os eventos), e, para o RMSE, 60 centímetros de diferença entre os dados observados e simulados, representando a maior diferença de nível entre os eventos. Sendo assim, foi o evento que apresentou, em geral, os piores resultados dentre todos os demais.

O Evento 2.3 apresenta uma verificação de erros com resultados excelentes e pouca diferença entre os dados analisados. No caso do Evento 2.4, o resultado se deu como excelente no NSE, bom no  $R^2$  e de diferença aceitável no RMSE, com 50 centímetros.

Uma hipótese para explicar a discrepância no segundo pico do evento pode ter ocorrido por uma chuva concentrada, dentro do modelo simulado, próximo à estação pluviométrica que não foi efetivada no resto da bacia. Um terceiro evento de avaliação pode auxiliar a compreender se esta hipótese pode ser válida.

#### 4.2.1.3 Evento 3

Nesse evento, percebe-se a presença de um pico logo no início do evento, atingindo 2,64 metros de dados observados no dia 24/02/2024 às 17 horas. No segundo pico, dia 24/02/2024, às 23 horas, foram 3,01 metros observados. O último pico se deu dia 25/02/2024 às 16 horas, com 2,25 metros observados na estação meteorológica. Os demais resultados podem ser vistos na Tabela 14, bem como os gráficos referentes a este evento na Figura 17. Já para os resultados, a Tabela 15 apresenta o que foi gerado.

Para o Evento 3.1, com a verificação dos erros explicitada, notou-se que os resultados foram excelentes em ambos os casos e a diferença entre os dados foi baixa.

No contexto do Evento 3.2, a análise dos erros, que apresenta o pior resultado no NSE, gerando um valor de 0,24, considerado inaceitável e um dos maiores valores de erro quadrático médio. Porém, observa-se um excelente resultado para o método  $R^2$ . Com isso, nota-se que este evento foi o pior dentre todos os demais.

Referente ao Evento 3.3, as métricas de desempenho confirmam a qualidade da simulação: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação  $R^2$  indicaram uma excelente precisão. O erro médio quadrático (RMSE) sugeriu variação mínima entre os valores observados e simulados, reforçando a eficácia do modelo na previsão dos picos de vazão.

Enquanto isso, no Evento 3.4, as métricas de desempenho mostram que o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) configurou uma boa precisão, e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) demonstrou que o modelo é razoavelmente eficaz, embora com espaço para melhorias. O erro médio quadrático (RMSE) deu uma diferença um pouco mais acentuada entre os valores

observados e simulados em relação ao esperado, sendo classificado como o pior RMSE dentre todas as simulações feitas.

Tabela 14 – Dados de níveis d'água do Evento 3.

<b>Evento 3.1</b>	
<i>Dados observados</i>	<i>Dados simulados</i>
24/02/2024 17:00:00	
2,64 metros	2,66 metros
24/02/2024 11:00:00	25/02/2024 00:00:00
3,01 metros	2,74 metros
25/02/2024 16:00:00	
2,25 metros	
<b>Evento 3.2</b>	
24/02/2024 17:00:00	24/02/2024 18:00:00
2,64 metros	2,80 metros
24/02/2024 11:00:00	
3,01 metros	
25/02/2024 16:00:00	
2,25 metros	2,61 metros
<b>Evento 3.3</b>	
24/02/2024 17:00:00	
2,64 metros	2,64 metros
24/02/2024 11:00:00	25/02/2024 00:00:00
3,01 metros	2,72 metros
25/02/2024 16:00:00	
2,25 metros	2,27 metros
<b>Evento 3.4</b>	
24/02/2024 17:00:00	24/02/2024 18:00:00
2,64 metros	2,40 metros
24/02/2024 11:00:00	25/02/2024 00:00:00
3,01 metros	2,97 metros
25/02/2024 16:00:00	
2,25 metros	2,69 metros

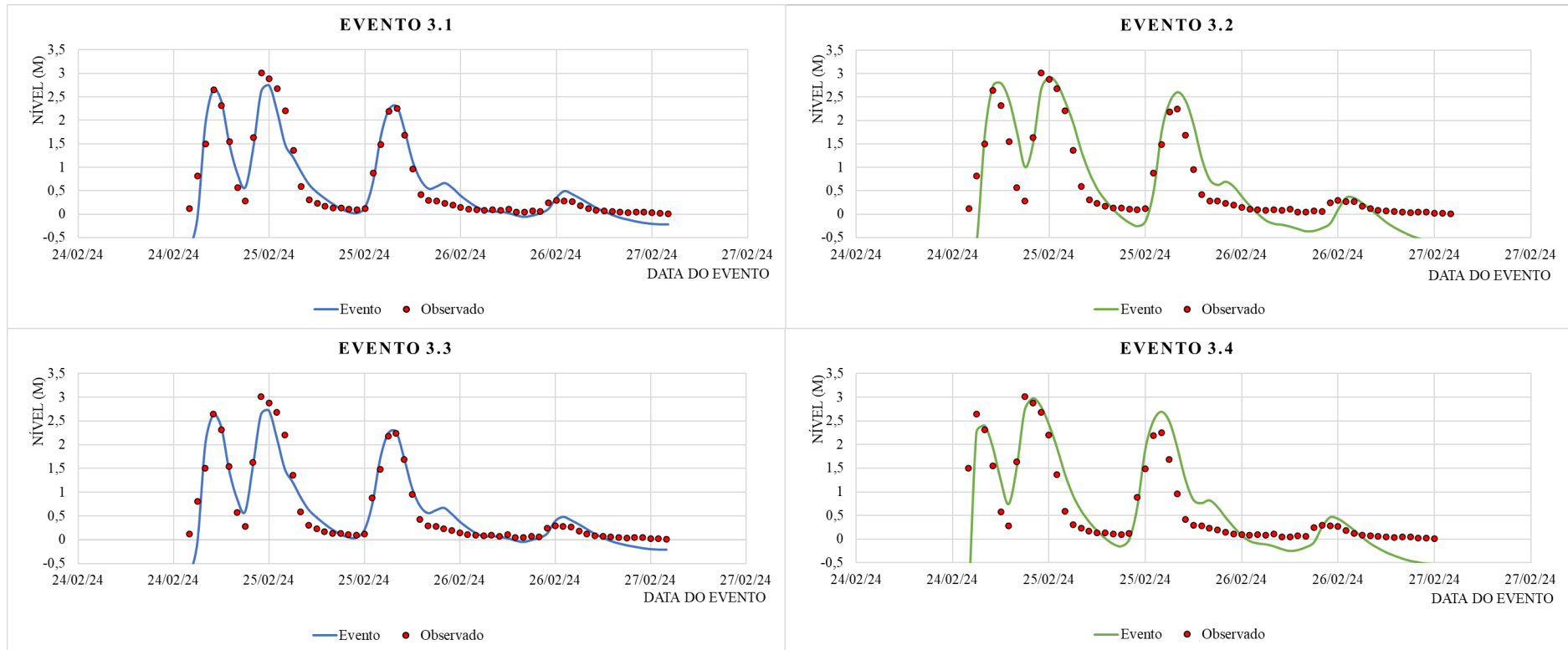
Fonte: Autora (2024).

Tabela 15 – Verificação do erro para a simulação do Evento 3.

<b>Evento</b>	<b>NSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE (m)</b>
<b>Evento 3.1</b>	0,78	0,90	0,27
<b>Evento 3.2</b>	0,24	0,81	0,52
<b>Evento 3.3</b>	0,78	0,90	0,27
<b>Evento 3.4</b>	0,79	0,73	0,55

Fonte: Autora (2024).

Figura 17 – Representação gráfica do Evento 3. Na esquerda superior apresenta-se o Evento 3.1; na direita superior é apresentado o Evento 3.2; na esquerda inferior mostra-se o Evento 3.3; e na direita inferior é mostrado o Evento 3.4.



Fonte: Autora (2024).

#### 4.2.1.4 Análise geral das simulações hidrodinâmicas

A utilização do método da equação das águas rasas descrito por Euler e Lagrange se provou mais demorada do que o *Diffusion Wave*, para as condições iniciais, mesmo que já fosse previsto conforme no item 3.6. Percebeu-se uma diferença de aproximadamente 2 horas na simulação, enquanto o primeiro levou aproximadamente 5 horas por simulação, o outro, respectivamente, levou 3 horas. Com todos os dados observados, foi possível analisar a modelagem hidrológica-hidrodinâmica de forma acoplada a partir dos resultados mais satisfatórios pelas análises dos erros. Portanto, os eventos que obtiveram a melhor performance para dar continuidade a essa análise foram: o *Evento 1.3*; o *Evento 2.1*, e; o *Evento 3.1*. Os eventos selecionados têm declividade de fundo da condição normal de  $0,001\text{ m/m}$  e duas delas possuem malha  $25 \times 25$ , enquanto uma possui malha  $50 \times 50$ .

### 4.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA: SISTEMA DE MODELOS CONCENTRADOS

No HEC-HMS, foram realizadas as simulações com modelos concentrados e sistema de modelos concentrados. Determinaram-se alguns parâmetros, de acordo com o que foi preconizado anteriormente, considerando as perdas de precipitação (Item 3.7.3.1), a transformada em escoamento superficial (Item 3.7.3.3) e o escoamento de base (Item 3.7.3.4). Assim, foi processada a área drenada e delimitada a bacia dentro do próprio programa, resultando na divisão ilustrada na Figura 18.

Consoante à Tabela 17, determinaram-se os tempos de concentração da sub-bacia, bem como seus respectivos coeficientes de armazenamento para a bacia cujas características são demonstradas na Tabela 16. Conforme abordado no item 2.1.2, foi feita a análise do formato da bacia, como exposto na Tabela 18, o que demonstrou que as sub-bacias não chegam a ser alongadas, mas também não são circulares. Ou seja, o pico de cheia poderia ser ainda mais agravado se fossem mais circulares, de acordo com Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015). De qualquer forma, considera-se que estas bacias têm uma resposta hidrológica rápida.

Foram utilizados os valores das precipitações disponibilizadas pela Flotflux para os eventos simulados, a fim de se inserirem como dados de entrada no HEC-HMS. O Evento 1 foi utilizado como evento a ser calibrado, o Evento 2 foi a primeira validação e utilizou-se o Evento 3 como uma segunda validação, como uma prova extra de que, para situações semelhantes, a metodologia aplicada é funcional. Além disso, através dos dados processados no HEC-RAS, obtiveram-se as vazões através das informações de nível observadas.

As simulações hidrológicas utilizaram as mesmas informações do que o HEC-RAS, como o formato de bacia hidrográfica, os dados de perdas e os dados de escoamento de base.

Tabela 16 – Características de Sub-bacias.

Parâmetros	B3	B4	B5	B6	B1	B7	B8	B2	B9
<i>Comprimento do rio principal (km)</i>	3,326	2,822	2,746	1,788	2,86952	1,488	3,293	3,244	0,368
<b>Declividade do rio principal (m/m)</b>	0,01658	0,01499	0,01148	0,01579	0,01573	0,01025	0,01066	0,05093	0,01126
<i>Comprimento do rio principal</i>	1,460	1,299	1,273	0,648	0,731	0,684	1,534	1,570	0,073
<i>Centróide (km)</i>									
<b>Declividade do rio principal</b>	0,00386	0,00386	0,00470	0,00284	0,00404	0,00606	0,00240	0,00397	0,01173
<b>Centróide (m/m)</b>									
<i>Comprimento do rio principal</i>	2,494	2,117	2,059	1,341	2,151	1,116	2,470	2,433	0,276
<i>10-85 (km)</i>									
<b>Declividade do rio principal 10-85 (m/m)</b>	0,00405	0,00856	0,00355	0,00646	0,00541	0,00747	0,00549	0,02939	0,01478
<i>Declividade da Bacia (m/m)</i>	0,12601	0,08830	0,10800	0,07085	0,08279	0,05212	0,08228	0,10685	0,05573
<b>Relevo da Bacia (m)</b>	89,933	45,521	48,762	37,635	53,309	31,283	49,798	165,744	4,731
<i>Relação de Relevo</i>	0,02704	0,01613	0,01776	0,02105	0,01858	0,02102	0,01512	0,05109	0,01286
<b>Relação de Elongação</b>	0,54305	0,53275	0,55986	0,42370	0,53700	0,52516	0,47831	0,47900	0,64082
<i>Densidade de Drenagem (km/km<sup>2</sup>)</i>	0,71123	0,42166	0,50416	2,29489	0,11425	1,55180	0,55118	0,53119	3,57301

Fonte: Autora (2024).

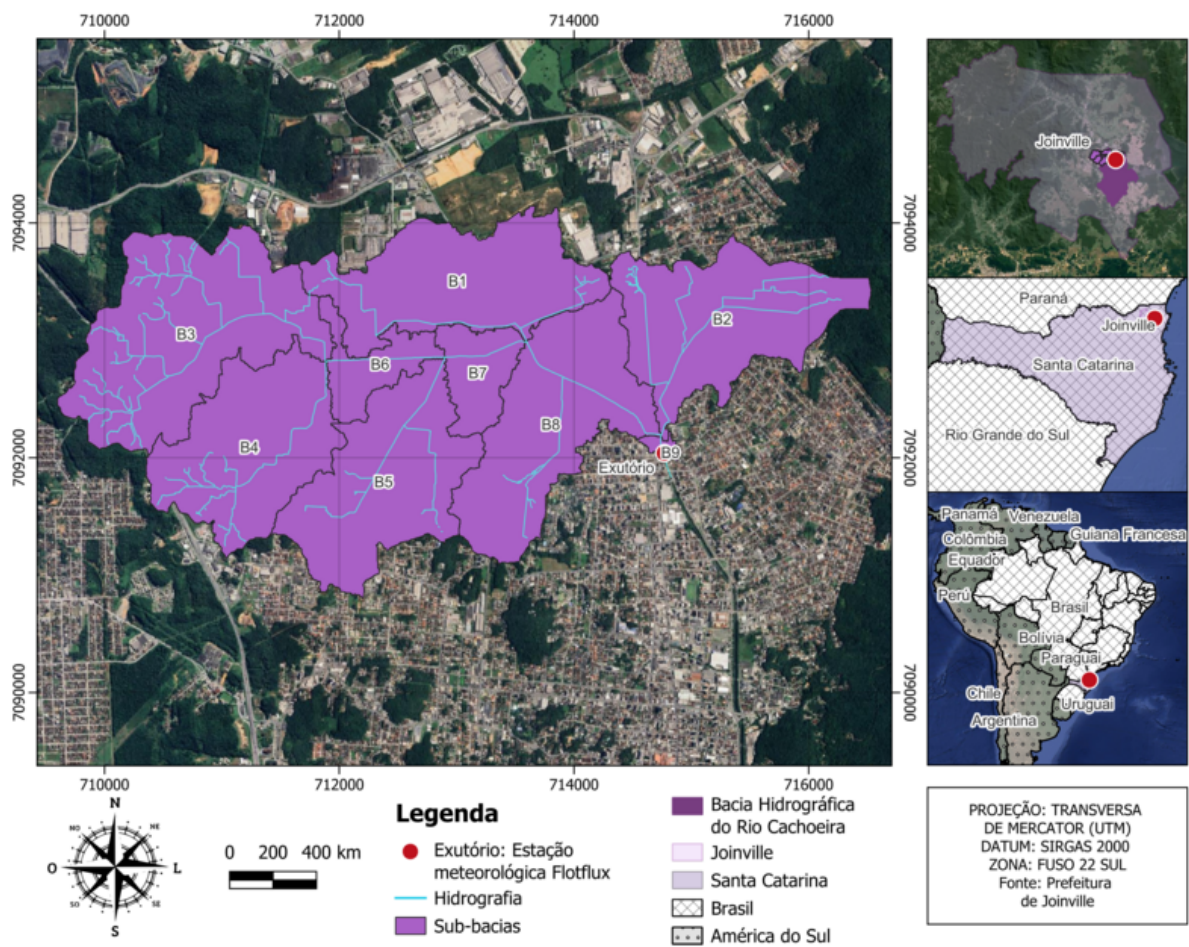
Tabela 17 – Tabela de tempo de concentração e coeficientes de armazenamento das sub-bacias.

Sub-bacia	<i>Comprimento do rio principal (km)</i>	<i>Declividade do rio principal (m/m)</i>	<i>Área da sub-bacia (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Área impermeável da sub-bacia (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Equação</i>	<i>t<sub>c</sub> (h)</i>	<i>Coeficiente de armazenamento (h)</i>
B1	2,87	0,01573	1,86	1,34	Kirpich	0,70	2,70
B2	3,24	0,05093	1,90	1,31	Kirpich	0,49	1,19
B3	3,33	0,01658	2,56	1,58	Kirpich	0,77	2,80
B4	2,82	0,01499	1,78	1,27	Kirpich	0,71	2,76
B5	2,75	0,01148	1,86	1,44	Kirpich	0,77	3,36
B6	1,79	0,01579	0,45	0,28	Schaake	0,14	1,94
B7	1,49	0,01025	0,48	0,30	Schaake	0,13	2,67
B8	3,29	0,01066	1,95	1,36	Kirpich	0,91	3,58
B9	0,37	0,01126	0,04	0,03	Schaake	0,17	1,44

Fonte: Autora (2024).



Figura 18 – Mapa de sub-bacias.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 18 – Coeficiente de forma das sub-bacias.

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	$K_c$
B1	1,865	11,868	2,452
B2	1,897	10,488	2,148
B3	2,562	11,818	2,083
B4	1,775	9,779	2,070
B5	1,856	10,588	2,192
B6	0,451	7,049	2,962
B7	0,480	4,859	1,979
B8	1,949	10,738	2,170
B9	0,044	1,660	2,241

Fonte: Autora (2024).

#### 4.3.0.1 Calibração: Evento 1

Para calibrar o modelo do Evento 1, dias 12 e 17 de janeiro de 2019, a vazão da simulação Evento 1.3 foi utilizada como dado de referência. Optou-se por realizar a calibração do modelo criado com o HEC-HMS por meio da otimização automática. Após a análise da otimização de diversas configurações individualmente e em conjunto, optou-se por otimizar os parâmetros:

- Tempo de concentração;
- Coeficiente de armazenamento.

Na otimização, foi colocado como objetivo a maximização dos resultados, de modo a se obter o valor mais alto possível de uma variável específica. Nesse modelo hidrológico, a variável de interesse foi o pico de vazão, devido aos resultados obtidos. Para isso, a eficiência do modelo tendeu a alterar a variação de vazão de pico (*Peak Discharge*). Logo, o modelo está orientado para analisar séries temporais de vazão de pico, que representam os pontos máximos de vazão em intervalos de tempo específicos.

Para o processo de otimização do modelo, foi utilizado Método da Evolução Diferencial (*Differential Evolution*) como função de busca. O método foi configurado como: limite de 1000 iterações; e uma tolerância de convergência de 0,001; população de 300 candidatos, e; semente (*seed*) definida de 1730208412365.

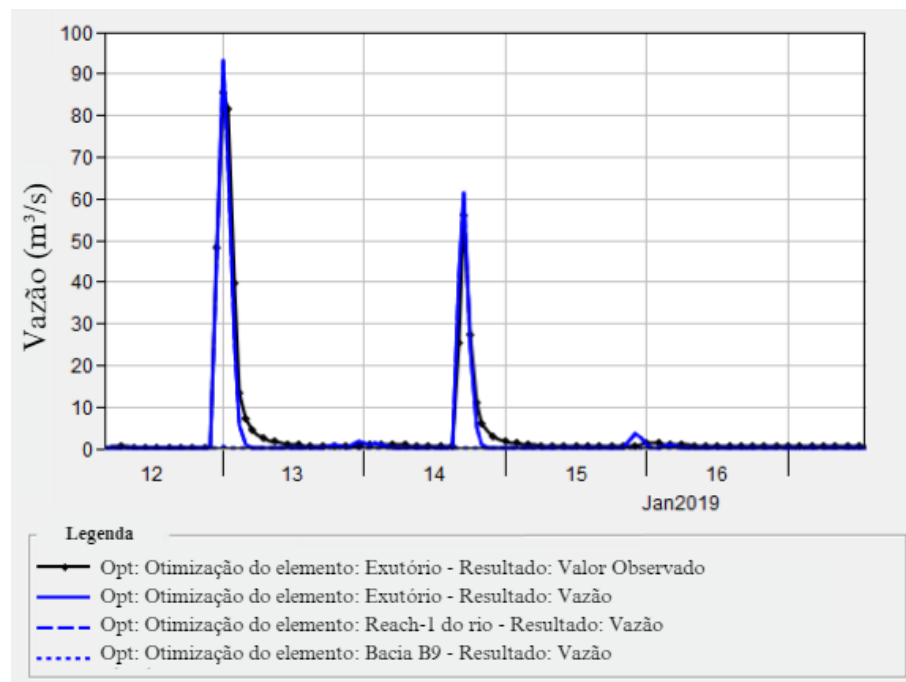
Na simulação, o pico de vazão calculado foi de 93,7 metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), enquanto o volume total simulado foi de 117,3 milímetros (Figuras 19 e 20). Em comparação, os dados de referência para calibração indicaram um pico de vazão de 85,4  $\text{m}^3/\text{s}$ , registrado à meia-noite do dia 13 de janeiro de 2019, e um volume total observado de 138,6 mm. Para avaliar a precisão do modelo, avaliou-se o erro quadrático médio (RMSE), que foi de 0,2 metros, sugerindo uma pequena variação entre os valores simulados e os observados. O viés percentual foi de -15,44%, indicando que o modelo subestimou ligeiramente os dados observados. O coeficiente de Nash-Sutcliffe foi de 0,951, o que demonstra uma excelente precisão do modelo em relação aos dados observacionais, como classificado por Moriasi et al. (2007).

Foram observados os resultados da calibração a partir da alteração da *initial abstraction*, onde se averiguou que o fator de escala havia reduzido para 0,1357. Dessa forma, foram alteradas as abstrações iniciais (Ia), determinadas em 4.1.3 do presente trabalho, conforme a Tabela 19.

Essa mudança implica que todos os fatores referentes às perdas de precipitação, majoritariamente, foram reduzidos. Isto é, no programa, se considerou que essa bacia urbana, praticamente não tem armazenamento de água pelo solo, sendo impermeável na sua totalidade praticamente, por isso, os acúmulos de água na representação gráfica do modelo.

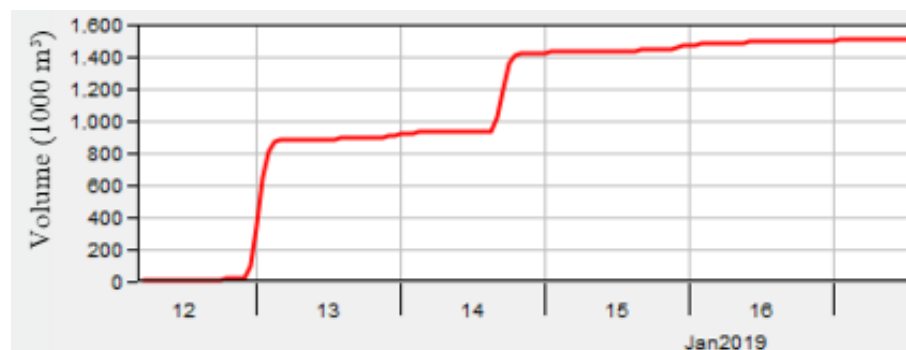
Os parâmetros calibrados foram alterados no modelo para seguir com os procedimentos de validação tanto para o Evento 2 quanto para o Evento 3.

Figura 19 – Resultado da calibração do modelo no exutório para o Evento 1.



Fonte: Autora (2024).

Figura 20 – Vazão de saída acumulada da calibração.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 19 – *Initial abstraction* otimizada.

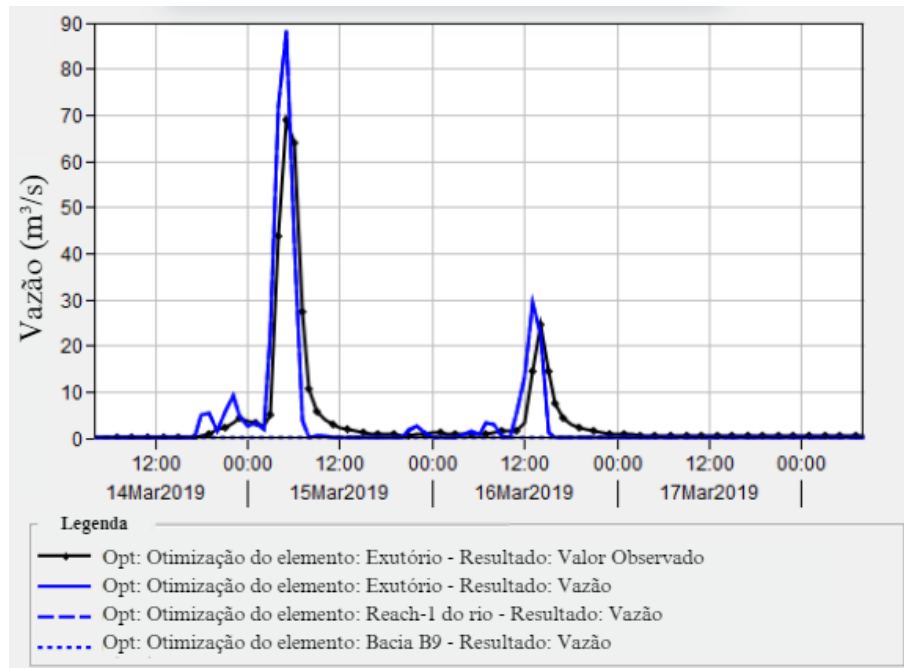
Ia	Ia adaptado
2,7999	0,38
2,7615	0,37
3,3627	0,46
1,9427	0,26
2,7003	0,37
2,6671	0,36
3,5817	0,48
1,191	0,16
1,4392	0,19

Fonte: Autora (2024).

#### 4.3.0.2 Análise da validação do Evento 2

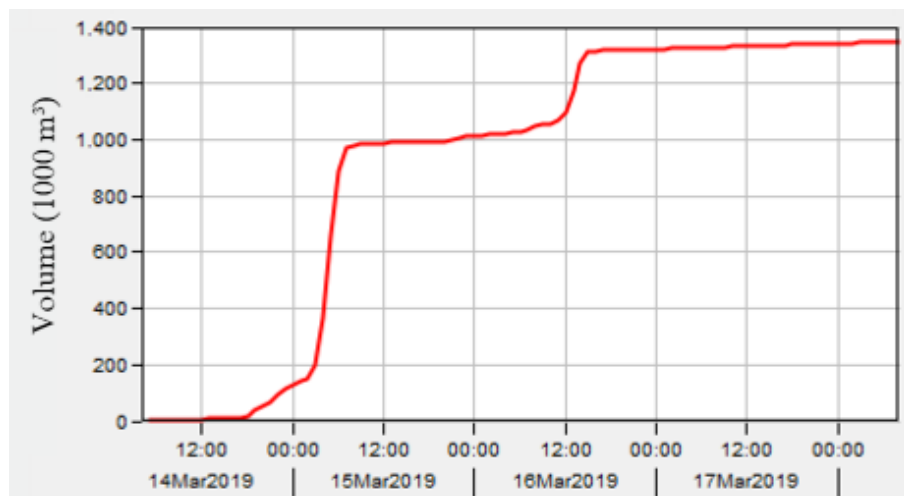
A simulação realizada entre os dias 14 e 18/03/2019, teve o objetivo de avaliar a capacidade do modelo em replicar o comportamento hidrológico da sub-bacia do Rio Cachoeira. Durante a simulação, o modelo computou uma vazão de pico de 88,4 metros cúbicos por segundo e um volume total de escoamento de 104,78 milímetros (Figura 21 e 22).

Figura 21 – Resultado da validação do modelo no exutório para o Evento 2.



Fonte: Autora (2024).

Figura 22 – Vazão de saída acumulada da validação do evento 2.



Fonte: Autora (2024).

Para validar esses resultados, foram comparados com dados simulados pelo modelo hidrológico com os dados de referência simulados pelo modelo hidrodinâmico-hidrológico. A

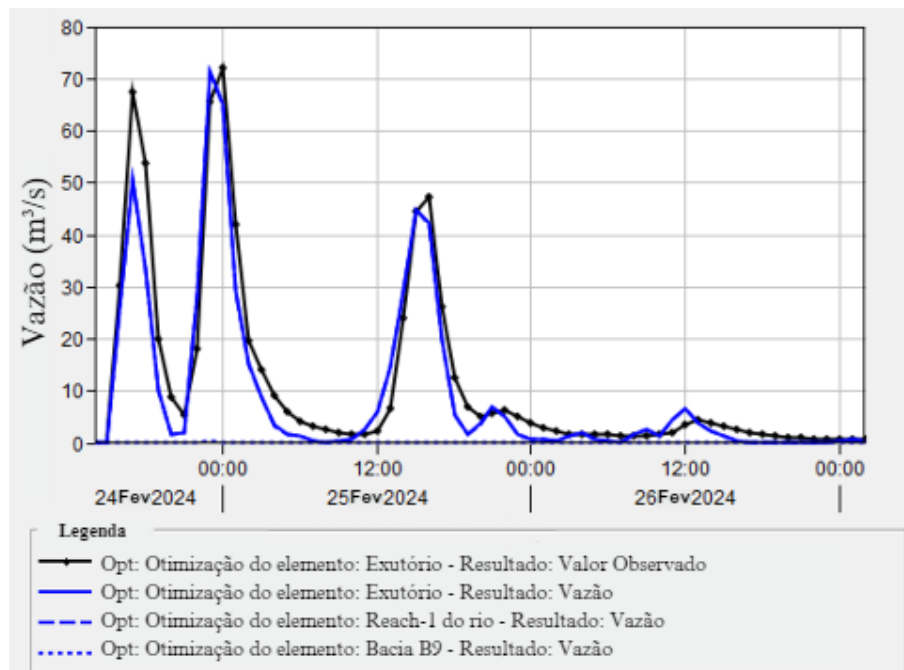
vazão de pico registrada foi de  $69,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , ocorrendo em 15 de março de 2019, às 05:00, e o volume total acumulado medido foi de 106,74 milímetros.

A métrica do RMSE apresentou um valor de 0,5 metros, indicando uma proximidade considerável entre os valores simulados e observados. A eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) foi de 0,705, indicando que o modelo tem uma precisão razoável, replicando o comportamento hidrológico com um bom nível de confiabilidade. Em resumo, o modelo apresentou um desempenho satisfatório, com resultados próximos aos dados de referência, especialmente em termos de volume.

#### 4.3.0.3 Análise da validação do Evento 3

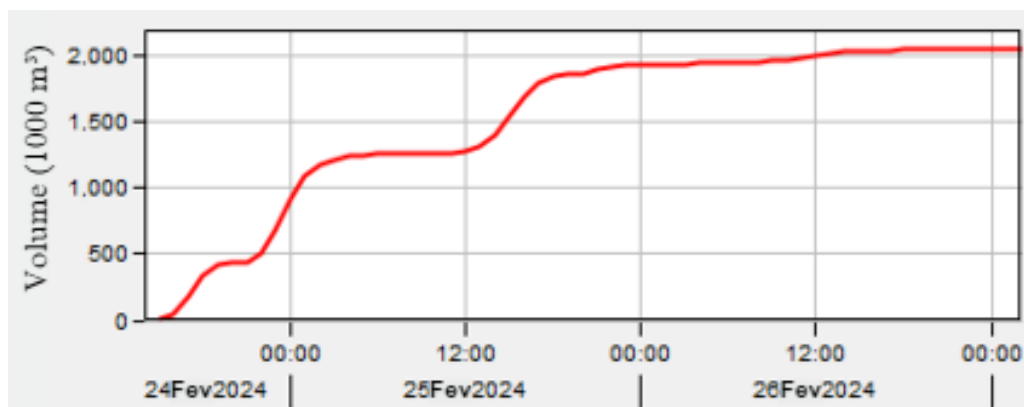
Realizada entre 24 e 27 de fevereiro de 2024 com o modelo meteorológico, a simulação do evento 3 indicou uma vazão de pico de  $71,5 \text{ m}^3/\text{s}$  e um volume de 159,63 mm, valores próximos aos de referência, com vazão de pico de  $72,2 \text{ m}^3/\text{s}$  e volume de 193,82 mm (Figuras 23 e 24). As métricas de desempenho confirmaram a precisão do modelo, com um RMSE de 0,3, um coeficiente Nash-Sutcliffe de 0,912, inferindo-se uma ótima correspondência entre os valores simulados e observados. Esses resultados indicam que o modelo replica de forma adequada o comportamento da bacia.

Figura 23 – Resultado da validação do modelo no exutório para o Evento 3.



Fonte: Autora (2024).

Figura 24 – Vazão de saída acumulada na validação do evento 3.



Fonte: Autora (2024).

Apesar disso, foi o evento mais discrepante dentre os demais, e seus erros gerados podem ser justificados com que esse evento é simulado com dados de 5 anos de diferença entre os demais testados e, conforme foi conversado com a Prefeitura, o sensor de nível havia sido alterado. Portanto, gerou-se um comportamento levemente alterado que o padrão seguido pelos demais.

Por fim, com as análises feitas para ambos os modelos, nota-se que o hidrológico gerou resultados que superestimam levemente o evento de referência, enquanto o modelo hidrodinâmico-hidrológico gerou resultados que subestimam levemente os dados observados.

Acerca dos métodos de equacionamento da otimização do modelo, optou-se por não discretizar os resultados obtidos entre a *Differential Evolution*, o *Simplex* e o *Univariate*, pois os dois últimos não apresentaram resultados tão aceitáveis quanto o primeiro. Fez-se dessa forma, pois o objetivo principal foi escolher o melhor método para dar continuidade aos resultados.

#### 4.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA: BACIA ÚNICA

Partindo da ideia de realizar um estudo comparativo dos hidrogramas criados por diferentes tipos de abordagens, criou-se um modelo de bacia concentrada. Nesse sentido, em vez de se discretizar as bacias, é criada uma única bacia que representa o escoamento e analisa-se apenas no ponto do exutório.

Para isso, a bacia considerada tem uma área de  $12,878 \text{ km}^2$  e pode ser visualizada na Figura 25. Nela, observa-se o formato da bacia, conforme o abordado no Item 2.1.2, como exposto na Tabela 20. Dessa maneira, nota-se que a bacia não é nem alongada, nem circular, portanto, o pico de cheia é considerado moderado, assim como o tempo de resposta hidrológica.

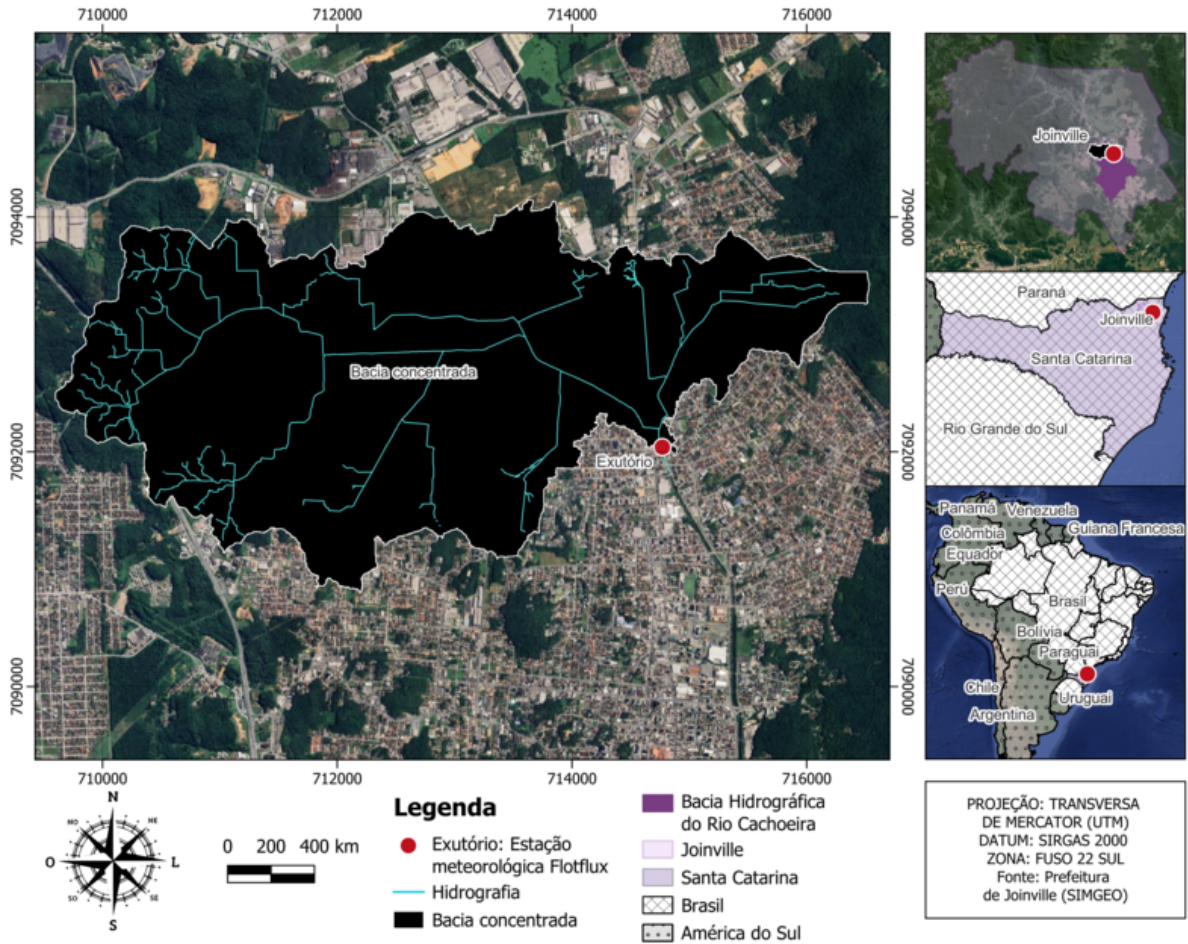
Tabela 20 – Coeficiente de forma da bacia concentrada.

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Kc
Bacia concentrada	12,8870	31,155	2,448

Fonte: Autora (2024).



Figura 25 – Mapa da Bacia concentrada.



Fonte: Autora (2024).

Para realizar a simulação desta forma, também foi utilizado o *SCS Curve Number*, como perda de precipitação, o *Clark Unit Hydrograph*, como transformada em escoamento superficial e o Escoamento de Base constante. Isto é, foram utilizados os mesmos parâmetros, conforme descritos na metodologia. Desta vez, a abstração inicial resultou um valor de 5,627 milímetros. O *Curve Number* foi estabelecido mediante uma média dos valores da bacia que resultou em 90,04. O tempo de concentração pelo método de Chow et al. (1962), por conta das características da bacia, se deu por 2,13 horas e o coeficiente de armazenamento da bacia corroborou em um valor de 9,29 horas. Essas informações podem ser vistas na Tabela 21.

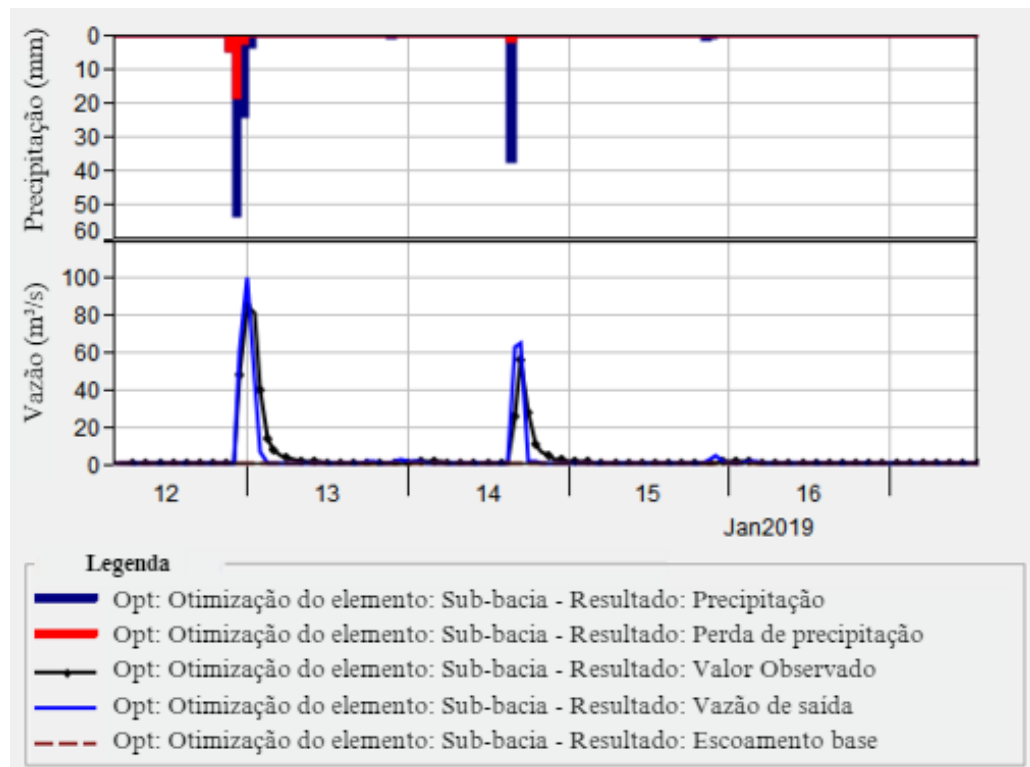
Para o caso da bacia concentrada, o valor do escoamento base foi considerado como o medido, isto é  $0,34 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para os dados meteorológicos, foram inseridos somente os da calibração, isto é, do Evento 1.3 (Figura 26).

Tabela 21 – Parâmetros da sub-bacia concentrada.

Parâmetros	Resultado
Comprimento do rio principal (km)	6,847
Declividade do do rio principal (m/m)	0,005082
Área da sub-bacia (km <sup>2</sup> )	12,878
Área impermeável da sub-bacia (km <sup>2</sup> )	7,954
Equação	Chow et al. (1962)
Tempo de concentração (h)	2,873
Coefficiente de armazenamento (h)	9,288
<i>Curve Number</i>	90,040
Initial Abstraction (Ia)	5,627

Fonte: Autora (2024).

Figura 26 – Resultado do modelo concentrado.



Fonte: Autora (2024).



Portanto, o ensaio de calibração hidrológica dessa sub-bacia foi realizado entre 12 e 17 de janeiro de 2019, empregando o modelo de bacia concentrada e o modelo meteorológico com os dados da Flotflux. Os resultados computados revelaram uma vazão de pico de  $100,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , que ocorreu em 13 de janeiro de 2019, exatamente à meia-noite, com um volume de precipitação acumulada de 129,16 mm. Observou-se que a vazão de pico registrada no local de referência foi inferior à computada, sendo de  $85,4 \text{ m}^3/\text{s}$  no mesmo horário da simulação. O escoamento superficial direto totalizou 100,64 mm, e o volume de base, 12,21 mm, resultando em um volume total de vazão de 112,85 mm.

Quanto aos indicadores de qualidade do ajuste do modelo, o erro quadrático médio (RMSE) apresentou um desvio padrão de 0,5 metros. O coeficiente de Nash-Sutcliffe, que mede a eficiência do modelo, resultou em 0,742, indicando um desempenho razoavelmente adequado para a calibração hidrológica da sub-bacia analisada. No entanto, não superou os resultados obtidos anteriormente com a divisão em sub-bacias menores. Sendo assim, analisando a afirmação de Wagener, Wheeler e Gupta (2004), mencionada no item 2.4.2 do presente trabalho, os modelos hidrodinâmicos-hidrológicos e hidrológicos foram suficientes nesse caso, em relação à estimativa da resposta hidrológica em escala de bacia hidrográfica. No entanto, para estudos mais precisos, ainda é importante avaliar através de uma maior divisão de sub-bacias concentradas.

Assim, apesar do resultado satisfatório para esse caso, o hidrográfico que obteve o melhor desempenho representando a realidade utilizou o método do modelo hidrológico-hidrodinâmico acoplado, como pode ser visto no resumo dos resultados da Tabela 22, especialmente, para os casos do Evento 1.1 e 1.3.

Tabela 22 – Resumo dos resultados.

<b>Tipo de modelagem</b>	<b>Modelagem hidrodinâmica-hidrológica acoplada</b>			<b>Modelagem hidrológica</b>
<b>Parâmetro</b>	<b>Evento 1 (Otimização)</b>	<b>Evento 2 (Validação 1)</b>	<b>Evento 3 (Validação 2)</b>	<b>Bacia única</b>
<b>Pico de Vazão Simulado (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>	93,7	88,4	71,5	100,8
<b>Pico de Total Simulado (mm)</b>	117,3	104,78	159,63	112,85
<b>Pico de Vazão Observado (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>	85,4	69,0	72,2	85,4
<b>Volume Total Observado (mm)</b>	138,6	106,74	193,82	112,85
<b>Erro Quadrático Médio (RMSE)</b>	0,2 metros	0,5 metros	0,3 metros	0,5 metros
<b>Coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE)</b>	0,951	0,705	0,912	0,742

Fonte: Autora (2024).

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs a comparar resultados de simulações do modelo hidrodinâmico-hidrológico acoplado (MHHA), com simulações hidrológicas concentradas aplicadas a uma sub-bacia do Rio Cachoeira em Joinville/SC. A metodologia criada sem o uso de curva-chave possibilitou a estimativa da vazão a partir de qualquer evento de precipitação desse exutório com o apoio dos dados de nível observados utilizando o MHHA. Para demais estudos, em outros pontos de bacias hidrográficas, desde que não haja influência de maré, infere-se que a aplicação dessa mesma metodologia tem eficácia, desde que haja dados de precipitação e nível d'água registrados no local.

O estudo, ao utilizar modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, permitiu uma compreensão aprofundada do comportamento hidrológico da bacia do Rio Cachoeira, validando-se a metodologia proposta. Os resultados mostraram uma alta capacidade para a reprodução dos hidrogramas e vazões para eventos simulados, indicando a robustez do MHHA ao apresentar um coeficiente de Nash-Sutcliffe de até 0,951, no caso do Evento 1.3, ou seja, excelente, que assim como o Evento 1.1 se obteve o melhor desempenho. Contudo, observou-se que melhorias, como a inclusão de uma batimetria detalhada e dados de drenagem urbana, aprimorariam ainda mais a acurácia do modelo, reduzindo discrepâncias entre dados observados e simulados.

Com as calibrações e validações, comprovou-se a confiabilidade das informações geradas. Nesse sentido, com os dados obtidos das simulações, recomenda-se investir em uma reavaliação e possível ampliação da capacidade da rede de drenagem, especialmente em locais que apresentaram sobrecarga no estudo. Essa abordagem oferece informação de qualidade para o planejamento de intervenções públicas e políticas de zoneamento, demonstrando o potencial do modelo em apoiar medidas preventivas de com relação às inundações, sobretudo com a possibilidade de expansão para áreas adjacentes.

De acordo com os objetivos estabelecidos para este estudo, primeiramente, a metodologia baseada em MHHA utilizando dados da vazão de base observada *in loco*, precipitação e nível d'água, obtidos pela Prefeitura, permitiu a simulação de vazões no exutório da bacia de estudo, em um ponto do Rio Cachoeira onde comumente não há influência de maré. A partir da aplicação dessa metodologia seria possível de obter o hidrograma em qualquer ponto a montante do exutório, nesta metodologia. Para isso, a MHHA foi avaliada em diversos cenários, alternando-se os eventos de precipitações extremas, sendo uma calibração e uma validação em 2019 e outra validação em 2024; mudança de declividade, de 0,001 e 0,0001 m/m, e; de malha de modelo, sendo uma de  $25 \times 25 \text{ m}^2$  e outra de  $50 \times 50 \text{ m}^2$  fora do rio ao longo de toda a área de estudo. Com essas mudanças de parâmetros que o melhor cenário para declividade verificou-se em 0,001 m/m. A malha de  $25 \times 25 \text{ m}^2$  apresentou melhor desempenho geral, mas a diferença foi mínima, tornando a de  $50 \times 50 \text{ m}^2$  mais adequada devido ao menor custo computacional. Para os eventos de precipitação, mesmo com a diferença de 5 anos entre a calibração e a segunda validação, os gráficos de picos demonstram certa discrepância no comportamento do evento, no entanto, os

resultados em relação à eficiência foram muito mais próximos do que os que aconteceram no mesmo ano, sendo classificados como excelentes. Isso implica que, se a metodologia efetivada no presente trabalho for realizada corretamente para diferentes pontos da bacia, representará os eventos de forma real, podendo assim colaborar com a criação de medidas para o controle de eventos extremos na cidade.

No que tange à avaliação da capacidade do modelo hidrológico por sistema de bacias em replicar o comportamento hidrológico da bacia, este, por sua vez, apresentou alta precisão em diversas simulações para eventos de precipitação variáveis. Desse modo, avaliou-se que dentre os eventos 1, 2 e 3, o Evento 1 representou um melhor desempenho e o Evento 2, o pior em comparação com os demais. Isso pôde ser observado pelos resultados de NSE, que para o Evento 1 deram 0,951, para o Evento 2 geraram 0,705 e para o Evento 3 corresponderam a 0,912.

Assim, o sistema de bacias concentradas resultou em uma eficiência maior para o modelo a partir do evento de calibração, enquanto pelo método da bacia concentrada única, obteve-se um coeficiente de NSE de 0,742. Logo, o primeiro provou gerar um hidrograma mais eficaz, que corrobora com os dados reais quase em sua totalidade. Dessa forma, a modelagem mostrou-se eficaz em replicar os picos e recessões de vazão característicos da bacia do Rio Cachoeira, indicando um ajuste adequado para a previsão de diferentes cenários hidrológicos.

Ainda acerca dos objetivos, a investigação das diferenças nas configurações matemáticas adotadas por cada *software* utilizado. Em particular, no caso do HEC-RAS, a utilização do método da equação das águas rasas, descrito pelos modelos de Euler e Lagrange, demonstrou maior demanda computacional, repercutindo em maior tempo de simulação do que o método *Diffusion Wave*. Observou-se uma diferença de aproximadamente 2 horas na duração das simulações. No HEC-HMS, os testes de otimização com os métodos Evolução Diferencial, *Simplex* e Análise Univariada mostraram que os dois últimos, por serem mais simplificados ou analisarem poucos parâmetros, tiveram pouca relevância, sendo assim, seus resultados não foram exibidos. Já alterando o tempo de concentração e o coeficiente de armazenamento, pelo método da Evolução Diferencial, foi a melhor escolha de otimização. Essa análise possibilitou otimizações na representação matemática dos fenômenos hidrológicos da bacia, atendendo ao esperado para aceitação do modelo.

Ademais, pode-se afirmar que as informações sobre a topografia da bacia ou a drenagem urbana obtidas por meio de um levantamento batimétrico poderiam ser complementadas ou aperfeiçoadas para incluir mais detalhes para minimizar discrepâncias nos resultados simulados e observados. Além disso, um MDT de maior resolução com a capacidade de fornecer uma calibração e validação com um menor grau de variação do hidrograma poderia ser aplicado. As principais dificuldades para o desenvolvimento deste trabalho podem ser encontradas no Apêndice D.

Com o uso dos hidrogramas validados gerados, é possível aperfeiçoar os mapas de inundação. Isso permitirá que o governo local aplique um zoneamento restringindo construções em áreas suscetíveis a inundações e orientando novos empreendimentos para locais mais seguros. Sendo

assim, a implementação de estações de monitoramento em tempo real para acompanhamento contínuo do nível dos rios e de precipitação, aliadas a sistemas de alerta precoce, permitiria um maior alcance de dados de resposta rápida e eficácia em situações de risco de inundação, protegendo comunidades vulneráveis.

Outras abordagens que incluem intervenções para restaurar ou limitar processos naturais a fim de reduzir o escoamento superficial e melhorar a capacidade de retenção das bacias hidrográficas são as técnicas compensatórias. Exemplos incluem a criação de áreas de retenção temporária, como *wetlands* artificiais, e o uso de pavimentos permeáveis, que permitem a infiltração de água no solo, diminuindo o risco de inundações. Além disso, soluções baseadas na natureza não apenas mitigam os impactos das cheias, mas também oferecem benefícios adicionais, como a melhoria da qualidade da água e a promoção da biodiversidade. A implementação de bacias de detenção e sistemas de infiltração também contribui para retardar o escoamento e redistribuir o volume de água durante eventos extremos, reduzindo os picos de vazão (Hollis, 1975). Essas estratégias comprovam ser mais sustentáveis e economicamente viáveis quando comparadas às soluções tradicionais de engenharia, especialmente em cenários de mudanças climáticas e urbanização acelerada.

Por fim, a criação de hidrogramas e o uso de modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas podem ser aplicados de forma contínua para prever eventos extremos e integrar dados mais recentes em políticas de mitigação e recuperação. Essa abordagem, quando aplicada de forma integrada ao planejamento urbano, permite uma política mais adaptativa e eficiente para enfrentar mudanças climáticas e eventos de precipitação intensos. Dessa forma, vale salientar que tal metodologia se torna ainda mais interessante pelo fato de que ainda são poucas estações de monitoramento presentes para a obtenção de dados, bem como há falta de profissionais atuando a fim de se obter a curva-chave de cursos de água, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista da FAE*, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- ALMEIDA, M. M. et al. Imputação de dados faltosos em séries temporais univariadas utilizando meta-aprendizado baseado em rede neural lstm híbrida. Universidade Federal do Maranhão, 2023. Citado na página 27.
- BALTAS, E.; DERVOS, N.; MIMIKOU, M. Determination of the scs initial abstraction ratio in an experimental watershed in greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 11, n. 6, p. 1825–1829, 2007. Citado na página 44.
- BARROS, V. G.; ONEDA, T. M. S. Análise crítica sobre o plano de drenagem e manejo de Águas pluviais urbanas de joinville - sc. In: *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [s.n.], 2022. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022793.pdf>. Citado na página 30.
- BERNARDI, E. C. S. et al. Bacia hidrográfica como unidade de gestão ambiental. *Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas*, v. 13, n. 2, p. 159–168, 2012. Citado na página 17.
- BOITRAGO, S. A. et al. Aplicação do modelo hec-hms para simulação do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio vieiras. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 04, p. 2091–2102, 2023. Citado na página 41.
- BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on south american water balance from a continental-scale hydrological model driven by cmip5 projections. *Climatic Change*, Springer, v. 159, n. 4, p. 503–522, 2020. Citado na página 14.
- BUARQUE, D. C. Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio madeira. 2015. Citado na página 24.
- CAMARGO, M. *Regime Permanente | Escoamento Laminar | Número de Reynolds | Cinemática*. 2017. YouTube. Acesso em: 27 maio 2024. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=F9igP4D4aI8&list=TLGGpMSdeh4NSzkyNzA1MjAyNA>. Citado na página 26.
- CAVALCANTI, I. F. *Tempo e clima no Brasil*. [S.l.]: Oficina de textos, 2016. Citado na página 14.
- CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae)?—arguments against avoiding rmse in the literature. *Geoscientific model development*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014. Citado na página 41.
- CHICCO, D.; WARRENS, M. J.; JURMAN, G. The coefficient of determination r-squared is more informative than smape, mae, mape, mse and rmse in regression analysis evaluation. *PeerJ computer science*, PeerJ Inc., v. 7, p. e623, 2021. Citado na página 40.
- CHOW, V. T. et al. *Applied hydrology*. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1988. Citado na página 18.

- CHOW, V. T. et al. *Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins*. [S.l.], 1962. Citado 4 vezes nas páginas 19, 43, 70 e 71.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. *Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)*, v. 336, 2013. Citado na página 21.
- Defesa Civil de Joinville. *Formulário de Informações do Desastre (FIDE): SC-F-4209102-13214-20240225 (0020281337)*. 2024. Joinville: Prefeitura Municipal de Joinville. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/public/portaladm/pdf/jornal/696824e3e3cb134332ff13dd0bc1e79a.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- DESTEFANI, A.; JR, C. R. Integrated evaluation of accumulated sediments in a buried channel of a subtropical estuary. *Regional studies in marine science*, Elsevier, v. 25, p. 100453, 2019. Citado na página 30.
- DUARTE, P. et al. Gestão de zonas lagunares costeiras: Projecto ditty. Edições Universidade Fernando Pessoa, 2004. Citado na página 31.
- FAGUNDES, M. R. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica a fim de auxiliar na definição de um critério para o fechamento da trilha do rio do boi. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 21.
- FAYAL, M. A. de A. *Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2008. Citado na página 22.
- FERRAZ, G. d. F. *Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2019. Citado na página 14.
- FERREIRA, A. M. *Análise numérica e experimental da ação do vento em estruturas em cascas de formas livres*. Tese (Doutorado) — [sn], 2013. Citado na página 26.
- FILHO, S. F. et al. *Análise de problemas de drenagem da bacia do rio Tejipió com o uso de modelos computacionais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Citado na página 26.
- FlorestaSC: Plataforma de Mapas (MonitoraSC). *Uso da Terra*. 2017. [https://monitora.furb.br/layers/monitora\\_data:geonode:monitorasc\\_2017\\_v5c](https://monitora.furb.br/layers/monitora_data:geonode:monitorasc_2017_v5c). Acesso em: 01 out. 2024. Citado na página 32.
- FRANCO, E. J.; FILL, H. Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional. *Universidade Federal do Paraná*, 2004. Citado na página 19.
- GISCH, D. L. Simulação da dispersão de poluentes na camada limite planetária: um modelo determinístico-estocástico. 2018. Citado na página 22.
- HARARI, Y. N. *Sapiens: História breve da humanidade*. [S.l.]: Elsinore, 2013. Citado na página 15.
- HOLLIS, G. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. *Water resources research*, Wiley Online Library, v. 11, n. 3, p. 431–435, 1975. Citado na página 75.

IBGE. *Censo Demográfico 2022*. 2022. Acesso em: 28 mai. 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/panorama>. Citado na página 29.

IFRC; UNDP. *Effective law and regulation for disaster risk reduction: A multi country report–Summary*. 2014. Citado na página 14.

JOINVILLE. *Sistema de Informações Municipais Georreferenciadas (SIMGeo)*. 2010. Base de dados. Disponível em: <https://geoprocessamento.joinville.sc.gov.br/download>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 36.

JOINVILLE. *Plano Diretor de Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira*. [S.l.], 2011. Prefeitura de Joinville. Citado na página 30.

JOINVILLE, I. . I. de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de. *Joinville, Cidade em Dados 2009*. Joinville: [s.n.], 2009. 147 p. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

JOINVILLE, P. de. *Cidade em Dados*. 2024. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/publicacoes/joinville-cidade-em-dados-2024/>. Citado na página 29.

JR, J. C. S.; GEYER, J. C.; KNAPP, J. W. Experimental examination of the rational method. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, v. 93, n. 6, p. 353–370, 1967. Citado na página 19.

KIRCHNER, J. W. Characterizing nonlinear, nonstationary, and heterogeneous hydrologic behavior using ensemble rainfall-runoff analysis (erra): proof of concept. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Göttingen, Germany, v. 2024, p. 1–42, 2024. Citado na página 19.

KOEHNTOPP, P. I. et al. Governança e mudança climática nas cidades contemporâneas: o caso de joinville-sc. 2012. Citado na página 15.

LIU, Z.-J.; WELLER, D. E. A stream network model for integrated watershed modeling. *Environmental modeling & assessment*, Springer, v. 13, p. 291–303, 2008. Citado na página 23.

LOPES, V. A. R. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento. 2017. Citado na página 25.

MCCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. Estimating urban time of concentration. *Journal of hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 110, n. 7, p. 887–904, 1984. Citado na página 18.

MEDEIROS, P. da C.; SOUSA, F. d. A. S. de; RIBEIRO, M. M. R. Aspectos conceituais sobre o regime hidrológico para a definição do hidrograma ambiental. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Universidade de Taubaté, v. 6, n. 1, p. 131–147, 2011. Citado na página 21.

MEDEIROS, P. H. et al. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the wasa-sed model. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, Taylor & Francis, v. 55, n. 4, p. 636–648, 2010. Citado na página 24.

MELLO, Y. R. de; KOEHNTOPP, P. I. Características climáticas da bacia hidrográfica do rio cachoeira, joinville (sc). *Acta Biológica Catarinense*, v. 4, n. 3, p. 18–28, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.

- MIGNOT, E.; PAQUIER, A.; HAIDER, S. Modeling floods in a dense urban area using 2d shallow water equations. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 327, n. 1-2, p. 186–199, 2006. Citado na página 36.
- MONTEIRO, L.; KOBİYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. *Revista REGA-Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 10, n. 2, p. 13–25, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 42.
- MONTEIRO, L. R.; KOBİYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C. *Mapeamento de Perigo de Inundação*. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN, 2015. 91 p. Trabalho Técnico GPDEN No. 03. Citado 10 vezes nas páginas 18, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 31, 35 e 62.
- MOREIRA, I. A.; MINE, M. M.; FILHO, A. P. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. *Ingeniería del agua*, IWA Publishing, v. 14, n. 2, p. 83–96, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 23.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, American society of agricultural and biological engineers, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 26, 40, 46, 54 e 65.
- MOTA, A. d. A.; KOBİYAMA, M. Reconsiderações sobre a fórmula de kirpich para o cálculo de tempo de concentração. *Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 20, n. 1 (jan./mar. 2015), p. 55-59*, 2015. Citado na página 19.
- NASCIMENTO, D. A. d. et al. Gerenciamento de recursos hídricos em uma bacia experimental na amazônia central. Universidade do Estado do Amazonas, 2019. Citado na página 25.
- NETO, F. G. F. Estudo da pegada hídrica no semiárido piauiense: a bacia hidrográfica do rio guaribas. Universidade Federal de Pernambuco, 2017. Citado na página 18.
- NUNES, G. S. *Aplicabilidade de modelos de hidrograma unitário em bacias hidrográficas hidrologicamente distintas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pelotas, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- OLIVEIRA, T. M. N. de et al. *Bacias hidrográficas da região de Joinville: gestão e dados*. Joinville: Editora Univille, 2017. Citado na página 32.
- OSGEO. *QGIS*. [S.l.], 2024. Disponível em: [https://qgis.org/pt\\_BR/site/](https://qgis.org/pt_BR/site/). Citado na página 31.
- PBMC. *Mudanças climáticas e cidades – sumário executivo*. 2016. Citado na página 14.
- PEIXOTO, T. *Reuso de água: comparação entre os métodos DFA, programação linear e programação não linear*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Citado na página 27.
- PEREIRA, D. d. R. Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio pomba usando o modelo swat. 2013., 2013. Citado na página 14.
- PINTO, N. L. de S. et al. *Hidrologia básica*. [S.l.]: Editora Blucher, 1976. Citado na página 19.
- Prefeitura Municipal de Joinville. *Plano Diretor de Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira: Manual de Drenagem*. 2011. Executado por: ENGECORPS, HIDROSTUDIO e BRLi. Citado na página 43.



- PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, D. D. Comparação entre dois métodos para a determinação do volume de escoamento superficial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 403–410, jun. 2001. ISSN 0100-0683. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/ZtQwT4phk8hNrGd56VtH7gL/?format=pdf&lang=pt>. Citado na página 25.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Capítulo 2 conceitos básicos de modelagem hidrológica. 2003. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. *MEIRELLES, MSP Geomática: modelos e aplicações ambientais/Editores técnicos: Margareth Simões Penello Meirelles, Gilberto Câmara e Cláudia Maria de Almeida—Brasília: Embrapa Informação Tecnológica*, 2007. Citado na página 22.
- RICARDO, G. da S. et al. Prognósticos de alterações nas vazões de base como meio de suporte ao gerenciamento de recursos hídricos. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 112–124, 2020. Citado na página 25.
- ROCHA, T. A. et al. Modelagem multivariada chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio piacó–pb. Universidade Federal de Campina Grande, 2020. Citado na página 22.
- ROSNIECEK, A.; IMAI, H. Mapeamento geotécnico e análise de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos da bacia do rio ratones-aplicação do modelo shalstab. *Conclusion of Course Work, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 2013. Citado na página 18.
- SALAS, J. D.; OBEYSEKERA, J. Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *Journal of hydrologic engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 19, n. 3, p. 554–568, 2014. Citado na página 27.
- SANTOS, L. L. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n. 3, p. 1–19, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 25.
- SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos estados unidos parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 05–18, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- SDS. *Modelo digital do terreno (MDT) do estado de Santa Catarina*. 2016. Disponível em: <http://sigsc.sds.sc.gov.br/download/index.jsp>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 36.
- SEDEC. *Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2Id)*. 2020. <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/index.xhtml>>. Citado na página 30.
- SIEBERT, C. Mudanças climáticas e desastres naturais em santa catarina: Impactos socioterritoriais e avaliação das políticas públicas. *XVII Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional*. São Paulo, p. 1–22, 2017. Citado na página 14.
- SILVA, B. K. d. N. et al. Um modelo conceitual de probabilidade para determinação da vulnerabilidade populacional ao clima. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 35, p. 881–889, 2020. Citado na página 22.

- SILVA, H. d. et al. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: PARRON, LM; GARCIA, JR; OLIVEIRA, EB de; BROWN, GG; PRADO, RB (Ed ... , 2015. Citado na página 24.
- SILVA, P. M. d. O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região alto rio grande. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 12, p. 258–265, 2008. Citado na página 21.
- SILVEIRA, W. N. et al. *História das inundações em Joinville, 1851-2008*. [S.l.]: Organic Trading, 2009. Citado na página 14.
- SMAGALLA, J. et al. *História das inundações em Joinville: 2009-2019*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2020. Disponível em: <http://anais.abrh.org.br/works/7297>. Acesso em: 17 out. 2024. Disponível em: <http://anais.abrh.org.br/works/7297>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, Springer, v. 11, p. 341–359, 1997. Citado na página 27.
- TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, v. 11, n. 1, p. 137–156, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- TUCCI, C. E. *Modelos hidrológicos*. [S.l.]: UFRGS/Associação Brasileira de recursos Hídricos, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 15, 23 e 25.
- TUCCI, C. E. et al. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: EDUSP, 1993. Citado 4 vezes nas páginas 17, 20, 23 e 26.
- TUCCI, C. E. M. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. *Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos*. Porto Alegre, RS: ABRH. Vol. 8, n. 2 (abr./jun. 2003), p. 195-199, 2003. Citado na página 24.
- USACE. *HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*. 2023. Manual Técnico de Referência. Versão 6.1. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Citado 5 vezes nas páginas 34, 36, 37, 43 e 45.
- USACE. *HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System: Sistema de Modelagem Hidrológica*. 2024. Manual Técnico de Referência. Versão 4.12. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Citado 6 vezes nas páginas 24, 26, 27, 28, 41 e 45.
- VANELLI, F. M. Reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 em tubarão, sc. 2019. Citado na página 16.
- WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. [S.l.]: World Scientific, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 72.
- WMO. *Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications*. Fifth edition. [S.l.], 1994. v. 168, 302 p. Citado na página 20.

WOODWARD, D. E. et al. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. In: *World water & environmental resources congress 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 1–10. Citado na página 44.

YI, B. et al. A time-varying distributed unit hydrograph method considering soil moisture. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 26, n. 20, p. 5269–5289, 2022. Citado na página 24.

ZHENG, Y. et al. Estimation of initial abstraction for hydrological modeling based on global land data assimilation system–simulated datasets. *Journal of Hydrometeorology*, American Meteorological Society, v. 21, n. 5, p. 1051–1072, 2020. Citado na página 43.

ZSCHORNACK, T.; OLIVEIRA, T. M. N. de. Monitoramento e análise da qualidade da água da bacia hidrográfica do rio cachoeira no município de joinville/sc (período 2011-2015). *Acta Biológica Catarinense*, v. 4, n. 3, p. 29–40, 2017. Citado na página 30.

## APÊNDICE A – EVENTO 1

Tabela 23 – Dados do Evento 1. (CONTINUAÇÃO)

EVENTO 1	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
12/01/2019 04:00:00	0	1,125
12/01/2019 05:00:00	0	1,127
12/01/2019 06:00:00	0	1,129
12/01/2019 07:00:00	0	1,131
12/01/2019 08:00:00	0	1,131
12/01/2019 09:00:00	0	1,13
12/01/2019 10:00:00	0	1,13
12/01/2019 11:00:00	0	1,129
12/01/2019 12:00:00	0	1,129
12/01/2019 13:00:00	0	1,125
12/01/2019 14:00:00	0	1,118
12/01/2019 15:00:00	0	1,116
12/01/2019 16:00:00	0	1,123
12/01/2019 17:00:00	0	1,12
12/01/2019 18:00:00	0	1,118
12/01/2019 19:00:00	0	1,121
12/01/2019 20:00:00	0	1,12
12/01/2019 21:00:00	0,457	1,122
12/01/2019 22:00:00	4,801	1,308
12/01/2019 23:00:00	52,93	3,915
13/01/2019 00:00:00	24,08	4,36
13/01/2019 01:00:00	3,658	4,166
13/01/2019 02:00:00	0	3,716
13/01/2019 03:00:00	0	2,986
13/01/2019 04:00:00	0	2,087
13/01/2019 05:00:00	0	1,608
13/01/2019 06:00:00	0	1,501
13/01/2019 07:00:00	0	1,441
13/01/2019 08:00:00	0	1,397
13/01/2019 09:00:00	0	1,362
13/01/2019 10:00:00	0	1,337
13/01/2019 11:00:00	0	1,314
13/01/2019 12:00:00	0	1,291
13/01/2019 13:00:00	0	1,277
13/01/2019 14:00:00	0	1,263
13/01/2019 15:00:00	0	1,255

Fonte: Autora (2024).

Tabela 3.1 – Dados do Evento 1. (CONTINUAÇÃO)

EVENTO 1	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
13/01/2019 16:00:00	0	1,247
13/01/2019 17:00:00	0	1,248
13/01/2019 18:00:00	0,457	1,245
13/01/2019 19:00:00	0	1,244
13/01/2019 20:00:00	0	1,239
13/01/2019 21:00:00	0	1,23
13/01/2019 22:00:00	0,686	1,222
13/01/2019 23:00:00	0,457	1,225
14/01/2019 00:00:00	0	1,23
14/01/2019 01:00:00	0,457	1,228
14/01/2019 02:00:00	0,229	1,226
14/01/2019 03:00:00	0	1,225
14/01/2019 04:00:00	0	1,222
14/01/2019 05:00:00	0	1,22
14/01/2019 06:00:00	0	1,216
14/01/2019 07:00:00	0	1,209
14/01/2019 08:00:00	0	1,206
14/01/2019 09:00:00	0	1,201
14/01/2019 10:00:00	0	1,197
14/01/2019 11:00:00	0	1,191
14/01/2019 12:00:00	0	1,19
14/01/2019 13:00:00	0	1,179
14/01/2019 14:00:00	0	1,173
14/01/2019 15:00:00	0	1,175
14/01/2019 16:00:00	37,29	3,382
14/01/2019 17:00:00	0,457	3,075
14/01/2019 18:00:00	0,457	2,278
14/01/2019 19:00:00	0	1,686
14/01/2019 20:00:00	0	1,536
14/01/2019 21:00:00	0	1,434
14/01/2019 22:00:00	0	1,389
14/01/2019 23:00:00	0	1,355
15/01/2019 00:00:00	0	1,329
15/01/2019 01:00:00	0	1,31
15/01/2019 02:00:00	0	1,294
15/01/2019 03:00:00	0	1,285
15/01/2019 04:00:00	0	1,27
15/01/2019 05:00:00	0	1,26
15/01/2019 06:00:00	0	1,253
15/01/2019 07:00:00	0	1,245
15/01/2019 08:00:00	0	1,239
15/01/2019 09:00:00	0	1,23

Fonte: Autora (2024).

Tabela 3.1 – Dados do Evento 1. (CONTINUAÇÃO)

EVENTO 1	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
15/01/2019 10:00:00	0	1,221
15/01/2019 11:00:00	0	1,212
15/01/2019 12:00:00	0	1,209
15/01/2019 13:00:00	0	1,195
15/01/2019 14:00:00	0	1,19
15/01/2019 15:00:00	0	1,191
15/01/2019 16:00:00	0	1,181
15/01/2019 17:00:00	0	1,172
15/01/2019 18:00:00	0	1,172
15/01/2019 19:00:00	0	1,173
15/01/2019 20:00:00	0	1,173
15/01/2019 21:00:00	1,372	1,179
15/01/2019 22:00:00	0,914	1,475
15/01/2019 23:00:00	0	1,449
16/01/2019 00:00:00	0	1,309
16/01/2019 01:00:00	0	1,247
16/01/2019 02:00:00	0	1,223
16/01/2019 03:00:00	0,457	1,214
16/01/2019 04:00:00	0	1,215
16/01/2019 05:00:00	0	1,208
16/01/2019 06:00:00	0	1,201
16/01/2019 07:00:00	0	1,196
16/01/2019 08:00:00	0	1,192
16/01/2019 09:00:00	0	1,188
16/01/2019 10:00:00	0	1,185
16/01/2019 11:00:00	0	1,194
16/01/2019 12:00:00	0	1,181
16/01/2019 13:00:00	0	1,164
16/01/2019 14:00:00	0	1,157
16/01/2019 15:00:00	0	1,15
16/01/2019 16:00:00	0	1,15
16/01/2019 17:00:00	0	1,146
16/01/2019 18:00:00	0	1,143
16/01/2019 19:00:00	0	1,146
16/01/2019 20:00:00	0	1,148
16/01/2019 21:00:00	0	1,16
16/01/2019 22:00:00	0	1,154
16/01/2019 23:00:00	0	1,149
17/01/2019 00:00:00	0	1,147
17/01/2019 01:00:00	0	1,148

Fonte: Autora (2024).

Tabela 3.1 – Dados do Evento 1. **(CONCLUSÃO)**

EVENTO 1	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
17/01/2019 02:00:00	0	1,151
17/01/2019 03:00:00	0	1,157
17/01/2019 04:00:00	0	1,154
17/01/2019 05:00:00	0	1,155
17/01/2019 06:00:00	0	1,155
17/01/2019 07:00:00	0	1,153
17/01/2019 08:00:00	0	1,153
17/01/2019 09:00:00	0	1,152
17/01/2019 10:00:00	0	1,148
17/01/2019 11:00:00	0	1,147
17/01/2019 12:00:00	0	1,141
17/01/2019 13:00:00	0	1,132

Fonte: Autora (2024).

## APÊNDICE B – EVENTO 2

Tabela B.27 – Dados do Evento 2. (CONTINUAÇÃO)

EVENTO 2	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
14/03/2019 04:00:00	0	1,141
14/03/2019 05:00:00	0	1,14
14/03/2019 06:00:00	0	1,135
14/03/2019 07:00:00	0	1,132
14/03/2019 08:00:00	0	1,131
14/03/2019 09:00:00	0	1,129
14/03/2019 10:00:00	0	1,129
14/03/2019 11:00:00	0,229	1,131
14/03/2019 12:00:00	0	1,128
14/03/2019 13:00:00	0	1,126
14/03/2019 14:00:00	0	1,119
14/03/2019 15:00:00	0	1,12
14/03/2019 16:00:00	0	1,114
14/03/2019 17:00:00	1,372	1,112
14/03/2019 18:00:00	11,79	1,79
14/03/2019 19:00:00	0,229	1,393
14/03/2019 20:00:00	0,914	1,232
14/03/2019 21:00:00	4,115	1,612
14/03/2019 22:00:00	3,2	1,673
14/03/2019 23:00:00	0	1,576
15/03/2019 00:00:00	1,6	1,399
15/03/2019 01:00:00	0,686	1,523
15/03/2019 02:00:00	0,457	1,394
15/03/2019 03:00:00	15,37	2,139
15/03/2019 04:00:00	30,71	3,72
15/03/2019 05:00:00	22,1	4,258
15/03/2019 06:00:00	1,143	3,964
15/03/2019 07:00:00	0	3,47
15/03/2019 08:00:00	0	2,673
15/03/2019 09:00:00	0,229	1,822
15/03/2019 10:00:00	0	1,469
15/03/2019 11:00:00	0	1,387
15/03/2019 12:00:00	0	1,341
15/03/2019 13:00:00	0	1,312
15/03/2019 14:00:00	0	1,286
15/03/2019 15:00:00	0	1,27

Fonte: Autora (2024).



Tabela 3.1 – Dados do Evento 2. (CONTINUAÇÃO)

EVENTO 2	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
15/03/2019 16:00:00	0	1,27
15/03/2019 17:00:00	0	1,252
15/03/2019 18:00:00	0	1,238
15/03/2019 19:00:00	0	1,229
15/03/2019 20:00:00	0	1,219
15/03/2019 21:00:00	0,914	1,222
15/03/2019 22:00:00	0,457	1,23
15/03/2019 23:00:00	0	1,218
16/03/2019 00:00:00	0	1,213
16/03/2019 01:00:00	0	1,217
16/03/2019 02:00:00	0	1,212
16/03/2019 03:00:00	0	1,212
16/03/2019 04:00:00	0,457	1,208
16/03/2019 05:00:00	0,229	1,224
16/03/2019 06:00:00	0,229	1,235
16/03/2019 07:00:00	1,6	1,296
16/03/2019 08:00:00	0	1,304
16/03/2019 09:00:00	0	1,245
16/03/2019 10:00:00	0	1,218
16/03/2019 11:00:00	3,2	1,282
16/03/2019 12:00:00	4,496	1,402
16/03/2019 13:00:00	12,6	1,862
16/03/2019 14:00:00	0	1,64
16/03/2019 15:00:00	0	1,422
16/03/2019 16:00:00	0	1,342
16/03/2019 17:00:00	0	1,303
16/03/2019 18:00:00	0	1,271
16/03/2019 19:00:00	0	1,252
16/03/2019 20:00:00	0	1,237
16/03/2019 21:00:00	0	1,225
16/03/2019 22:00:00	0	1,214
16/03/2019 23:00:00	0	1,207
17/03/2019 00:00:00	0	1,201
17/03/2019 01:00:00	0	1,196
17/03/2019 02:00:00	0	1,191
17/03/2019 03:00:00	0	1,188
17/03/2019 04:00:00	0	1,187
17/03/2019 05:00:00	0	1,181
17/03/2019 06:00:00	0	1,178
17/03/2019 07:00:00	0	1,176
17/03/2019 08:00:00	0	1,174
17/03/2019 09:00:00	0	1,172
17/03/2019 10:00:00	0	1,169

Fonte: Autora (2024).

Tabela 3.1 – Dados do Evento 2. **(CONCLUSÃO)**

EVENTO 2	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
17/03/2019 11:00:00	0	1,168
17/03/2019 12:00:00	0	1,166
17/03/2019 13:00:00	0	1,178
17/03/2019 14:00:00	0	1,176
17/03/2019 15:00:00	0	1,161
17/03/2019 16:00:00	0	1,156
17/03/2019 17:00:00	0	1,155
17/03/2019 18:00:00	0	1,152
17/03/2019 19:00:00	0	1,153
17/03/2019 20:00:00	0	1,149
17/03/2019 21:00:00	0	1,149
17/03/2019 22:00:00	0	1,147
17/03/2019 23:00:00	0	1,148
18/03/2019 00:00:00	0	1,151
18/03/2019 01:00:00	0	1,152
18/03/2019 02:00:00	0	1,151
18/03/2019 03:00:00	0	1,15
18/03/2019 04:00:00	0	1,151
18/03/2019 05:00:00	0	1,15
18/03/2019 06:00:00	0	1,148
18/03/2019 07:00:00	0	1,146
18/03/2019 08:00:00	0	1,146

Fonte: Autora (2024).

### APÊNDICE C – EVENTO 3

Tabela 3.1 – Dados do Evento 3. (CONTINUAÇÃO)

EVENTO 3	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
24/02/2024 14:00:00	0	0,12
24/02/2024 15:00:00	2,95	0,811
24/02/2024 16:00:00	36,07	1,502
24/02/2024 17:00:00	12,19	2,644
24/02/2024 18:00:00	0	2,317
24/02/2024 19:00:00	0	1,547
24/02/2024 20:00:00	0	0,571
24/02/2024 21:00:00	1,524	0,28
24/02/2024 22:00:00	23,88	1,634
24/02/2024 23:00:00	29,46	3,01
25/02/2024 00:00:00	2,54	2,88
25/02/2024 01:00:00	3,81	2,68
25/02/2024 02:00:00	3,302	2,203
25/02/2024 03:00:00	0,254	1,363
25/02/2024 04:00:00	0,254	0,588
25/02/2024 05:00:00	0,508	0,304
25/02/2024 06:00:00	0	0,227
25/02/2024 07:00:00	0	0,168
25/02/2024 08:00:00	0	0,133
25/02/2024 09:00:00	0,254	0,129
25/02/2024 10:00:00	0	0,111
25/02/2024 11:00:00	2,032	0,097
25/02/2024 12:00:00	2,286	0,12
25/02/2024 13:00:00	8,38	0,878
25/02/2024 14:00:00	11,94	1,484
25/02/2024 15:00:00	17,27	2,186
25/02/2024 16:00:00	4,572	2,247
25/02/2024 17:00:00	0	1,684
25/02/2024 18:00:00	0,254	0,957
25/02/2024 19:00:00	0,254	0,421
25/02/2024 20:00:00	2,54	0,287
25/02/2024 21:00:00	2,032	0,284
25/02/2024 22:00:00	0	0,231
25/02/2024 23:00:00	0	0,197

Fonte: Autora (2024).

Tabela 3.1 – Dados do Evento 3. (CONCLUSÃO)

EVENTO 3	CHUVA (mm)	NÍVEL (m)
26/02/2024 00:00:00	0,254	0,141
26/02/2024 01:00:00	0	0,113
26/02/2024 02:00:00	0	0,092
26/02/2024 03:00:00	1,016	0,087
26/02/2024 04:00:00	0	0,092
26/02/2024 05:00:00	0	0,077
26/02/2024 06:00:00	0	0,108
26/02/2024 07:00:00	0	0,042
26/02/2024 08:00:00	1,27	0,043
26/02/2024 09:00:00	0,254	0,068
26/02/2024 10:00:00	0	0,054
26/02/2024 11:00:00	3,556	0,241
26/02/2024 12:00:00	0,508	0,291
26/02/2024 13:00:00	0,508	0,275
26/02/2024 14:00:00	0,508	0,27
26/02/2024 15:00:00	0	0,176
26/02/2024 16:00:00	0	0,119
26/02/2024 17:00:00	0	0,084
26/02/2024 18:00:00	0	0,065
26/02/2024 19:00:00	0	0,054
26/02/2024 20:00:00	0	0,048
26/02/2024 21:00:00	0	0,033
26/02/2024 22:00:00	0	0,046
26/02/2024 23:00:00	0	0,047
27/02/2024 00:00:00	0,254	0,027
27/02/2024 01:00:00	0	0,016
27/02/2024 02:00:00	0	0,006

Fonte: Autora (2024).

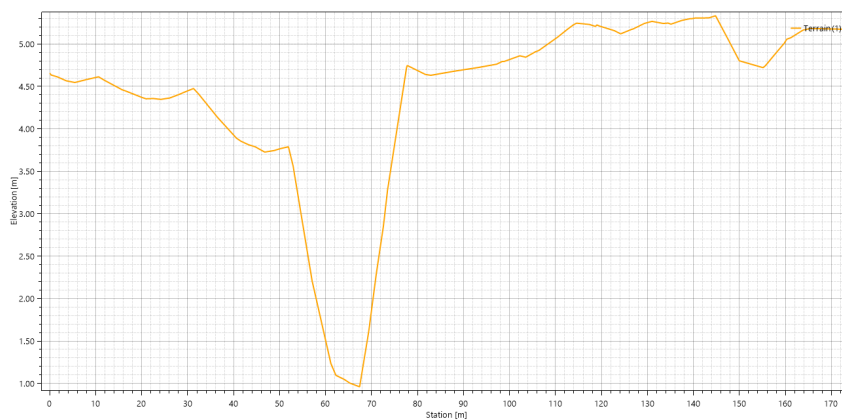
## D PRINCIPAIS DIFICULDADES

Apesar das falhas humanas no processo, existiram empecilhos que dificultaram o processamento dos dados nos programas, principalmente no HEC-RAS. Feito o processamento dos arquivos no QGIS e inseridos no programa para compor a geometria, foram feitas análises para saber qual malha seria utilizada, visando a parte interna e externa ao rio com malhas diferentes.

Dessa forma, foram realizados inúmeros testes, no entanto, os gráficos permaneciam fora do esperado e, em geral, deslocados, mesmo com a garantia da inserção dos dados de precipitação no campo dos dados meteorológicos correta e o mesmo se fez para os dados observados ao inserir os dados do nível do rio. A partir desses testes, foram surgindo as condições de mudança de malha fora do rio, sendo dentro do rio constante de  $5 \times 5 m^2$ , e de alteração de declividade da profundidade normal do rio no exutório, isto é, provocando um maior alagamento a jusante.

Outro obstáculo enfrentado na geometria do rio foi a malha do modelo digital de terreno, com células de  $5 \times 5 m^2$ , onde não há uma batimetria, ou seja, deturpa-se o formato do rio na realidade, pois o MDT tenta representar o rio de forma simplificada. A seção transversal do rio interpretada pelo programa (HEC-RAS) pode ser vista através da Figura 27, enquanto a fotografia da Figura 28 mostra a realidade do formato observado de cima.

Figura 27 – Plotagem da seção transversal do rio no exutório.



Fonte: Autora (2024).

Uma falha no modelo que também pode ser citada é a falta de consideração, pelos programas, da rede de drenagem urbana, incluindo as bocas-de-lobo, as galerias e as sarjetas, que reduziriam o número de poças nos resultados finais dos eventos. Ainda que hajam estratégias para minimizar isso, algumas delas foram utilizadas, por exemplo, os testes de declividade e aumento de malha.

Em consequência disso, poderia-se ter buscado dados de melhor qualidade através da realização da batimetria do rio, dessa forma os resultados do escoamento base seriam mais acurados. Além disso, se fossem contabilizadas todas as nascentes do rio, sem exceção, ter-se-ia um resultado mais preciso como base.

Figura 28 – Visualização da seção transversal do rio no exutório em campo.



Fonte: Autora (2024).