

Universidade Federal Fluminense

RAUL SIMIQUELI CABRAL

Modelagem e Simulação de Eventos de  
Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio  
Pomba. Estudo de Caso: Santo Antônio de  
Pádua, RJ

VOLTA REDONDA

2024

RAUL SIMIQUELI CABRAL

Modelagem e Simulação de Eventos de  
Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio  
Pomba. Estudo de Caso: Santo Antônio de  
Pádua, RJ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

Orientador:

Wagner Rambaldi Telles

Coorientador:

Ricardo Silveira Sousa

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VOLTA REDONDA

2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C117m Cabral, Raul Simiqueli  
Modelagem e Simulação de Eventos de Inundação na Bacia  
Hidrográfica do Rio Pomba. Estudo de Caso: Santo Antônio de  
Pádua, RJ / Raul Simiqueli Cabral. - 2024.  
108 f.: il.

Orientador: Wagner Rambaldi Telles.  
Coorientador: Ricardo Silveira Sousa.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta  
Redonda, Volta Redonda, 2024.

1. Modelagem Matemática e Computacional. 2. Inundações. 3.  
Software IBER. 4. Santo Antônio de Pádua. 5. Produção  
intelectual. I. Telles, Wagner Rambaldi, orientador. II.  
Sousa, Ricardo Silveira, coorientador. III. Universidade  
Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e  
Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

CDD - XXX

# Modelagem e Simulação de Eventos de Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Pomba. Estudo de Caso: Santo Antônio de Pádua, RJ

Raul Simiqueli Cabral

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada por:

Documento assinado digitalmente  
 **WAGNER RAMBALDI TELLES**  
Data: 21/09/2024 16:04:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Wagner Rambaldi Telles, D.Sc. / MCCT-UFF

Documento assinado digitalmente  
 **FABIO FREITAS FERREIRA**  
Data: 17/09/2024 09:29:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Presidente)

---

Prof. Fábio Freitas Ferreira, D.Sc. / MCCT-UFF

---

Prof. Jader Lugon Junior, D.Sc. / IFFluminense

Documento assinado digitalmente  
 **JADER LUGON JUNIOR**  
Data: 21/09/2024 11:33:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Volta Redonda, 29 de Agosto de 2024.

*Dedico este trabalho à Deus e aos meus familiares.*

# Agradecimentos

Nestes anos de dedicação ao mestrado, foram muitas adversidades enfrentadas em minha vida pessoal e profissional. Deste modo, gostaria de externar meus profundos e sinceros agradecimentos a algumas pessoas que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradacer a Deus, meu alicerce para encarar os desafios propostos e superar todos os obstáculos, me concedendo saúde e sabedoria para seguir em frente com este propósito.

A minha família, em especial meus pais, Rubens Cabral e Cely Simiqueli, por todo apoio e incentivo durante toda minha vida. Aos meus irmãos, por auxiliar nas adversidades ao longo do caminho. E, principalmente, aos meus filhos, Maria Clara e Rafael, que enfrentaram momentos complicados ao meu lado durante este período e sempre foram minha maior motivação na conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. D.Sc. Wagner Rambaldi Telles, que esteve sempre disponível para sanar todas as dúvidas surgidas, e por acompanhar de perto a execução deste trabalho. Ao meu coorientador, Prof. D.Sc. Ricardo Silveira Sousa, que não poupou esforços para me ajudar a fazer com que essa dissertação fosse concretizada.

À todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia (PPG-MCCT) da Universidade Federal Fluminense (UFF), que participaram de forma direta e indireta na construção deste trabalho, com sua dedicação nos ensinamentos durante a realização do curso.

A todos os demais que contribuíram e me incentivaram na realização deste trabalho, em especial aos colegas servidores do Instituto Federal Fluminense *campus* Santo Antônio de Pádua.

Esse estudo foi apoiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (projeto com número de processo E47/2021-SEI260003/016517/2021-E26/210.107/2022).

*“O Senhor o protegerá de todo o mal, protegerá a sua vida.  
O Senhor protegerá a sua saída e a sua chegada, desde agora e para sempre.”*

*Salmo 121:7-8*

# Resumo

O município de Santo Antônio de Pádua, localizado no Noroeste do estado do Rio de Janeiro, possui uma intrínseca relação com o Rio Pomba, que corta a cidade de um extremo a outro. Desenvolvida às suas margens, a cidade é constantemente surpreendida por eventos de enchentes e inundações que ocorrem nos períodos chuvosos, às quais causam diversos prejuízos, de ordem econômicos, sociais, ambientais e de saúde pública para a população da cidade. Diante do exposto, este trabalho traz, em sua concepção, uma análise destes eventos de inundação no município, buscando o levantamento de informações referentes às características da bacia hidrográfica do Rio Pomba, bem como da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna, instalada à montante do município. Também faz parte do escopo deste estudo a caracterização geográfica e histórica do município, trazendo informações sobre as inundações enfrentadas pelos munícipes. Utilizou-se o software IBER para a análise proposta, no qual é possível realizar a modelagem hidrológica e escoamento superficial, permitindo, assim, prever o comportamento do rio em variadas situações, a partir de definições das características topográficas da região de interesse, vazão de entrada, entre outras. A partir destas definições, é possível realizar simulações, onde o software emprega o Método dos Volumes Finitos (MVF) para resolver as equações de Saint Venant em duas direções, que representam o fenômeno de escoamento em canais abertos. Neste trabalho, foram realizadas simulações buscando a comparação entre diferentes Modelos Digitais de Elevação (MDEs) disponíveis para a região de Santo Antônio de Pádua, bem como a comparação dos resultados obtidos em ambiente computacional com eventos reais de inundações ocorridos no município no mês de janeiro dos anos 2022 e 2023. Por fim, foram gerados gráficos relacionando a vazão da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna com o nível do Rio Pomba no município de Santo Antônio de Pádua. Com base nos resultados obtidos, o desenvolvimento da modelagem e a utilização do software IBER foram considerados satisfatórios, uma vez que houve um bom ajuste entre as curvas dos gráficos dos dados simulados e das estações hidrometeorológicas para o período considerado. Assim, a solução do problema proposto pode auxiliar na prevenção e minimizar os danos causados pelos eventos de inundação no município.

# Abstract

The municipality of Santo Antônio de Pádua, located in the northwest region of the state of Rio de Janeiro, has a deep connection with the Pomba River, which flows through the city from one end to the other. Developed along its banks, the city is frequently affected by floods and inundations during the rainy seasons, which cause various economic, social, environmental, and public health issues for the local population. Given this context, this study presents an analysis of these flood events in the municipality, aiming to gather information about the characteristics of the Pomba River Basin and the Barra do Braúna Hydroelectric Plant (UHE), located upstream from the municipality. The scope of this study also includes the geographical and historical characterization of the municipality, providing insights into the floods experienced by residents. For the proposed analysis, the IBER software was used, which enables hydrological modeling and surface runoff simulations, allowing for predictions of the river's behavior under different scenarios, based on the topographic characteristics of the region of interest, inflow rates, and other factors. Using these parameters, simulations were conducted, where the software employs the Finite Volume Method (FVM) to solve the Saint Venant equations in two dimensions, representing the flow phenomenon in open channels. In this study, simulations were performed to compare different Digital Elevation Models (DEMs) available for the Santo Antônio de Pádua region, as well as to compare the results obtained in the computational environment with actual flood events that occurred in the municipality in January 2022 and 2023. Finally, graphs were generated to relate the flow rate of the Barra do Braúna Hydroelectric Plant (UHE) with the Pomba River's water level in the municipality of Santo Antônio de Pádua. Based on the results obtained, the development of the modeling and the use of the IBER software were considered satisfactory, as there was a good match between the simulated data curves and the hydrometeorological station data for the period considered. Therefore, the proposed solution can assist in preventing and minimizing the damage caused by flood events in the municipality.

# Palavras-chave

1. Modelagem Matemática e Computacional.
2. Inundações e Enchentes.
3. Software IBER.
4. Rio Pomba.
5. Santo Antônio de Pádua.

# Glossário

ALOS	:	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
ANA	:	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	:	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTER GDEM	:	<i>Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model</i>
CAT LEO	:	Companhia de Luz Cataguases Leopoldina
HEC-RAS	:	<i>Hydrologic Engineering Center's River Analysis System</i>
HidroWeb	:	Rede Hidrometeorológica Nacional
IBGE	:	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IoT	:	Internet das Coisas
INEA	:	Instituto Estadual do Ambiente
JAXA	:	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LI	:	Licença de Instalação
LP	:	Licença Prévia
LO	:	Licença de Operação
MDE	:	Modelos Digitais de Elevação
MVF	:	Método dos Volumes Finitos
NASA	:	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PAE	:	Plano de Ação de Emergência
PALSAR	:	<i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
RHN	:	Rede Hidrometeorológica Nacional
RTIN	:	<i>Rectangles or Triangulated Irregular Network</i>
SAR	:	Sistema de Acompanhamento de Reservatórios

# Glossário

SIG	:	Sistemas de Informação Geográfica
SNIRH	:	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	:	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWMM	:	<i>Storm Water Management Model</i>
UFF	:	Universidade Federal Fluminense
UHE	:	Usina Hidrelétrica
URL	:	<i>Uniform Resource Locator</i>
UTM	:	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
WGS84	:	<i>World Geodetic System</i>
ZAS	:	Zonas de Auto Salvamento
ZID	:	Zona de Impacto Direto

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>19</b>
1.1 Justificativa . . . . .	23
1.2 Objetivos . . . . .	25
1.2.1 Objetivo Geral . . . . .	25
1.2.2 Objetivos Específicos . . . . .	25
1.3 Organização do Trabalho . . . . .	26
<b>2 Descrição do Problema Proposto</b>	<b>27</b>
2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Pomba . . . . .	27
2.2 UHE Barra do Braúna . . . . .	30
2.3 Caracterização Histórica e Geográfica do Município de Santo Antônio de Pádua . . . . .	32
2.4 Eventos Críticos Envolvendo as Cheias no Município de Santo Antônio de Pádua . . . . .	34
<b>3 Formulação Matemática e Solução do Problema Propostos</b>	<b>38</b>
3.1 Modelagem Matemática do Problema Proposto . . . . .	38
3.2 O Software IBER . . . . .	40
3.3 Obtenção do Modelos Digitais de Elevação . . . . .	43
3.3.1 Aquisição de Dados de Topografia da Região de Interesse . . . . .	44

---

3.3.2	Aquisição de Dados de Edificações da Região de Interesse . . . . .	47
3.4	Aquisição de Dados de Vazão e Níveis D'Água . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>54</b>
4.1	Desenvolvimento da Etapa de Pré-Processamento para a Região de Estudos	54
4.1.1	Atribuição dos Dados de Topografia . . . . .	60
4.2	Análise dos Modelos Digitais de Elevação e das Superfícies IBER . . . . .	62
4.3	Validação das Simulações para Eventos de Inundações em Santo Antônio de Pádua . . . . .	77
4.3.1	Simulação do Evento de Inundação de Janeiro de 2022 . . . . .	79
4.3.2	Simulação do Primeiro Evento de Inundação de Janeiro de 2023 . .	85
4.3.3	Simulação de Evento de Inundação no Final de Janeiro de 2023 . .	91
4.4	Relação Vazão da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna com o Nível do Rio Pomba . . . . .	96
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>100</b>
5.1	Conclusões . . . . .	100
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	102
	<b>Referências</b>	<b>104</b>

# Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática de enchentes e inundações. . . . .	20
2.1	Localização da bacia hidrográfica do Rio Pomba. . . . .	29
2.2	Localização do UHE Barra do Braúna. . . . .	31
2.3	Exemplo de ZID identificada no PAE (ZID 17 em Santo Antônio de Pádua). . . . .	32
2.4	Ponte Raul Veiga sobre o Rio Pomba em Santo Antônio de Pádua. . . . .	34
2.5	Inundação em Santo Antônio de Pádua no ano de 1979. . . . .	36
2.6	Inundação em Santo Antônio de Pádua no ano de 2012. . . . .	37
3.1	Tela inicial do software IBER. . . . .	41
3.2	Exemplo de malhas estruturadas e não estruturadas construídas no software IBER. . . . .	43
3.3	Seleção da área de interesse para busca dos MDEs. . . . .	45
3.4	MDEs encontrados para a região de interesse. . . . .	46
3.5	Regiões do mundo com informações disponíveis para <i>download</i> . . . . .	47
3.6	Região de abrangência incluindo o município de Santo Antônio de Pádua. . . . .	48
3.7	Reservatórios na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. . . . .	49
3.8	Informações dos reservatórios na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. . . . .	49
3.9	Portal HidroWeb. . . . .	51
3.10	Mapa interativo referente a Rede Hidrometeorológica Nacional, em destaque a região de estudo. . . . .	52
3.11	Região ao redor de Santo Antônio de Pádua e estações da Rede Hidrometeorológica Nacional nas proximidades, em destaque a estação denominada UHE BARRA DO BRAÚNA BARRAMENTO. . . . .	52
3.12	<i>Download</i> de dados convencionais. . . . .	53

---

3.13	<i>Download</i> de dados telemétricos. . . . .	53
4.1	Reprojeção de coordenadas no software QGIS. . . . .	55
4.2	Imagem de fundo e superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas. . . . .	55
4.3	Contorno das superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas. . . . .	56
4.4	Imagem de fundo e superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas, incluindo os "anéis". . . . .	56
4.5	Contorno das superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas, incluindo os "anéis". . . . .	57
4.6	Uso do solo utilizado nas simulações. . . . .	58
4.7	Uso do solo utilizado nas simulações com as superfícies contendo os "anéis". . . . .	58
4.8	Malha gerada para as superfícies contínuas. . . . .	59
4.9	Malha gerada para as superfícies com "anéis". . . . .	59
4.10	MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros. . . . .	61
4.11	MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros e elevação das edificações da área urbanizada em 3 metros. . . . .	61
4.12	MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros e exclusão das áreas edificadas. . . . .	62
4.13	Configuração do período a ser simulado no IBER. . . . .	63
4.14	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 1, decorridos 86.400 s de simulação. . . . .	63
4.15	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 2, decorridos 86.400 s de simulação. . . . .	64
4.16	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 3, decorridos 86.400 s de simulação. . . . .	64
4.17	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 4, decorridos 86.400 s de simulação. . . . .	65
4.18	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 5, decorridos 86.400 s de simulação. . . . .	65

---

4.19	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 6, decorridos 64.800 s de simulação. . . . .	66
4.20	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 7, decorridos 86.400 s de simulação. . . . .	66
4.21	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 8, decorridos 86.400 s de simulação. . . . .	67
4.22	Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 9, decorridos 54.000 s de simulação. . . . .	67
4.23	Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contínuas. . . . .	68
4.24	Profundidade da lâmina d'água utilizando MDE PAE e superfícies contínuas.	69
4.25	Profundidade da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE e superfícies contínuas. . . . .	69
4.26	Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contínuas. . . . .	70
4.27	Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE PAE e superfícies contínuas.	70
4.28	Elevação da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE e superfícies contínuas. . . . .	70
4.29	Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 com elevação das edificações e superfícies contínuas. . . . .	71
4.30	Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas. . . . .	71
4.31	Profundidade da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas. . . . .	72
4.32	Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 com elevação das edificações e superfícies contínuas. . . . .	73
4.33	Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas. . . . .	73
4.34	Elevação da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas. . . . .	73

---

4.35	Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contendo anéis. . . . .	74
4.36	Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE PAE e superfícies contendo anéis. . . . .	74
4.37	Profundidade da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com superfícies contendo anéis. . . . .	75
4.38	Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contendo anéis. . . . .	76
4.39	Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE PAE e superfícies contendo anéis. . . . .	76
4.40	Elevação da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com superfícies contendo anéis. . . . .	76
4.41	Localização das estações hidrometeorológicas no trecho de interesse. . . . .	77
4.42	Remoção dos elementos secos da simulação referente ao Cenário 5. . . . .	79
4.43	Definição das condições de contorno de entrada, Janeiro de 2022. . . . .	79
4.44	Mapa de máximos de toda a região de interesse, em 1.209.600 s. . . . .	80
4.45	Mapa de máximos da cidade de Santo Antônio de Pádua, em 1.209.600 s. . . . .	81
4.46	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Jusante, em Janeiro de 2022. . . . .	82
4.47	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Paraoquena, em Janeiro de 2022. . . . .	82
4.48	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Ponte do Nando, em Janeiro de 2022. . . . .	83
4.49	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Centro, em Janeiro de 2022. . . . .	84
4.50	Definição das condições de contorno de entrada, 05 a 16 de Janeiro de 2023. . . . .	85
4.51	Mapa de máximos de toda a região de interesse, em 1.123.200 s. . . . .	86
4.52	Mapa de máximos da cidade de Santo Antônio de Pádua, em 1.123.200 s. . . . .	86

---

4.53	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Jusante, em Janeiro de 2023. . . . .	87
4.54	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Paraoquena, em Janeiro de 2023. . . . .	88
4.55	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Ponte do Nando, em Janeiro de 2023. . . . .	89
4.56	Gráfico comparativo entre os dados medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Centro, em Janeiro de 2023. . . . .	90
4.57	Definição das condições de contorno de entrada, 20 a 30 de Janeiro de 2023. . . . .	91
4.58	Mapa de máximos de toda a região de interesse, em 1.036.800 s. . . . .	92
4.59	Mapa de máximos da cidade de Santo Antônio de Pádua, em 1.036.800 s. . . . .	93
4.60	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Jusante, final de Janeiro de 2023. . . . .	93
4.61	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Paraoquena, final de Janeiro de 2023. . . . .	94
4.62	Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Ponte do Nando, final de Janeiro de 2023. . . . .	95
4.63	Gráfico comparativo entre os dados medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Centro, final de Janeiro de 2023. . . . .	95
4.64	Gráfico relacionando a vazão da UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Jusante. . . . .	97
4.65	Gráfico relacionando a vazão da UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Paraoquena. . . . .	97
4.66	Gráfico relacionando vazão UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Ponte do Nando. . . . .	98
4.67	Gráfico relacionando a vazão da UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Centro. . . . .	99

# Lista de Tabelas

2.1	Importância das bacias hidrográficas e especificidades da bacia do Rio Pomba.	30
3.1	Coordenadas X e Y (mínimas e máximas) da área de interesse. . . . .	46
4.1	Dados de topografia utilizados nas simulações. . . . .	60
4.2	Coordenadas X e Y dos pontos com a geração dos gráficos. . . . .	68
4.3	Coordenadas X e Y das estações hidrometeorológicas. . . . .	78
4.4	Comparação de nível máximo e cota de transbordo - Janeiro de 2022. . . .	84
4.5	Comparação de nível máximo e cota de transbordo - primeiro evento de Janeiro de 2023. . . . .	91
4.6	Comparação de Nível Máximo e Cota de Transbordo Evento de Inundação no Final de Janeiro de 2023. . . . .	96

# Capítulo 1

## Introdução

O ciclo hidrológico, também conhecido como ciclo da água, é o processo contínuo de circulação da água na Terra, envolvendo os estados líquido, gasoso e sólido. Esse ciclo é impulsionado pela energia solar e pela gravidade, que fazem com que a água se mova entre a superfície terrestre, a atmosfera e os corpos d'água. Esse ciclo é fundamental para a manutenção da vida no planeta, regulando o clima, abastecendo os reservatórios de água doce e suportando ecossistemas diversos [4].

Ainda no que se refere ao ciclo hidrológico, o mesmo pode ser entendido em várias fases principais. A evaporação é a fase em que a água líquida se transforma em vapor de água e sobe para a atmosfera. Isso ocorre principalmente nos oceanos, lagos e rios, mas também em superfícies úmidas e na transpiração das plantas. A energia solar aquece a superfície da água, fazendo com que as moléculas de água se movam mais rapidamente e escapem para o ar como vapor. Após a evaporação, ocorre a condensação, que é quando o vapor de água na atmosfera se resfria e se condensa em pequenas partículas de água líquida ou cristais de gelo, formando nuvens. A condensação acontece quando o vapor de água atinge uma temperatura mais baixa ou encontra partículas de poeira e outras impurezas que servem como núcleos de condensação [3].

Quando as partículas de água ou cristais de gelo nas nuvens se juntam e se tornam grandes o suficiente, elas caem de volta à Terra como precipitação. A precipitação pode ocorrer de várias formas, incluindo chuva, neve, granizo e neblina, dependendo das condições climáticas e atmosféricas.

Parte da água que atinge a superfície da Terra infiltra-se no solo, recarregando os aquíferos e outros reservatórios subterrâneos. A infiltração é influenciada por vários fatores, como a permeabilidade do solo, a vegetação e a topografia. A água infiltrada pode ser

armazenada no solo como umidade ou continuar a se mover para baixo, alimentando os aquíferos. A água que não infiltra no solo flui sobre a superfície terrestre como escoamento superficial, movendo-se para rios, lagos e oceanos. Este escoamento é responsável pelo transporte de sedimentos, nutrientes e poluentes, podendo causar erosão e inundações, especialmente em áreas urbanizadas ou com pouca vegetação [18].

Em particular, a relevância do ciclo hidrológico para a região de Santo Antônio de Pádua, cidade do Noroeste Fluminense, é significativa, especialmente considerando os eventos de cheias frequentes na mesma. A cidade, localizada no estado do Rio de Janeiro (RJ), é cortada pelo Rio Pomba, cuja bacia hidrográfica desempenha um papel importante no ciclo hidrológico local. Durante períodos de chuvas intensas, o aumento do escoamento superficial pode levar a enchentes e inundações, afetando a vida da população local, a infraestrutura urbana e as atividades econômicas. Entender como o ciclo hidrológico funciona nesta região específica é essencial para desenvolver estratégias eficazes de gerenciamento de recursos hídricos e mitigação de desastres naturais [33].

Cabe destacar, porém, que as enchentes e inundações são fenômenos distintos. As enchentes ou cheias são definidas pela elevação das águas de um canal, curso d'água ou rio, devido ao aumento da vazão, atingindo sua cota máxima sem que ocorra o transbordamento. Já as inundações são caracterizadas pelo transbordamento das águas de um curso d'água, atingindo a planície de inundação ou área de várzea [26]. Na Figura 1.1 são representadas as definições de enchentes e inundações.



Figura 1.1: Representação esquemática de enchentes e inundações.  
Fonte: Adaptado de Ministério das Cidades/IPT [26].

O estudo detalhado do ciclo hidrológico permite a identificação dos principais fatores que contribuem para a ocorrência de cheias e inundações, como a quantidade e intensidade da precipitação, a capacidade de infiltração do solo e as características da bacia hidrográfica do Rio Pomba. A compreensão do ciclo hidrológico é fundamental para a implementação de medidas de planejamento urbano que possam reduzir os impactos das cheias, tais como a construção de sistemas eficientes de drenagem, a conservação das áreas de recarga de aquíferos e a proteção das zonas ripárias. Portanto, a análise do ciclo hidrológico não só proporciona uma base científica para a compreensão dos processos naturais que afetam Santo Antônio de Pádua, mas também fornece informações essenciais para a tomada de decisões estratégicas que visam a sustentabilidade e resiliência da cidade frente aos eventos hidrológicos extremos.

Dentro desse contexto, os softwares de modelagem hidrodinâmica são ferramentas poderosas que permitem a simulação e análise de fluxos de água em diferentes ambientes. Estes programas utilizam equações matemáticas complexas para modelar o comportamento dos cursos d'água, considerando fatores como topografia, precipitação, escoamento superficial e infraestrutura existente. Em Santo Antônio de Pádua, a aplicação desses softwares tem se mostrado vital para entender e prever eventos de inundações, como o uso do software IBER apresentado em trabalhos de Carvalho [7] e Oliveira et al. [27].

O software IBER é uma ferramenta de modelagem hidrodinâmica bidimensional (2D) que permite simular o fluxo de água em rios e áreas inundáveis, sendo particularmente útil para identificar áreas de risco de inundação, projetar sistemas de drenagem e planejar medidas de mitigação. Através de simulações detalhadas, é possível prever como diferentes cenários de precipitação e escoamento afetarão a região, permitindo a tomada de decisões informadas para proteger a população e a infraestrutura [45].

Outro software importante é o *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. O HEC-RAS permite a modelagem de fluxos unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D) em sistemas de rios e canais [20, 34].

Além do IBER e HEC-RAS, outras ferramentas como o *Storm Water Management Model* (SWMM) e o MIKE FLOOD são utilizadas para modelagem de sistemas de drenagem urbana e análise de enchentes. O SWMM, por exemplo, é particularmente eficaz na simulação de escoamento superficial em áreas urbanas, permitindo a análise de redes de drenagem pluvial e a identificação de pontos críticos de alagamento. O MIKE FLOOD, por sua vez, integra modelagem hidrológica e hidráulica para fornecer uma visão abran-

gente dos processos de inundação em áreas complexas [34].

Outro ponto a ser destacado, é a utilização de dados de sensores e o monitoramento em tempo real, uma vez que estes são componentes essenciais na gestão moderna de inundações. Em Santo Antônio de Pádua, a implementação de redes de sensores tem permitido uma coleta de dados precisa e contínua, fornecendo informações importantes para a previsão e resposta a eventos de cheias. Dentre estes, destaca-se o sistema de Alerta de Cheias criado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) para informar população e as autoridades sobre a possibilidade de chuvas intensas e inundações graduais, bem como as Estações Hidrometeorológicas de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Os sensores de nível d'água são dispositivos fundamentais instalados em rios, canais e reservatórios para medir a altura da coluna de água em intervalos regulares. Estes sensores transmitem dados em tempo real para centros de monitoramento, onde são analisados para detectar variações significativas que possam indicar o risco de inundação. Em combinação com dados meteorológicos, como precipitação e umidade do solo, os dados de nível d'água permitem a modelagem precisa de eventos de cheias e a emissão de alertas antecipados para a população [20].

Além dos sensores de nível d'água, as estações meteorológicas automáticas desempenham um papel importante no monitoramento em tempo real. Estas estações coletam dados sobre precipitação, temperatura, umidade e velocidade do vento, que são essenciais para a previsão de eventos climáticos extremos. A integração destes dados com os modelos hidrodinâmicos permite simulações mais precisas e a atualização constante das previsões de inundação.

Cabe destacar, que o uso de tecnologia de comunicação, como a Internet das Coisas (IoT), tem revolucionado a coleta e transmissão de dados de sensores. Dispositivos IoT conectados permitem a transmissão de dados em tempo real para plataformas de análise e resposta, facilitando a tomada de decisões rápidas e informadas. Em Santo Antônio de Pádua, a adoção de IoT tem melhorado significativamente a capacidade de monitoramento e resposta a inundações, permitindo a implementação de medidas de mitigação com maior eficiência [38].

A integração de sistemas de informação geográfica (SIG) com dados de sensores e modelos hidrodinâmicos também é uma prática comum na gestão de inundações. O SIG permite a visualização e análise espacial dos dados, facilitando a identificação de áreas de risco e a planificação de medidas de mitigação. Mapas de risco de inundação

gerados por SIG são ferramentas valiosas para autoridades locais, planejadores urbanos e equipes de emergência, proporcionando uma visão clara dos pontos críticos e ajudando na coordenação das ações de resposta.

Portanto, o uso de tecnologia na gestão de inundações em Santo Antônio de Pádua, através da aplicação de softwares de modelagem hidrodinâmica e a utilização de dados de sensores com monitoramento em tempo real, tem se mostrado essencial para a mitigação dos impactos das cheias. Essas ferramentas permitem uma análise precisa e antecipada dos eventos de inundação, ajudando a proteger vidas, infraestrutura e o meio ambiente. A evolução contínua dessas tecnologias promete aprimorar ainda mais a capacidade de resposta e resiliência da região frente aos desafios das mudanças climáticas e eventos climáticos extremos [15].

Diante do exposto, o presente trabalho tem como ponto de partida a necessidade de estudos voltados para conhecer o comportamento dos corpos hídricos, utilizando o software de simulação hidrodinâmica IBER, no qual é possível realizar simulações para escoamento superficial em rios e estuários. Em particular, este trabalho tem como objeto de estudo o comportamento do Rio Pomba, no trecho compreendido entre a barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna e a sede do município de Santo Antônio de Pádua.

A metodologia utilizada neste trabalho envolveu uma pesquisa bibliográfica, que incluiu livros, artigos, revistas e textos científicos relacionados ao tema proposto. Além disso, foram utilizadas equações matemáticas e sua solução numérica, com a ajuda de um software de simulação hidrodinâmica (software IBER), para modelar o escoamento superficial no trecho supracitado do Rio Pomba. O objetivo foi analisar diferentes Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e cenários associados a esse evento para entender as consequências e, assim, servir como uma medida preventiva para minimizar os impactos socioambientais resultantes de situações de inundações.

## 1.1 Justificativa

As inundações em áreas urbanas são um problema de grande relevância, afetando milhões de pessoas em todo o mundo. Estas ocorrências naturais, que podem resultar de chuvas intensas, transbordamento de rios ou falhas nos sistemas de drenagem, têm consequências devastadoras para a infraestrutura, a economia e a vida cotidiana das populações urbanas. Com o crescimento acelerado das cidades e a intensificação das mudanças

climáticas, a frequência e a severidade das inundações têm aumentado, tornando essencial o estudo e a gestão eficaz desse fenômeno [32].

A importância do estudo das inundações em áreas urbanas reside em alguns fatores, tais como:

- Risco significativo para a vida humana, causando perdas de vidas e ferimentos;
- Resultam em danos extensivos à infraestrutura urbana, incluindo estradas, pontes, edifícios e sistemas de transporte público. Tais danos não só acarretam elevados custos de reparação, mas também podem interromper serviços essenciais, como fornecimento de água, eletricidade e saúde, prejudicando ainda mais as comunidades afetadas;
- Economicamente, as inundações causam prejuízos consideráveis. Atividades comerciais e industriais são frequentemente interrompidas, resultando em perdas financeiras para empresas e trabalhadores, bem como perdas de máquinas e equipamentos, móveis e eletrodomésticos;
- O setor agrícola também pode ser gravemente afetado, com a destruição de colheitas e a perda de produtividade.

Esses impactos econômicos se traduzem em desafios adicionais para a recuperação pós-desastre, exigindo recursos significativos para a reconstrução e a retomada das atividades econômicas [17].

Socialmente, as inundações provocam o deslocamento de famílias e comunidades, resultando em crises humanitárias. Muitas vezes, as populações mais vulneráveis são as mais afetadas, vivendo em áreas de risco com pouca infraestrutura de proteção contra enchentes. A perda de moradias e a interrupção da vida cotidiana podem ter efeitos duradouros sobre a saúde mental e o bem-estar das pessoas, além de exacerbar as desigualdades sociais existentes.

Do ponto de vista ambiental, as inundações contribuem para a degradação dos ecossistemas urbanos e naturais. A erosão do solo, a poluição dos corpos d'água e a destruição de habitats são consequências comuns, afetando a biodiversidade e a qualidade dos recursos naturais. As inundações podem, ainda, mobilizar contaminantes e resíduos, agravando problemas de saúde pública e ambiental [5].

Neste contexto, o uso de softwares de modelagem hidrodinâmica se torna um grande aliado no conhecimento do comportamento dos cursos d'água, permitindo, assim, ações

mais acertivas no âmbito do planejamento urbano e também ações de prevenção de defesa civil em momentos de ocorrências dos desastres naturais, mais especificamente, enchentes e inundações.

Dessa forma, a justificativa deste estudo tem como base uma análise de eventos de cheias do Rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua utilizando o software IBER para identificar os principais vetores do fenômeno e levantar informações com as quais seja possível propor soluções com intuito de atenuar o problema ou minimizar os danos por ele causados ao município e sua população.

## 1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, os quais foram responsáveis por nortear esta pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral, realizar uma análise de eventos de cheias do Rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua utilizando o software IBER com o propósito de aplicação prática no que se refere a conhecer e relacionar a vazão da represa da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra da Brauna com o nível do Rio Pomba no município de Santo Antônio de Pádua, bem como a proposição de soluções com intuito de amenizar os danos gerados ao município e sua população.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- Descrever sobre problemas de inundações;
- Caracterizar a região de estudo, ou seja, parte da bacia hidrográfica do Rio Pomba situada na região de Santo Antônio de Pádua;
- Analisar Modelos Digitais de Elevação (MDEs) disponíveis para a região de estudo;
- Modelar e simular o comportamento do Rio Pomba com diferentes vazões de entrada oriundas da UHE Barra de Braúna;
- Analisar eventos de inundações no município de Santo Antônio de Pádua;

- Elaborar e analisar mapas de inundações e gráficos envolvendo a profundidade e elevação máximas dos eventos simulados no município de Santo Antônio de Pádua.

## 1.3 Organização do Trabalho

Neste capítulo, Capítulo 1, foi feita uma breve exposição sobre o ciclo hidrológico, bem como a importância de conhecer seu comportamento e identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de cheias e inundações. Também foi realizada uma breve apresentação de softwares que trabalham com modelagens hidrológicas, seguido da justificativa e objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem detalhada da sobre a bacia hidrográfica do Rio Pomba e da UHE Barra do Braúna. Na sequência, são discutidos aspectos históricos e geográficos do território de Santo Antônio de Pádua, bem como um breve histórico dos problemas relacionados às enchentes e inundações do Rio Pomba no referido município.

Já no Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema, sendo exposto o modelo matemático regido pelas equações de Saint Venant, o qual é utilizado pelo software IBER para resolução e execução de simulações hidrodinâmicas. Também é apresentada a interface do software e algumas condições necessárias para a realização das simulações no mesmo. Por fim, ocorre a exposição da forma de obtenção dos dados necessários para as simulações, tais como a aquisição dos dados de topografia e MDEs, construções presentes no município de Santo Antônio de Pádua e obtenção dos dados de vazão e níveis d'água do Rio Pomba.

Na sequência, Capítulo 4, são expostos os resultados obtidos em simulações de eventos de inundações utilizando diferentes MDEs, bem como uma análise dos mesmos. Também são apresentadas validações dos estudos realizados, ao simular eventos com dados reais de vazão do Rio Pomba e comparar os resultados obtidos nas simulações com os níveis d'água e o comportamento apresentado pelo rio no mesmo período.

No Capítulo 5 encontram-se as conclusões do trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração desta dissertação.

# Capítulo 2

## Descrição do Problema Proposto

Nesse capítulo é realizada a descrição do problema proposto neste trabalho, onde é abordado o contexto de inundações envolvendo a região de Santo Antônio de Pádua, localizada no estado do Rio de Janeiro.

Inicialmente, é realizada a explanação sobre os aspectos gerais do Rio Pomba e sua bacia hidrográfica, pertinentes aos objetivos propostos neste estudo. Em seguida, são apresentadas as características da UHE Barra da Braúna, situada no Rio Pomba e exatamente à montante da área de estudo proposta. Finalmete, é feita a descrição histórica e geográfica do município de Santo Antônio de Pádua.

### 2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Pomba

Uma bacia hidrográfica possui definição simples, mas seu impacto e importância são profundos. Uma bacia hidrográfica é uma área de terra onde toda a água que cai como precipitação (chuva, neve, granizo) drena para um ponto comum, geralmente um rio, lago ou oceano. Elas são delimitadas por divisores de água, que são linhas de alta elevação, como montanhas ou colinas, que separam a direção do escoamento da água. Além disso, sua estrutura pode ser visualizada como uma série de redes de drenagem interconectadas. Essas redes são formadas por rios e riachos que fluem de áreas mais altas para áreas mais baixas, convergindo em um corpo d'água principal.

A bacia hidrográfica inclui todas as áreas de captação de água, bem como os cursos d'água que transportam essa água até o ponto de saída. Sua composição pode ser complexa, envolvendo vários afluentes e sub-bacias que contribuem para o fluxo geral de água na bacia principal [24].

O papel das bacias hidrográficas na gestão dos recursos hídricos é importante. Elas atuam como unidades naturais de captação, armazenamento e distribuição de água. A gestão eficaz de uma bacia envolve o monitoramento e o controle da quantidade e da qualidade da água que entra e sai da bacia. Isso é essencial para garantir o fornecimento sustentável de água para consumo humano, agricultura, indústria e manutenção dos ecossistemas aquáticos. Além disso, são importantes para a prevenção e mitigação de desastres naturais, como inundações e secas.

Uma gestão adequada de uma bacia hidrográfica pode incluir a construção de barragens, reservatórios e sistemas de drenagem para controlar o fluxo de água e evitar danos a áreas habitadas. As práticas de conservação do solo e a restauração de vegetação nativa também desempenham um papel fundamental na redução do escoamento superficial e na melhoria da infiltração de água no solo, ajudando a manter os níveis de água subterrânea [6].

Especificamente, a bacia hidrográfica do Rio Pomba desempenha um papel essencial na região de Santo Antônio de Pádua, no estado do Rio de Janeiro. O Rio Pomba é um afluente do Rio Paraíba do Sul, e sua bacia abrange áreas significativas de Minas Gerais e Rio de Janeiro. A bacia hidrográfica do Rio Pomba possui características particulares que influenciam diretamente a dinâmica hídrica da região [36].

Com sua nascente localizada no município de Barbacena, estado de Minas Gerais, o Rio Pomba, percorre aproximadamente 265 km até sua chegada na foz, o Rio Paraíba do Sul e seus principais contribuintes são os rios Novo, Piau, Xopotó, Formoso e Pardo. Apresenta uma área de drenagem de 8.616 km<sup>2</sup>, abrangendo 38 municípios, sendo 35 mineiros e 3 fluminenses [1]. Os municípios de maior importância são Cataguases, Leopoldina, Santos Dumont, São João Nepomuceno, Ubá e Visconde do Rio Branco, em Minas Gerais, e Santo Antônio de Pádua e Miracema, no Rio de Janeiro. Destaca-se que o município de Santo Antônio de Pádua está muito próxima à sua foz, que ocorre nos municípios de Aperibé e Itaocara, conforme mostrado na Figura 2.1.

A bacia do Rio Pomba é caracterizada por uma topografia variada, com áreas montanhosas e planícies, que afetam o comportamento do escoamento superficial e a distribuição das águas. Durante os períodos de chuvas intensas, a água corre rapidamente das áreas mais altas para as partes mais baixas, aumentando o risco de inundações em cidades como Santo Antônio de Pádua. A gestão desta bacia hidrográfica, portanto, envolve a monitoração constante dos níveis de água e a implementação de medidas para controlar o escoamento e prevenir enchentes.

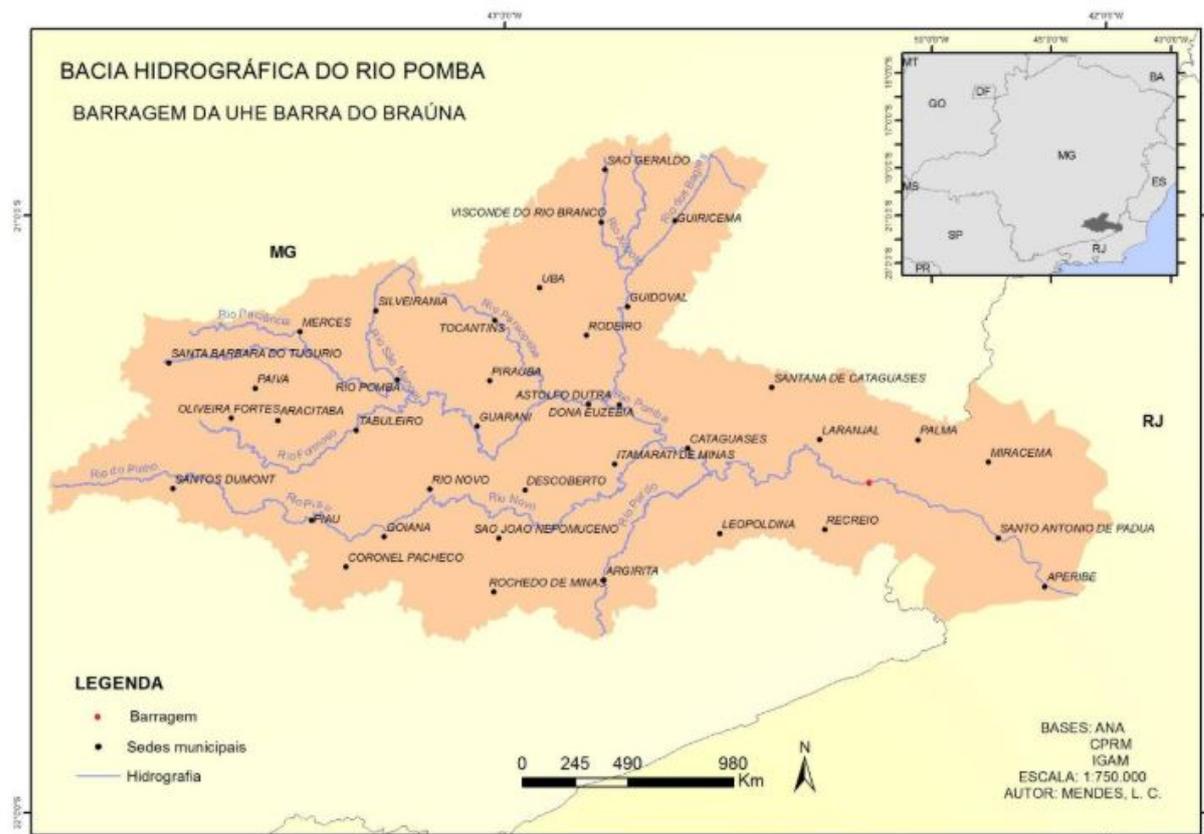


Figura 2.1: Localização da bacia hidrográfica do Rio Pomba.  
Fonte: Mendes [25].

Esta bacia possui uma rica biodiversidade, abrigando várias espécies de flora e fauna, muitas das quais são endêmicas da região, a proteção dessas espécies e seus habitats é uma parte integral da gestão da bacia hidrográfica do Rio Pomba, a qual deve equilibrar as necessidades humanas com a conservação ambiental [8].

A qualidade da água na bacia do Rio Pomba é outro aspecto essencial. As atividades humanas, como agricultura, indústria e urbanização, podem introduzir poluentes na bacia, afetando a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Nesse sentido, a gestão sustentável da bacia hidrográfica envolve a implementação de práticas agrícolas sustentáveis, o tratamento adequado de efluentes industriais e domésticos, e a proteção das áreas de recarga de aquíferos.

O manejo eficiente e sustentável desta bacia é fundamental para garantir a disponibilidade contínua de água de boa qualidade, proteger os ecossistemas locais e reduzir os impactos negativos das atividades humanas e eventos climáticos extremos. No contexto de Santo Antônio de Pádua, a bacia hidrográfica do Rio Pomba é de particular importância, exigindo uma gestão cuidadosa e integrada para garantir a sustentabilidade dos

recursos hídricos e a proteção ambiental na região [27]. Na Tabela 2.1 é apresentada a importância das bacias hidrográficas e especificidades da bacia do Rio Pomba.

Tabela 2.1: Importância das bacias hidrográficas e especificidades da bacia do Rio Pomba.

<b>Aspecto</b>	<b>Descrição</b>
Definição de Bacia Hidrográfica	Área de terra onde toda a água que cai como precipitação drena para um ponto comum, geralmente um rio, lago ou oceano [24].
Estrutura de uma Bacia Hidrográfica	Rede de drenagem formada por rios e riachos que fluem de áreas mais altas para áreas mais baixas, convergindo em um corpo d'água principal [24].
Prevenção e Mitigação de Desastres	Inclui a construção de barragens, reservatórios e sistemas de drenagem; práticas de conservação do solo e restauração de vegetação nativa para reduzir escoamento superficial e melhorar a infiltração [6].
Bacia Hidrográfica do Rio Pomba	Afluente do Rio Paraíba do Sul; abrange áreas significativas de Minas Gerais e Rio de Janeiro; caracteriza-se por uma topografia variada e rica biodiversidade [8].
Características da Bacia do Rio Pomba	Topografia variada com áreas montanhosas e planícies; rápido escoamento superficial durante chuvas intensas, aumentando o risco de inundações [36].
Gestão da Bacia do Rio Pomba	Envolve monitoração constante dos níveis de água e implementação de medidas para controlar o escoamento e prevenir enchentes; práticas de conservação ambiental e qualidade da água [27].

Fonte: Autor (2024).

## 2.2 UHE Barra do Braúna

A UHE Barra do Braúna teve sua concessão outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no ano de 2001 (Decreto 19.02.2001), quando a Licença Prévia (LP) do empreendimento foi obtida pela Companhia de Luz Cataguases Leopoldina (CAT LEO) [12]. A construção da barragem, que possui seu eixo localizado entre os municípios mineiros de Laranjal e Recreio, impactou o curso do Rio Pomba nesta região, com seu reservatório ocupando os municípios de Cataguases e Leopoldina, no estado de Minas Gerais, sendo estas cidades à montante do reservatório, e seus impactos também às cidades fluminenses localizadas à jusante da barragem, como Santo Antônio de Pádua, Aperibé e Itaocara [27]. Na Figura 2.2 é mostrada a localização do reservatório da UHE Barra do Braúna.



Figura 2.2: Localização do UHE Barra do Braúna.

Fonte: <https://www.google.com.br/maps/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

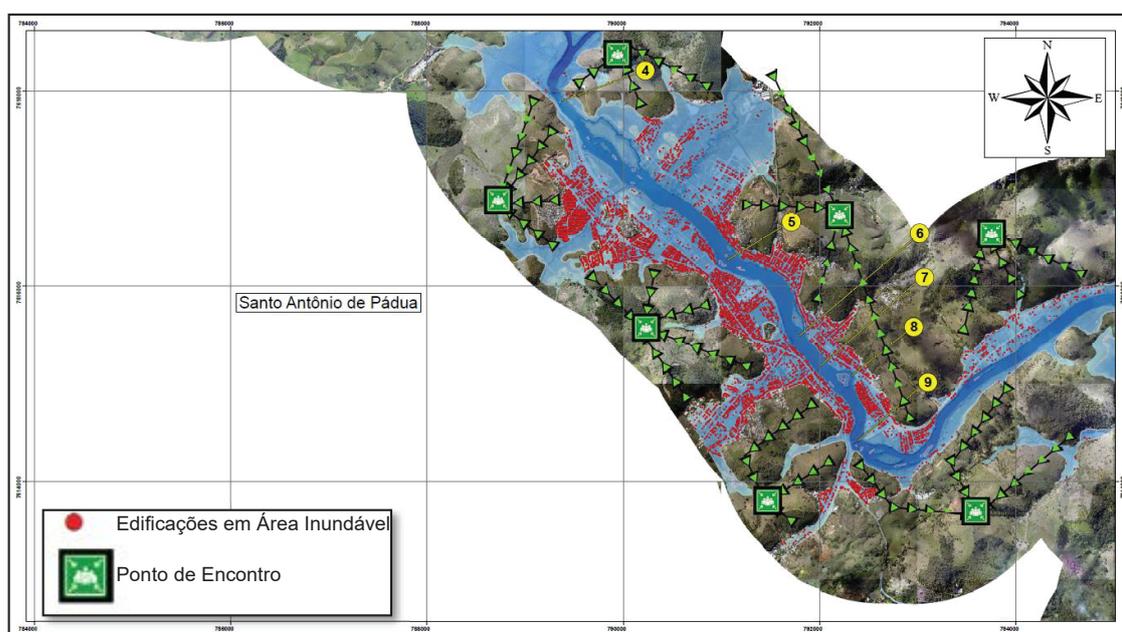
Com capacidade de geração de 39 MW, a UHE Barra do Braúna começou a ser construída em 2007, após a concessão da Licença de Instalação (LI), em 2006, em nome da empresa Cat Leo Construções, Indústrias e Serviços de Energia S/A. O reservatório da represa, que ocupa uma área da ordem de 1.245 ha, começou seu processo de enchimento em setembro de 2009, quando foi obtida a Licença de Operação (LO) já em nome da empresa Brookfield Energia Renovável S.A. [12].

O processo construtivo da UHE Barra do Braúna trouxe benefícios e desvantagens, conforme relatado por Mendes [25], dentre as vantagens, houve a geração de empregos na região, bem como a criação do lago, que proporciona uma gama de atividades, como por exemplo, a piscicultura e o turismo, que propiciaram o desenvolvimento dos municípios vizinhos. Porém, sua construção também trouxe pontos negativos, como a remoção de áreas agricultáveis e a realocação de população rural, causadas pelo alagamento da região, pode-se citar, também, a alteração da fauna e flora local, bem como na dinâmica de migração dos peixes em época de piracema [12].

Em cumprimento às determinações legais, requeridas pela Lei Federal nº 12.334/2010 e pela Resolução da Norma nº 696 da ANEEL, do ano de 2015, o empreendimento possui o Plano de Ação de Emergência (PAE) para a barragem, que determina os procedimentos na área técnica e administrativa de modo a atenuar os efeitos causados por ondas de cheias ou por um possível rompimento da barragem [27]. É previsto uma vazão máxima

de projeto de 3.296 m<sup>3</sup>/s.

O PAE é estruturado de forma a proporcionar segurança às populações que vivem à jusante da barragem, bem como das edificações e infraestruturas existentes. No documento, estão identificadas Zonas de Auto Salvamento (ZAS), que são áreas localizadas a jusante da barragem e quando não há tempo necessário para que haja intervenções perante às autoridades competentes para o caso de ruptura da barragem, e as Zona de Impacto Direto (ZID), uma área limitada geograficamente, situada a jusante da barragem e que pode vir a ser atingida caso haja uma ruptura das estruturas [9]. Importante mencionar que, dentre as ZIDs definidas no PAE, diversas estão localizadas em Santo Antônio de Pádua, como exemplificado na Figura 2.3. Destaca-se que o município de Santo Antônio de Pádua está localizado aproximadamente 35 km a jusante da barragem.



<b>ZID 17 – Santo Antônio de Pádua</b>	<b>Latitude: 7615502,945 S</b>	<b>Número de edificações: 6263</b>
	<b>Longitude: 792047,312 W</b>	<b>Número de infraestruturas: 6</b> <b>Pontes 4,5,6,7,8 e 9</b>

Figura 2.3: Exemplo de ZID identificada no PAE (ZID 17 em Santo Antônio de Pádua).  
Fonte: Cestari [9].

## 2.3 Caracterização Histórica e Geográfica do Município de Santo Antônio de Pádua

A criação da Região Noroeste Fluminense, no ano 1987, englobou 13 municípios, sendo Aperibé, Bom Jesus do Itabapoana, Cambuci, Italva, Itaocara, Itaperuna Laje do

Muriaé, Miracema, Natividade, Porciúncula, Santo Antônio de Pádua (foco deste estudo), São José de Ubá e Varre-Sai [31].

Santo Antônio de Pádua, teve sua fundação em 26 de julho de 1833, por Frei Florido de Citta di Castelli (da cidade de Castelos) [21]. A Freguesia, criada pela Lei Provincial nº 296, de 01-06-1843, pela Deliberação Estadual de 13-10-1891 e pelos Decretos Estaduais nº 1, de 08-05-1892 e 1-A de 03-06-1892, no município de São Fidélis. Santo Antônio de Pádua teve sua elevação à categoria de Vila por Lei ou Decreto Provincial nº 2.597, de 02-01-1882. Posteriormente, foi elevado à condição de Cidade e Sede Municipal com a denominação de Santo Antônio de Pádua pelo Decreto Estadual nº 17, de 27-12-1889 [13].

O município possui extensão de 603,4 km<sup>2</sup> e possui 42.479 habitantes de acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Atualmente, o município é constituído de 9 distritos: Santo Antônio de Pádua, Baltazar, Campelo, Ibitiguaçu, Marangatu, Monte Alegre, Paraoquena, Santa Cruz e São Pedro de Alcântara [21]. Situado a 87 m de altitude, a sede do município se desenvolveu às margens do Rio Pomba.

Com uma economia diversificada, incluindo pequenos empreendimentos agrapecuários, oferta do setor de serviços e comércio, o município conta ainda com um parque industrial direcionado para indústria de papel e celulose, além de possuir produção de argamassa e concreto para construção civil e indústrias de extração e manufatura de pedras ornamentais. Cerca de 91% das empresas presentes no município são de micro, pequeno e médio portes, sendo as maiores responsáveis pela geração de empregos no município [29].

A sede do município é cortada em duas partes pelo Rio Pomba, a divisão se dá em muitos sentidos, não apenas geográficos. Tal feito é notado pela localização dos cidadãos paduanos se referindo sobre os dois lados divididos pelo rio. No entanto, o rio é um elemento comum às duas partes, e as liga entre si. Isso fica evidente quando algo acontece ao rio e toda a cidade é afetada [22].

Um importante elemento de ligação entre as margens é a ponte Raul Veiga, certamente o mais simbólico patrimônio histórico e cultural de Santo Antônio de Pádua, inaugurada em 1922. Na Figura 2.4 é ilustrada a "Ponte dos Arcos", como é popularmente conhecida.



Figura 2.4: Ponte Raul Veiga sobre o Rio Pomba em Santo Antônio de Pádua.  
Fonte: <https://www.google.com.br/maps/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

## 2.4 Eventos Críticos Envolvendo as Cheias no Município de Santo Antônio de Pádua

Desenvolvida nas margens do Rio Pomba, e conseqüentemente, em suas planícies de inundação, as inundações em Santo Antônio de Pádua têm causado prejuízos financeiros significativos ao longo dos anos, afetando diversos setores da economia local. A avaliação dos prejuízos financeiros inclui os danos diretos às propriedades, infraestrutura pública e privada, bem como os custos indiretos associados à interrupção das atividades econômicas.

No que se refere aos danos às propriedades, estes incluem a destruição de casas, lojas e edifícios industriais. As cheias frequentemente danificam a estrutura das construções, levando à necessidade de reparos caros ou, em casos extremos, à reconstrução completa. Os estoques de mercadorias nas lojas e armazéns são muitas vezes destruídos, resultando em perdas financeiras substanciais para os comerciantes locais [17].

Já a infraestrutura pública, como estradas, pontes, sistemas de água e esgoto, também sofre danos significativos durante as inundações. A reparação dessas infraestruturas é dispendiosa e requer tempo, o que pode levar à interrupção prolongada dos serviços públicos e à redução da qualidade de vida dos moradores. O governo local muitas vezes precisa desviar recursos de outras áreas prioritárias para lidar com os danos causados pelas enchentes, afetando o orçamento municipal e atrasando projetos de desenvolvimento [39].

Além disso, as atividades comerciais e industriais são particularmente vulneráveis às inundações. As empresas locais enfrentam perdas de receita devido à interrupção das operações, danificação de equipamentos e estoques, além de custos adicionais para limpar e reparar instalações. A produção industrial pode ser severamente afetada, resultando em atrasos nas entregas e perda de contratos. O setor agrícola também sofre grandes impactos, com a destruição de plantações e perda de produtividade, o que afeta diretamente a economia local e a segurança alimentar.

Também é importante ressaltar que as inundações causam deslocamento significativo de famílias e danos a propriedades. As águas das enchentes frequentemente invadem as áreas urbanas, forçando os moradores a abandonarem suas casas e buscar abrigo em locais mais seguros. Este deslocamento pode ser temporário, mas em casos mais graves, as famílias podem perder suas casas permanentemente, resultando em uma crise habitacional [42].

Em particular, a inundação de 1979 foi uma das primeiras grandes inundações que afetaram Santo Antônio de Pádua de forma devastadora. Naquela época, a infraestrutura de prevenção a desastres era limitada, e a cidade foi surpreendida pela intensidade das chuvas. O Rio Pomba transbordou, inundando vastas áreas urbanas e rurais. A água invadiu residências, comércios e destruiu plantações, deixando muitas famílias desabrigadas. A falta de sistemas eficientes de drenagem e contenção contribuiu para a gravidade dos danos. Em contrapartida, a resposta da comunidade foi marcada pela solidariedade, com esforços coletivos para abrigar os desabrigados e iniciar a recuperação das áreas afetadas. Não há registro do nível alcançado pelas águas do rio, porém, na Figura 2.5 é mostrada a magnitude da inundação.

No que se refere aos eventos registrados, a inundação de dezembro 2008 foi a maior catalogada, quando o Rio Pomba subiu mais de 3 metros acima do leito normal. A cidade sofreu com chuvas intensas e prolongadas, que resultaram no transbordamento. A água subiu rapidamente, invadindo áreas urbanas e forçando a evacuação de centenas de moradores [46]. Casas foram destruídas ou gravemente danificadas, e muitas famílias perderam todos os seus pertences. O comércio local sofreu grandes prejuízos com a destruição de estoques e a interrupção das atividades econômicas. As autoridades locais trabalharam incansavelmente para fornecer abrigo e assistência emergencial, mas a magnitude do desastre revelou a necessidade urgente de melhorias na infraestrutura de prevenção e resposta a enchentes.

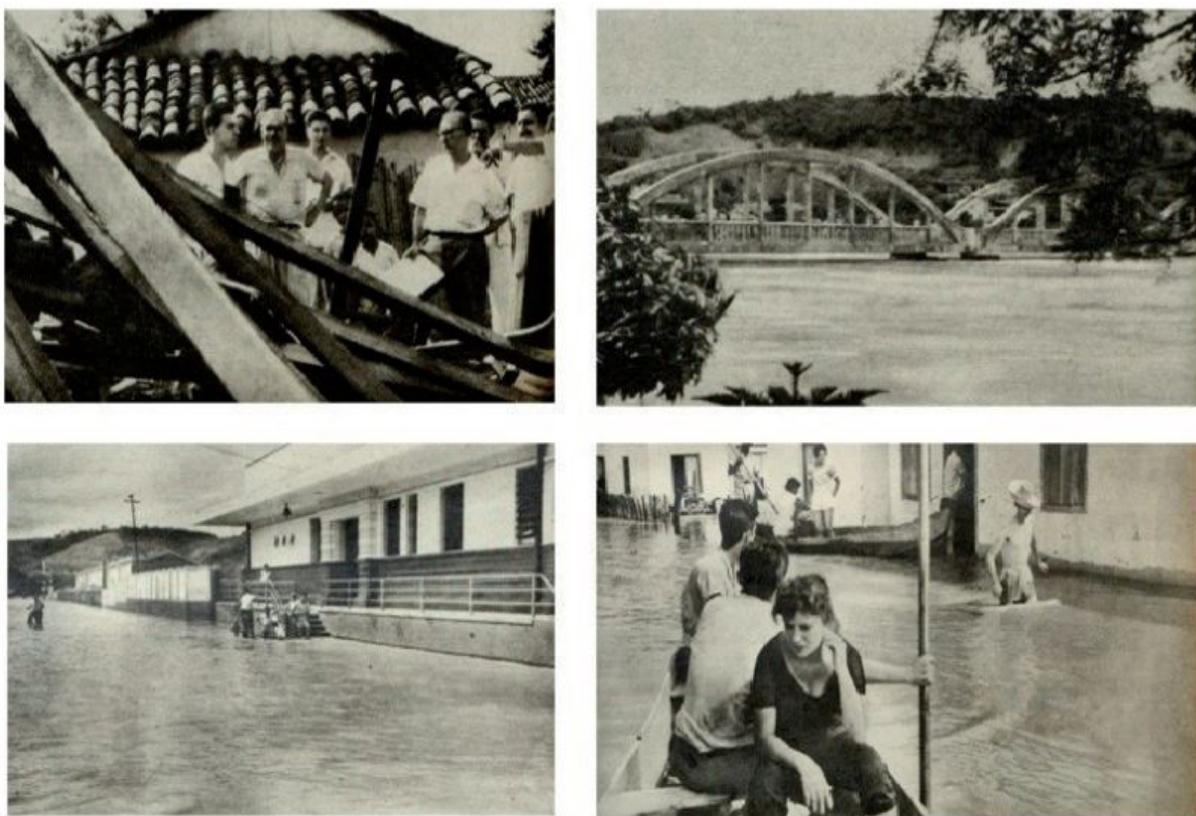


Figura 2.5: Inundação em Santo Antônio de Pádua no ano de 1979.

Fonte: Santos e Miranda [35].

Em dezembro de 2010, a cidade enfrentou outro grande desafio com uma inundação que, novamente, trouxe destruição e sofrimento. As chuvas intensas causaram o transbordamento do Rio Pomba e seus afluentes na casa de 0,70 m acima da cota de transbordo na cidade, inundando ruas e bairros do perímetro urbano [46].

No ano de 2012, em janeiro, mais um evento trágico na história de Santo Antônio de Pádua. As chuvas torrenciais causaram outra inundação de grandes proporções no município, com o Rio Pomba chegando a 1,90 m acima da cota de transbordo [46]. A água invadiu casas, comércio, escolas e hospitais, deixando um rastro de destruição. Muitas famílias ficaram desabrigadas e dependentes de abrigos temporários e doações para sobreviver. Na Figura 2.6 é mostrada a ponte Raul Veiga com água ultrapassando o nível de seu tabuleiro.

Mais recentemente, Santo Antônio de Pádua enfrentou três inundações consecutivas no início do ano de 2020, nos meses de janeiro, fevereiro e março, atingido nível superior a 6 metros acima do leito nas duas primeiras – janeiro e fevereiro.



Figura 2.6: Inundação em Santo Antônio de Pádua no ano de 2012.  
Fonte: Santos e Miranda [35].

A história se repetiu no início de 2022. As chuvas intensas que marcaram o verão daquele ano novamente levaram o Rio Pomba a transbordar. No mês de janeiro (de 08 a 13), o Rio Pomba atingido o nível máximo de 6,45 metros, ultrapassando a cota de transbordo (5 metros), invadindo as ruas e casas em diversos bairros. Em fevereiro, o Rio Pomba novamente ultrapassou a cota de transbordo, atingindo o nível de 5,20 metros, segundo o site do Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Nesta ocasião, o distrito de Campelo foi a localidade mais atingida devido ao transbordamento do Ribeirão Santo Antônio na cidade de Miracema. Ainda no mês de fevereiro, no dia 16, o Rio Pomba atingiu o nível de 5,61 metros inundando novamente vários bairros da cidade.

Por fim, em janeiro de 2023, o Rio Pomba atingiu, mais uma vez, a cota de transbordo no dia 06/01, tendo seu pico de elevação em 6,52 metros no dia 08, de acordo com dados do INEA. Ainda nesta semana, enquanto as águas ainda abaixavam e após o registro de muita chuva nas cabeceiras, o nível do Rio Pomba voltou a subir e, no dia 10/01, foi ultrapassada novamente a cota de transbordo, chegando, dessa vez, ao nível máximo de 6,15 metros no dia 12/01.

# Capítulo 3

## Formulação Matemática e Solução do Problema Propostos

Neste capítulo são elucidadas questões relativas ao problema proposto neste trabalho, perfazendo a descrição da modelagem matemática e a formulação envolvida para a resolução das simulações de escoamento superficial, tendo como base o software IBER. São apresentadas, também, as fontes dos dados e informações utilizadas para a obtenção dos resultados desejados.

### 3.1 Modelagem Matemática do Problema Proposto

As equações que descrevem o fenômeno de escoamento em canais abertos são conhecidas como as equações de Saint Venant. Deduzidas inicialmente por Barre de Saint Venant em 1871, essas equações caracterizam o fluxo não permanente e não uniforme em canais abertos unidirecionais. Elas constituem as bases referenciais deste trabalho, sendo ampliadas para contemplar o escoamento superficial com superfície livre em duas dimensões.

Na sua formulação diferencial, as equações de Saint Venant permitem a descrição ponto a ponto do campo de escoamento, constituindo um modelo hidrográfico distribuído. Tais equações são derivadas das equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento, aplicadas a um volume de controle dentro do fluido em movimento [41], conforme mostrado nas Equações (3.1)-(3.3), considerando uma abordagem em duas dimensões:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (hU_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left( hU_x^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (hU_xU_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - \tau_{b,x} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (hU_y) + \frac{\partial}{\partial x} (hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hU_y^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - \tau_{b,y} \quad (3.3)$$

onde:

- $x$ ,  $y$  e  $t$ , são as variáveis espaciais e temporais cujas unidades são dadas em metros [m] e segundos [s];
- $h$  representa a profundidade em metros [m];
- $U_x$  e  $U_y$  são as velocidades horizontais médias na profundidade, em metros por segundo [m/s];
- $g$  é a aceleração da gravidade em metros por segundo ao quadrado [m/s<sup>2</sup>];
- $Z_b$  é a elevação inferior em metros [m];
- $\tau_{b,x}$  e  $\tau_{b,y}$  são as energias dissipadas devido ao atrito do fundo [-];

O termo referente ao atrito nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, é avaliado pela fórmula de Manning, válida para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, como:

$$\tau_{b,x} = gh \frac{n^2 U_x (U_x^2 + U_y^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (3.4)$$

$$\tau_{b,y} = gh \frac{n^2 U_y (U_x^2 + U_y^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (3.5)$$

onde, a tensão de cisalhamento no fundo do elemento, nas direções  $x$  e  $y$ , é dada pelo produto da aceleração da gravidade ( $g$ ) [m/s<sup>2</sup>] e da profundidade ( $h$ ) [m], pela razão entre

a variação das tensões cisalhantes das bordas desprezíveis, em que,  $n$  é o coeficiente de rugosidade (ou de Manning) [ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1/3}$ ].

Todas as funções e parâmetros que aparecem nas equações hidrodinâmicas (incluindo o coeficiente de Manning e a velocidade) podem ser impostas de forma variável, com dependência tanto espacial quanto temporal.

A solução do problema proposto neste trabalho, modelado matematicamente pelas equações de Saint Venant descritas nesta seção, é obtida numericamente através do Método dos Volumes Finitos (MVF), utilizando o software de simulação hidrodinâmica IBER para a modelagem de eventos de inundação em Santo Antônio de Pádua, conforme detalhado na próxima seção.

## 3.2 O Software IBER

O software IBER é uma ferramenta gratuita que oferece um modelo numérico para simulações. Em sua primeira versão (2010), este software disponibilizava três módulos principais de cálculo: um módulo hidrodinâmico, um módulo de turbulência e um módulo de transporte de sedimentos (considerando sedimentos de granulometria uniforme).

Ao longo dos anos, versões atualizadas foram disponibilizadas, contendo aperfeiçoamento dos módulos já existentes, bem como a inclusão de novos módulos, tais como rompimento barragens, qualidade da água e habitat hidráulico. A partir das versões 3.X, o IBER conta, também, com um módulo de drenagem urbana, um módulo de hidrologia melhorado, um módulo de erosão do solo e um módulo para cálculo transporte de sedimentos considerando materiais não uniformes (misturas) [37].

Ele emprega o Método dos Volumes Finitos (MVF) para resolver as equações de Saint Venant em duas direções, conforme descrito na Seção 3.1, as quais representam o fenômeno de escoamento em canais abertos. Todos os módulos operam em uma malha não estruturada de volumes finitos compostos por elementos triangulares e/ou quadriláteros. Na Figura 3.1 é ilustrada a tela inicial do software IBER.

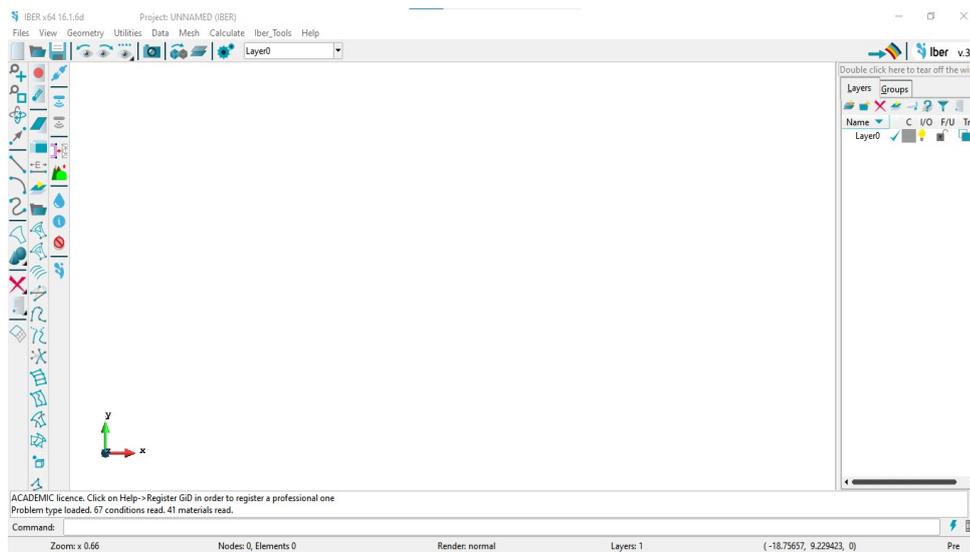


Figura 3.1: Tela inicial do software IBER.

Fonte: O Autor (2024).

Basicamente, para realizar uma simulação hidráulica bidimensional no IBER, devem ser executados os seguintes passos:

- Criar ou importar uma geometria para a região de estudos;
- Atribuir condições iniciais e de contorno;
- Atribuir uma série de parâmetros de entrada (rugosidade do fundo, modelo de turbulência, etc.);
- Construir uma malha de cálculo;
- Atribuir dados topográficos à malha de cálculo construída;
- Atribuir opções gerais para a simulação a ser realizada (tempo de cálculo, parâmetros de esquema numérico, ativação de módulos adicionais, etc.);
- Executar a simulação;
- Visualizar os resultados da simulação no módulo de pós-processamento.

O IBER possui uma interface na qual é possível criar uma geometria desenhando pontos (diretamente na tela inicial ou inserindo coordenadas), linhas e superfícies. Por outro lado, a partir do menu "*Arquivo => Importar*", podem ser importados diferentes formatos de arquivos (dxf, shapefile, entre outros). No menu "*Iber\_Ferramientas*", pode-se, ainda, criar e importar uma geometria formada por uma rede irregular de triângulos

ou retângulos (RTIN). Uma vez que uma geometria foi criada ou importada, é possível editá-la e modificá-la com as opções no menu destinado a essa finalidade.

No que se refere às condições iniciais e de contorno, bem como a maioria dos parâmetros de entrada, cabe ressaltar que os mesmos podem ser atribuídos tanto na geometria quanto na malha. No entanto, as condições atribuídas na geometria são transferidas também para a malha ao criá-la e, para gerar uma malha, deve haver uma geometria formada por superfícies. Em particular, quanto às condições iniciais, estas devem ser atribuídas a todo o domínio, sendo possível escolher entre atribuir uma profundidade ou um nível de água.

Já para as condições de contorno de entrada, existe a possibilidade de atribuir um fluxo total, um fluxo específico (fluxo por unidade de largura) ou um nível de água. Em cada caso, os parâmetros necessários serão exigidos, dependendo se o regime de fluxo é subcrítico, crítico ou supercrítico. Por outro lado, nas condições de contorno de saída, os parâmetros adicionais só devem ser especificados se o regime for subcrítico. Nesse caso, é possível usar uma condição do tipo vertedouro, uma determinada condição de nível (elevação ou profundidade) ou uma curva de classificação dada pela relação entre a vazão e o nível d'água. Em caso de regime supercrítico ou crítico, não é necessário atribuir parâmetros adicionais.

Há, ainda, a possibilidade de inserir diferentes tipos de condições internas, tais como: vertedouro, comporta, combinação entre vertedouro e comporta ou um coeficiente de perda localizada.

Outro parâmetro a ser inserido no IBER para a realização de uma simulação é a informação sobre a rugosidade das superfícies da região de estudos, a qual é atribuída através de um coeficiente de rugosidade de Manning, cujo valor está relacionado com o tipo de uso e cobertura do solo.

Para isso, ao acessar o menu "*Rugosidade => Usos do solo*", tem-se a possibilidade de escolher um uso do solo e atribuí-lo às superfícies que compõem a geometria (ou, se for o caso, aos elementos da malha). Existem valores padrão atribuídos a cada uso do solo, mas podem ser alterados. É possível, também, a atribuição automática do coeficiente de rugosidade a partir do menu: "*Dados => Rugosidade => Atribuição automática*".

Por fim, para a realização de uma simulação simples no software IBER, os próximos passos são a construção da malha de cálculo e a inserção dos dados de topografia aos elementos da malha construída. A malha de cálculo é um elemento fundamental para

alcançar bons resultados.

Há, basicamente, duas opções para se construir a malha, a saber: malha estruturada e malha não estruturada. Em ambos os casos, os elementos podem ser no formato de triângulos ou quadriláteros, ou mistas de triângulos e quadriláteros. Tal escolha depende da geometria do problema a ser investigado. Na Figura 3.2, é mostrado um exemplo de malhas estruturadas e não estruturadas construídas no software IBER.

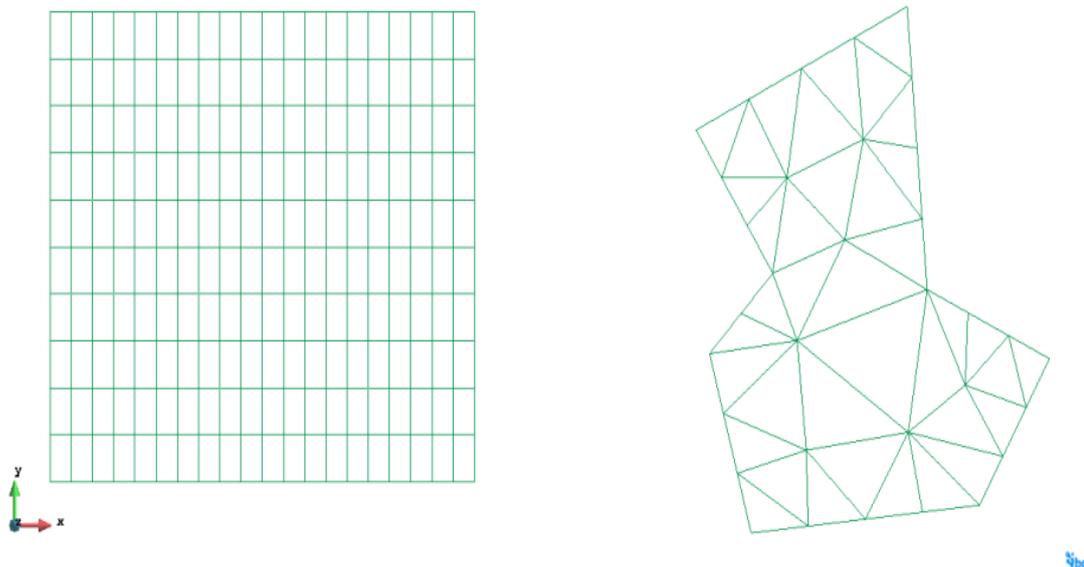


Figura 3.2: Exemplo de malhas estruturadas e não estruturadas construídas no software IBER.

Fonte: Carvalho [7].

Quanto aos dados de topografia necessários à simulação, geralmente, são utilizados modelos digitais de elevação do terreno para tal finalidade. Há diversos órgãos que disponibilizam os arquivos com essas informações, conforme exposto nas próximas seções.

### 3.3 Obtenção do Modelos Digitais de Elevação

Um Modelo Digital de Elevação (MDE) representa digitalmente as variações topográficas de uma superfície e é amplamente utilizado em pesquisas ambientais, hidrológicas, geológicas, dentre outras. No Brasil, a produção e normatização de MDEs não são centralizadas por um único órgão, sendo produzidos pelos próprios usuários, o que pode resultar em variações e possíveis limitações nos modelos criados [10].

Com o avanço das técnicas computacionais, a manipulação, análise e distribuição de dados espaciais tornaram-se mais rápidas e econômicas, auxiliando no mapeamento quan-

titativo do solo e na avaliação de suas incertezas. Os MDEs são úteis para compreender relações espaciais e temporais entre classes de solos e variáveis ambientais, fornecendo atributos topográficos ou variáveis morfométricas que desempenham um papel vital na predição de padrões solo-paisagem. Esses atributos aprimoram o mapeamento de características do solo, como textura, cor, umidade, entre outras [30].

Os MDEs são representações matemáticas da topografia e servem de suporte para o desenvolvimento de pesquisas e políticas, especialmente os modelos gratuitos, como o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), *Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM), Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) e *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) [16, 43, 44].

Dentre os MDEs, o sensor da missão SRTM da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) é um dos mais conhecidos e confiáveis na disponibilização e utilização de suas imagens para análises digitais. Lançado em 2000, foi o primeiro sensor a produzir o mais completo mapeamento da topografia terrestre [16]. No entanto, é importante considerar que as imagens da missão SRTM podem não ser suficientes para a caracterização de determinadas feições devido à resolução espacial máxima alcançada por este tipo de imagem, que é de 30 e 90 metros [19].

Já o sensor *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) do satélite ALOS, lançado em 2006 pela missão da Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (do inglês *Japan Aerospace Exploration Agency* - JAXA), foi projetado para contribuir em áreas como mapeamento, observação precisa da cobertura regional da terra, monitoramento de desastres e levantamento de recursos. Utilizando-se de um radar de abertura sintética na Banda L, o sensor PALSAR é capaz de obter imagens diurnas ou noturnas e em quaisquer condições atmosféricas. A coleta de dados do sensor PALSAR durou até 2011 e foi projetado com mais dois instrumentos para contribuir no mapeamento da topografia terrestre, precisão no monitoramento da cobertura vegetal e de desastres, e no levantamento de recursos naturais [23]. Os MDEs ALOS PALSAR podem ser adquiridos gratuitamente, já corrigidos e projetados no sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) WGS84, nas resoluções de 12,5 e 30 metros.

### 3.3.1 Aquisição de Dados de Topografia da Região de Interesse

O site <https://opentopography.org/> facilita o acesso a dados topográficos, ferramentas e recursos para avançar nossa compreensão da superfície, vegetação e ambiente construído

da Terra [28]. Desse modo, a busca pelos MDEs pode ser realizada por meio da seleção da região de interesse no site, que automaticamente informa todos os MDEs disponíveis de forma gratuita daquela região demarcada [47].

A busca pelos MDEs disponíveis, por região, pode ser acessada a partir do menu "<https://portal.opentopography.org/datasets>", assim a área de interesse pode ser demarcada e selecionada a partir de um mapa, conforme Figura 3.3. Para a região selecionada no mapa, o site mostra a relação de MDEs disponíveis.

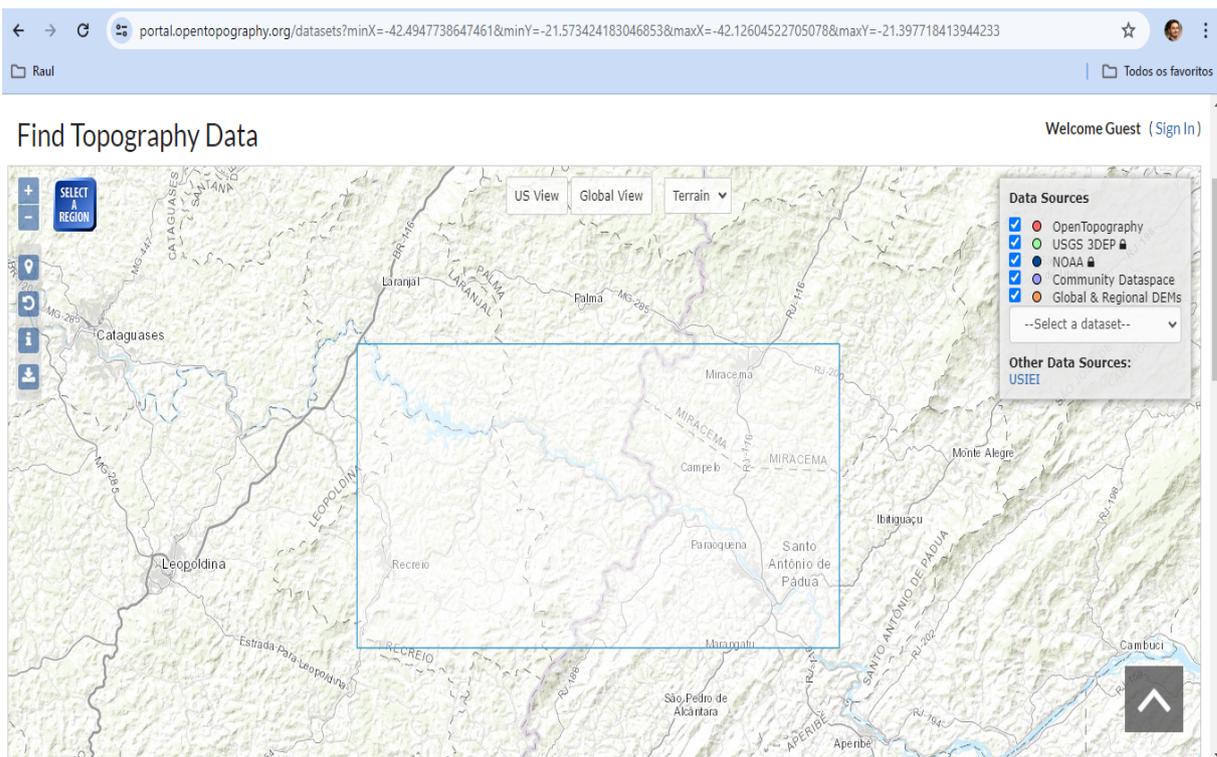


Figura 3.3: Seleção da área de interesse para busca dos MDEs.

Fonte: O Autor (2024).

Para a região deste trabalho, a qual envolve a região de Santo Antônio de Pádua, a pesquisa retornou 8 resultados, algumas com variações da qualidade de resolução, como apresentado na Figura 3.4. Ainda na janela de resultados apresentada pelo site, é possível obter as informações geográficas das imagens disponíveis, bem como observar as coordenadas do polígono de seleção.

Na Tabela 3.1 são mostradas as coordenadas X e Y utilizadas na demarcação da área de interesse. Para realizar o *download* do MDE escolhido, o site solicita o registro ou *login* de usuário.

Para este trabalho foi selecionado o modelo digital de elevação Copernicus GLO-30 [14], o qual está disponível no sistema de coordenadas horizontais WGS84 [EPSG: 4326].

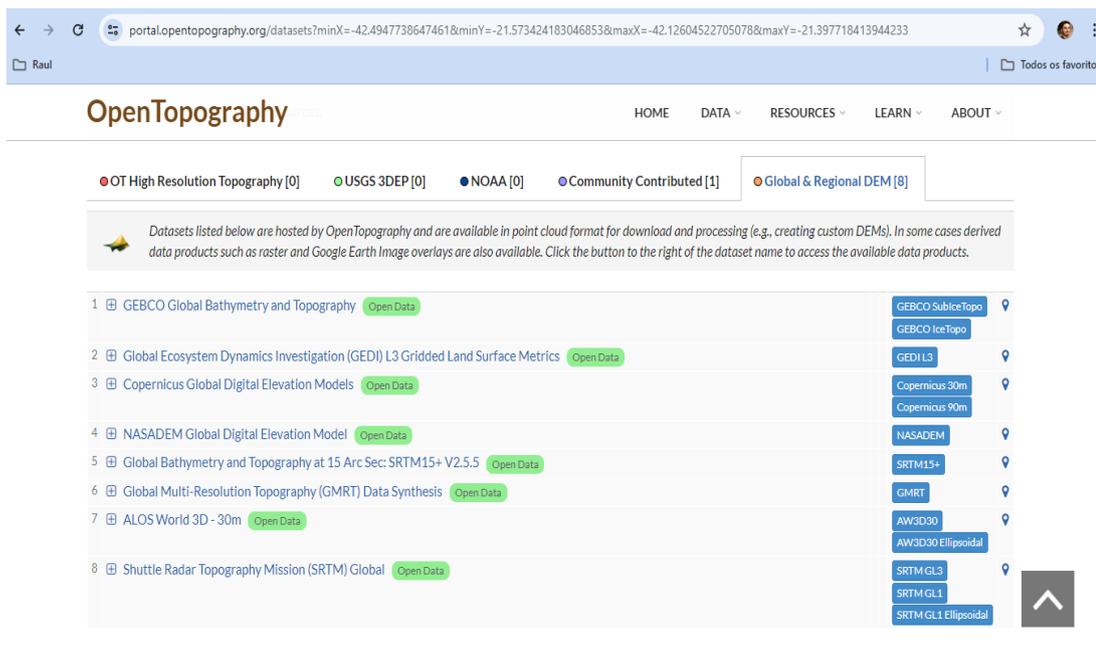


Figura 3.4: MDEs encontrados para a região de interesse.

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 3.1: Coordenadas X e Y (mínimas e máximas) da área de interesse.

X	Y
X <sub>mín</sub> = -42,4947738647461	Y <sub>min</sub> = -21,573424183046853
X <sub>máx</sub> = -42,12604522705078	Y <sub>máx</sub> = -21,397718413944233

Fonte: O Autor (2024).

O modelo digital de elevação do Copernicus com resolução de 30 metros (GLO-30) é uma das versões de livre acesso e de cobertura global do programa Copernicus DEM. Consiste em um modelo digital de superfície (MDS) que representa a superfície da Terra incluindo edifícios, infraestrutura e vegetação, com resolução de 30 metros [11]. O modelo de elevação do Copernicus é derivado de interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) em banda X da missão TanDEM-X e TerraSAR-X entre os anos de 2011 e 2015, sendo financiado por uma parceria público-privada entre o governo alemão, representado pelo Agência Aeroespacial Alemã (DLR) e a *Airbus Defence and Space* [11].

Além do MDE Copernicus GLO-30, para fins de melhor ajuste sobre a região de interesse, também foram utilizadas informações sobre a topografia do município de Santo Antônio de Pádua, obtidos junto à prefeitura da referida cidade, as quais possuem como base o Plano de Ação de Emergência (PAE).

### 3.3.2 Aquisição de Dados de Edificações da Região de Interesse

Os dados das edificações do município de Santo Antônio de Pádua podem ser obtidos no site <https://sites.research.google/open-buildings/>, o qual disponibiliza para *download* um conjunto de dados abertos em grande escala que contém contornos de edifícios derivados de imagens de satélite de alta resolução [40], ou seja, são disponibilizados polígonos que representam as edificações.

A busca pelos polígonos com a demarcação das construções pode ser acessada a partir do menu "<https://sites.research.google/open-buildings/open-buildings-download/>", assim, é mostrado um mapa com as regiões que contém essas informações disponíveis para o *download*, conforme na Figura 3.5.

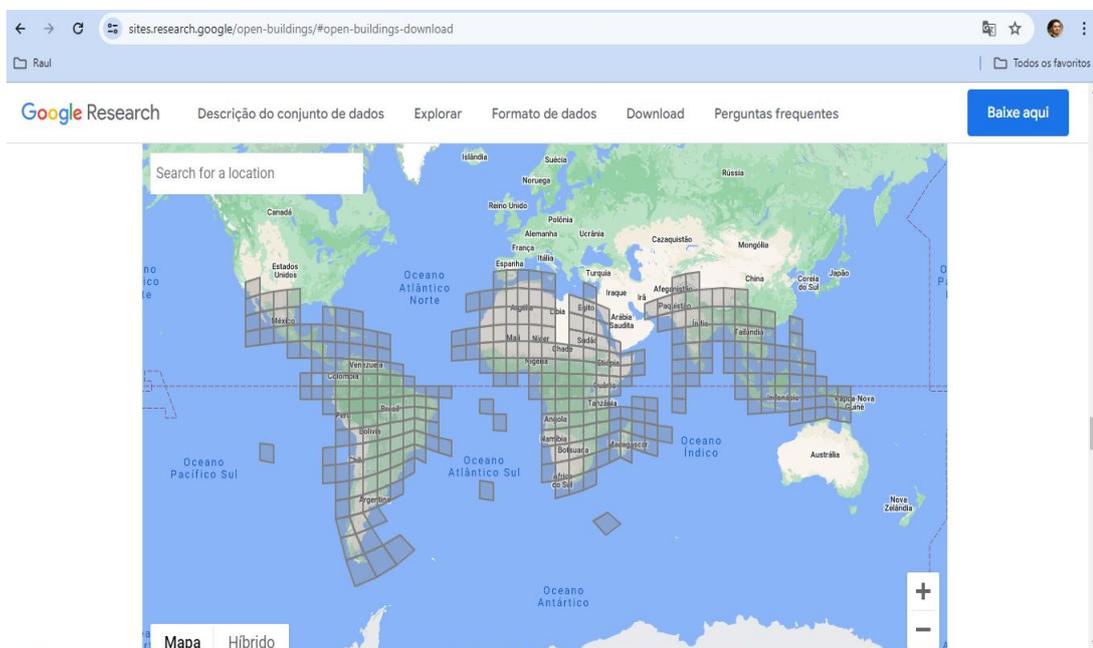


Figura 3.5: Regiões do mundo com informações disponíveis para *download*.

Fonte: O Autor (2024).

Os polígonos e pontos de construção são armazenados em arquivos no formato CSVs fragmentados espacialmente, onde cada linha no CSV representa um polígono ou ponto de construção e tem as seguintes colunas:

- Latitude: latitude do centróide do polígono do edifício;
- Longitude: longitude do centróide do polígono do edifício;
- Área em metros: área em metros quadrados do polígono;
- Confiança: pontuação de confiança [0,65; 1,0] atribuída pelo modelo;

- Geometria: o polígono do edifício no formato WKT (POLYGON ou MULTIPOLYGON). Este recurso está presente apenas em dados de polígonos;
- Full Plus Code: o Plus Code completo no centroide do polígono do edifício.

Para a região de interesse deste trabalho, é necessário realizar o *download* de uma área contendo grande parte da região Sudeste, como mostrada na Figura 3.6. Com o auxílio do software QGIS é realizado o recorte e extração dos polígonos relacionados ao município de Santo Antônio de Pádua.

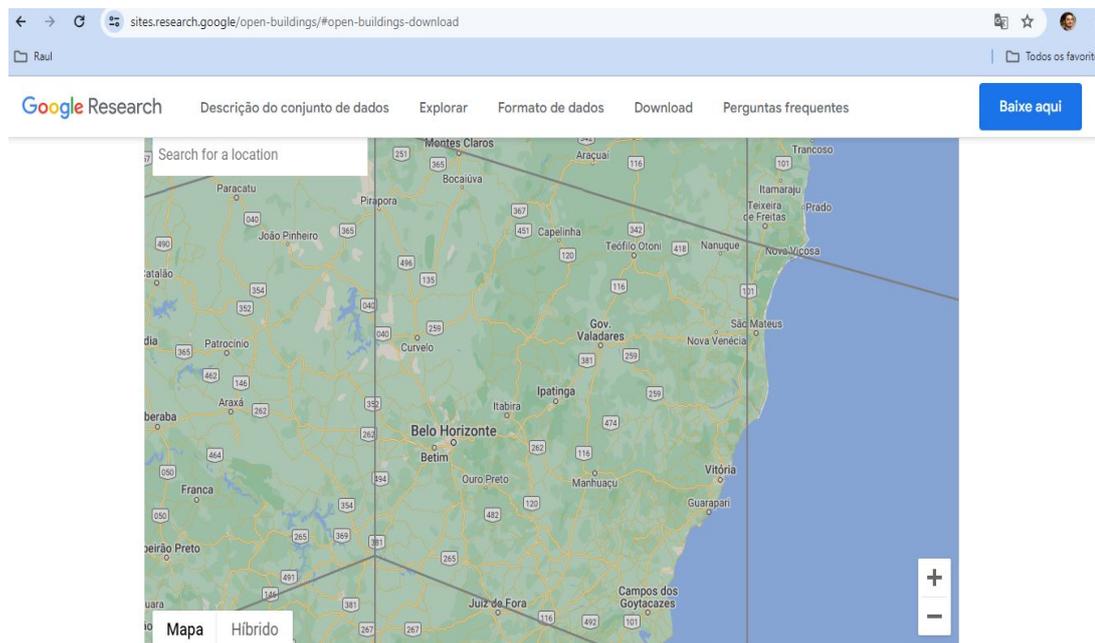


Figura 3.6: Região de abrangência incluindo o município de Santo Antônio de Pádua.  
Fonte: O Autor (2024).

### 3.4 Aquisição de Dados de Vazão e Níveis D'Água

Para a simulação do problema de inundações na região de Santo Antônio de Pádua, utilizando o software IBER, são adotados, como condição de contorno de entrada, dados de vazão da barragem da UHE Barra do Braúna, os quais estão disponíveis no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

É possível acessar o SAR por meio do endereço eletrônico "[https://www.ana.gov.br/sar/sin/b\\_paraiba-do-sul/](https://www.ana.gov.br/sar/sin/b_paraiba-do-sul/)". Esse sistema tem por objetivo reunir e organizar os dados operativos históricos dos principais reservatórios do Brasil produzidos por diferentes instituições e melhorar o acesso a esses dados [2], incluindo informações dos reservatórios

localizados em toda a bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, conforme ilustrado nas Figuras 3.7 e 3.8, onde está situada a UHE Barra do Braúna.



Figura 3.7: Reservatórios na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.  
Fonte: Adaptado de SAR [2].

Nome	Afluência (m³/s)	Defluência (m³/s)	Nível (m)	Volume Útil (%)
PARAIBUNA	195,52	33,00	699,86	21,57
SANTA BRANCA	53,81	33,00	610,47	22,81
JAGUARI	64,98	7,00	611,07	31,43
FUNIL	348,50	322,00	460,19	63,43
SANTA CECILIA	675,26	675,00	-	-
PICADA	84,35	84,00	659,37	-
SOBRAGI	187,12	187,00	437,94	-
ILHA POMBOS	1.160,84	1.162,00	139,49	-
TOCOS	194,14	210,00	449,34	146,24
LAJES	56,45	23,00	413,98	93,10
SANTANA	73,50	0,00	363,30	83,46
VIGARIO	128,11	145,00	398,07	66,83
FONTES	56,45	59,00	-	-
NILO PEÇANHA	110,00	110,00	-	-
PEREIRA PASSOS	-	172,00	86,05	-
ANTA	1.107,80	794,00	251,39	-
SIMPLICIO	315,00	315,00	247,65	-
BARRA DO BRAÚNA	195,00	188,00	151,51	-

Figura 3.8: Informações dos reservatórios na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.  
Fonte: SAR [2].

O site permite a consulta aos dados históricos dos reservatórios, por meio da página "<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSim>", onde é possível a seleção entre os sistemas hídricos, podendo ser obtidas diferentes informações, a depender do sistema hídrico escolhido. Para o Sistema Interligado Nacional, ao qual pertence a região deste estudo, podem ser acessadas as seguintes informações:

- Capacidade;
- Cota;
- Afluência;
- Defluência;
- Vazão vertida;
- Vazão turbinada;
- Vazão natural;
- Volume útil percentual;
- Vazão incremental.

Em particular, para este trabalho, foi adotado o conjunto de dados obtidos com base nas informações do SAR, nos períodos de 07/01/2022 a 17/01/2022, de 05/01/2023 a 16/01/2023 e de 20/01/2023 a 30/01/2023, os quais compreendem eventos de inundações que ocasionaram danos à cidade de Santo Antônio de Pádua.

Além dos dados de vazão da UHE Barra do Braúna, usados como condições de contorno de entrada no modelo (software IBER), também foram utilizados dados de estações de monitoramento, obtidos via portal HidroWeb, presentes ao longo do Rio Pomba, no trecho entre a referida barragem e a cidade de Santo Antônio de Pádua, de forma a validar as simulações realizadas neste trabalho.

O Portal HidroWeb é uma ferramenta fundamental integrada ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), onde é possível ter acesso a informações sobre os níveis dos rios, precipitação, clima, qualidade da água e sedimentos dos recursos hídricos em todo o país. Esse portal oferece acesso ao banco de dados que engloba todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

As informações podem ser acessadas por meio do sistema HidroWeb, de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no portal SNIRH, disponível em <https://www.snirh.gov.br/>, ou diretamente no portal HidroWeb, acessando <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>, como indicado na Figura 3.9.

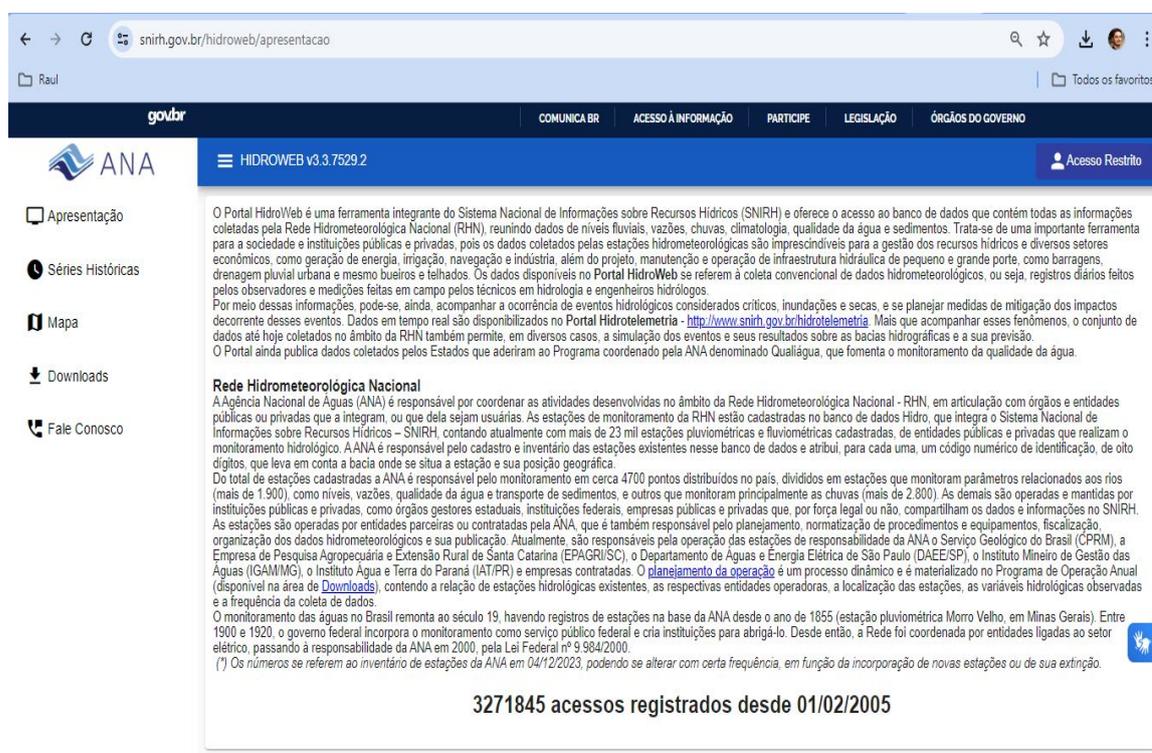


Figura 3.9: Portal HidroWeb.  
Fonte: ANA [1].

Especificamente, para obter dados de precipitação e níveis de água de uma determinada bacia hidrográfica, como a do Rio Pomba, por exemplo, é possível acessar o mapa interativo do território nacional, que exibe as estações hidrometeorológicas da ANA. Em *Rede Hidrometeorológica Nacional*, há um “campo” que direciona o mapa interativo para a região de interesse. Nessa região, é possível visualizar a área ao redor de Santo Antônio de Pádua, bem como as estações hidrometeorológicas disponíveis no trecho compreendido entre a barragem da UHE Barra do Braúna e a sede do município de Santo Antônio de Pádua, conforme demonstrado na Figura 3.10.

Ao clicar sobre o ícone de localização da estação de interesse, uma nova janela abrirá e serão apresentadas informações sobre o nome da estação, ilustrado na Figura 3.11, o tipo (pluviométrica ou fluviométrica) e a opção de baixar dados. Ao clicar em baixar "dados", abrirá a janela de séries históricas com os dados convencionais, conforme Figura 3.12, e dados telemétricos, tal como na Figura 3.13, já disponíveis para *download* no formato de interesse.

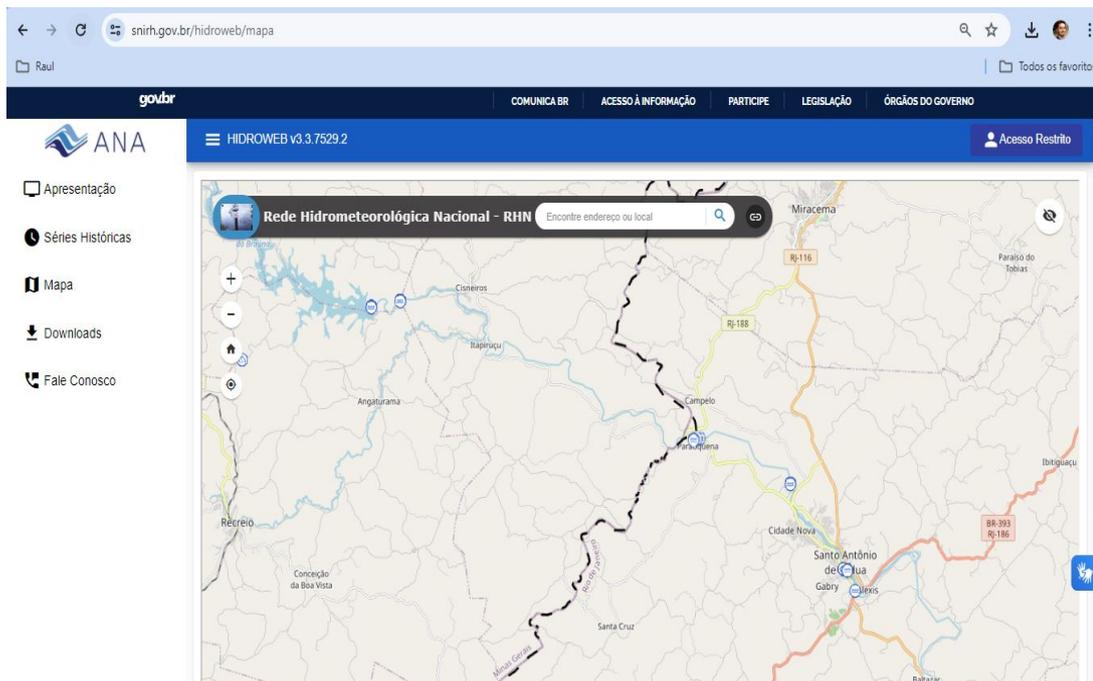


Figura 3.10: Mapa interativo referente a Rede Hidrometeorológica Nacional, em destaque a região de estudo.

Fonte: ANA [1].

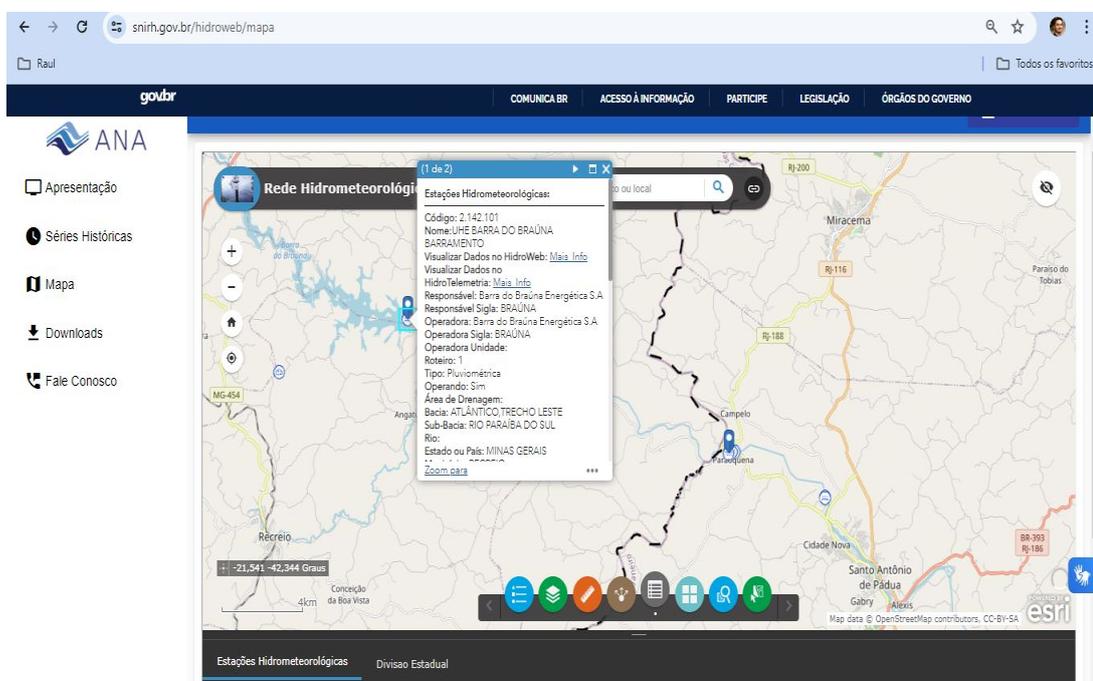


Figura 3.11: Região ao redor de Santo Antônio de Pádua e estações da Rede Hidrometeorológica Nacional nas proximidades, em destaque a estação denominada UHE BARRA DO BRAUNA BARRAMENTO.

Fonte: ANA [1].

The screenshot shows the ANA web portal interface for downloading conventional data. The page title is 'Estações Convencionais'. Below the search bar, there are two tabs: 'Dados Convencionais' (selected) and 'Dados Telemétricos'. The table below lists two stations:

Código	Nome Estação	Tipo Estação	baixar txt	baixar csv	baixar mdb
<a href="#">2142101</a>	UHE BARRA DO BRAÚNA BARRAMENTO	Pluviométrica			
<a href="#">58788500</a>	UHE BARRA DO BRAÚNA BARRAMENTO	Fluviométrica			

At the bottom of the table, there is a pagination control showing '1 - 2 / 2' and a '1 - 2 / 2' indicator.

Figura 3.12: *Download* de dados convencionais.  
Fonte: ANA [1].

The screenshot shows the ANA web portal interface for downloading telemetric data. The page title is 'Estações Telemétricas'. Below the search bar, there are two tabs: 'Dados Convencionais' and 'Dados Telemétricos' (selected). The table below lists one station:

Selecionar	Código	Nome Estação	Bacia	SubBacia	Rio	Estado	Município	Responsável	Operadora	Tipo Estação
<input type="checkbox"/>	<a href="#">58788500</a>	UHE BARRA DO BRAÚNA BARRAMENTO	5 - Atlântico, Trecho Leste	58 - RIO PARAIBA DO SUL	RIO POMBA	MINAS GERAIS	RECREIO	BRAÚNA	BRAÚNA	Hidroológica

Below the table, there is a pagination control showing '1 - 1 / 1'. The 'Tipo de Arquivo' section allows selecting the download format: 'Arquivo Texto (.TXT)' (selected) and 'Arquivo Excel (.CSV)'. There is also a 'Gerar Arquivo' button and a date range selector with 'Período Inicial' (07/02/2022) and 'Período Final' (17/01/2022). A note states: 'O período informado não pode ser superior à 90 dias.'

Figura 3.13: *Download* de dados telemétricos.  
Fonte: ANA [1].

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentadas as informações e os resultados obtidos nas simulações realizadas no software IBER referentes a eventos de inundações ocorridos na cidade de Santo Antônio de Pádua. Cabe ressaltar que foram investigadas distintas combinações de modelos digitais de elevação para a realização das simulações, de modo a analisar a comparação dos resultados obtidos, bem como verificar o tempo empregado em cada simulação. Os resultados apresentados neste trabalho foram gerados em um computador Intel Celeron, CPU 3865U, com 4 GB de memória RAM. Foi utilizado o software IBER versão 3.3.1 para realização das simulações.

### 4.1 Desenvolvimento da Etapa de Pré-Processamento para a Região de Estudos

O MDE Copernicus GLO-30 [14], uma das fontes de dados da topografia da região de interesse, é encontrado, originalmente no sistema de coordenadas WGS84 [EPSG: 4326]. Desse modo, é necessário redefinir o sistema de coordenadas do MDE para WGS84 [EPSG: 32723], garantindo, assim, que todas as informações utilizadas tenham o mesmo sistema de coordenadas, sendo esse ajuste realizado no software QGIS.

No QGIS, o procedimento pode ser acessado pelo comando “*caixa de ferramentas => reprojetar coordenadas*”, assim abrirá a caixa de dialogo para seleção da camada de entrada, bem como informar o sistema de coordenadas original (WGS84 [EPSG: 4326]) e selecionar o sistema de coordenadas de destino (WGS84 [EPSG: 32723]). Posteriormente, basta executar a reprojeção, procedimento ilustrado na Figura 4.1.

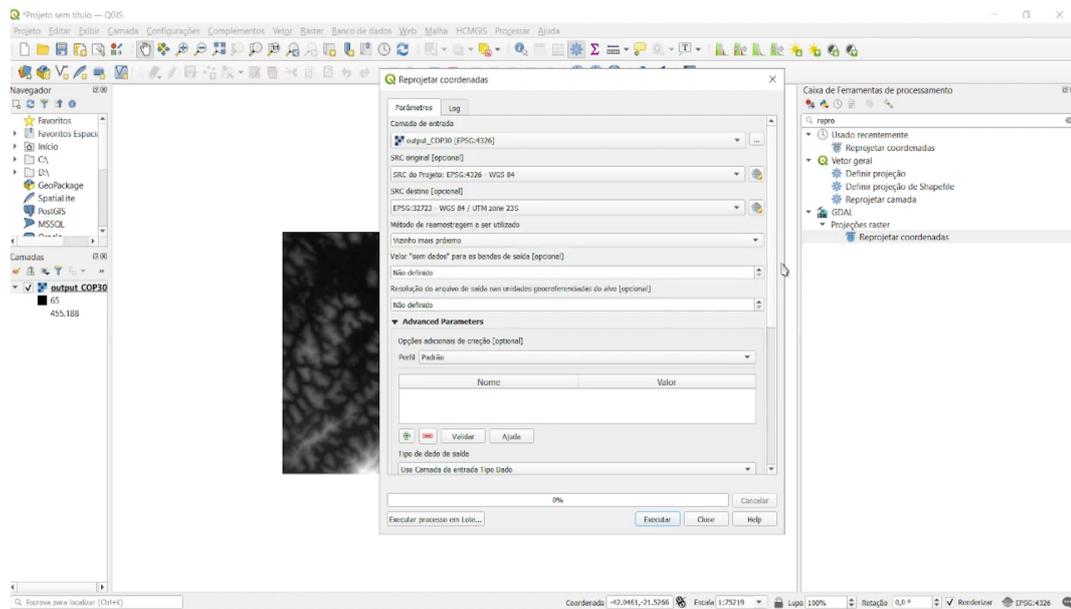


Figura 4.1: Reprojeção de coordenadas no software QGIS.

Fonte: O Autor (2024).

No IBER, primeiro deve-se abrir a foto georreferenciada da região de interesse. Em seguida, através do menu “*Geometria*”, são construídos os polígonos para determinar a área estudada, conforme Figuras 4.2 e 4.3, onde são mostradas as áreas de trabalho com os polígonos delimitadores utilizados para a geração das superfícies adotadas nas simulações, sendo apresentada a demarcação das áreas urbanas, área do Rio Pomba e as planícies de inundação, que são as três superfícies criadas, ou seja, a superfície foi gerada de forma contínua.



Figura 4.2: Imagem de fundo e superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas.

Fonte: O Autor (2024).

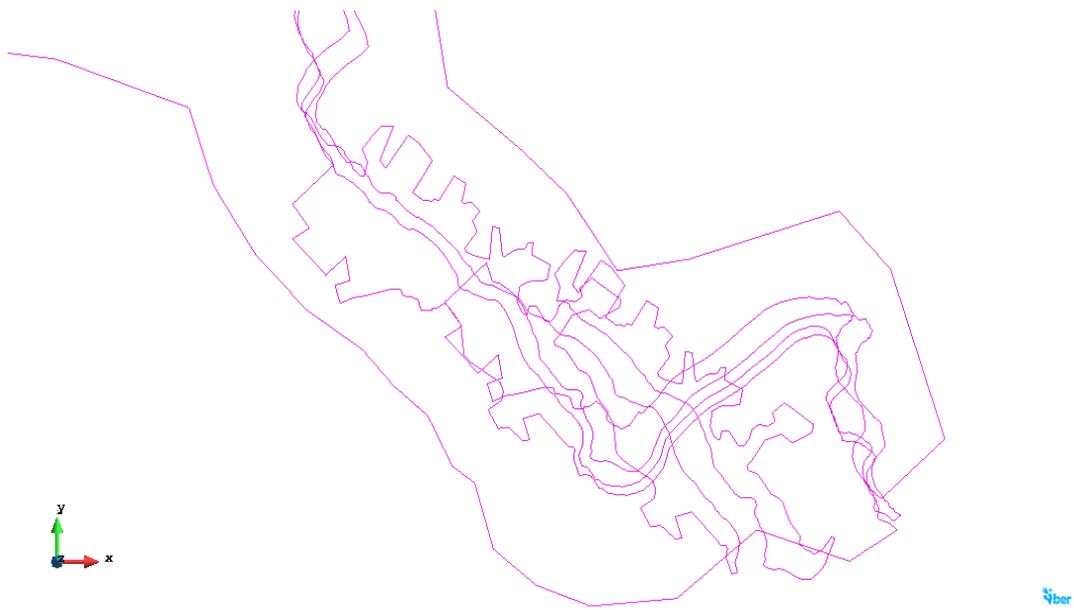


Figura 4.3: Contorno das superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas.  
Fonte: O Autor (2024).

Por outro lado, nas Figuras 4.4 e 4.5 são mostradas as mesmas superfícies utilizadas para a geração das simulações, considerando, também, a inclusão de "anéis/buracos" na área urbana do município de Santo Antônio de Pádua, pois, para esse segundo conjunto de simulações, as regiões contendo as edificações foram subtraídas das superfícies. Com isso, nota-se uma maior concentração de vértices na área urbana.

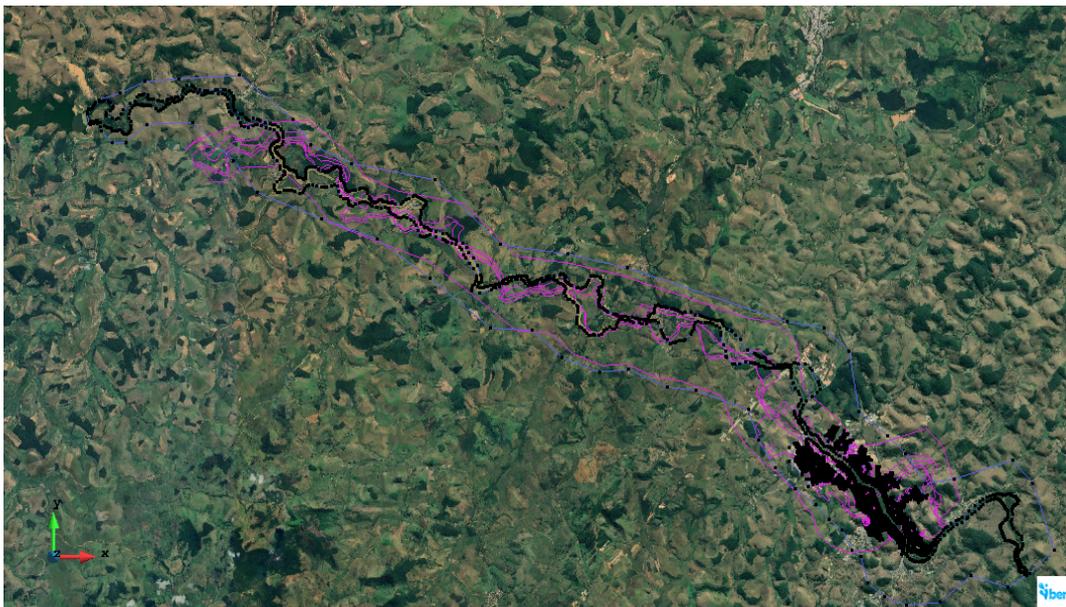


Figura 4.4: Imagem de fundo e superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas, incluindo os "anéis".

Fonte: O Autor (2024).



Figura 4.5: Contorno das superfícies construídas de acordo com as áreas estudadas, incluindo os "anéis".

Fonte: O Autor (2024).

Após a geração dos conjuntos de superfícies, deve-se inserir as condições de contorno de entrada e saída, que é realizado por meio do comando “*dados => hidrodinâmica => condições de contorno*”. Importante ressaltar que foram utilizadas as mesmas condições de contorno em todas as simulações. Tais informações variam de acordo com o tipo de simulação que se deseja realizar.

Já para a atribuição das condições iniciais do problema, em “*dados => hidrodinâmica => condições iniciais*”, foi estabelecida profundidade igual zero em todas as superfícies analisadas.

Em seguida, é necessário informar as condições referentes ao uso do solo, definindo o valor do coeficiente de rugosidade para cada superfície, o que é feito em “*dados => coeficiente de rugosidade => uso do solo*”. Neste trabalho, estabeleceu-se o coeficiente de rugosidade para a área urbana com  $0,15 \text{ sm}^{-1/3}$ , para a superfície do rio com  $0,025 \text{ sm}^{-1/3}$  e para a planície com  $0,05 \text{ sm}^{-1/3}$ , conforme apresentado nas Figuras 4.6 e 4.7, os quais são tomados como *default* no software IBER para os referidos usos do solo.

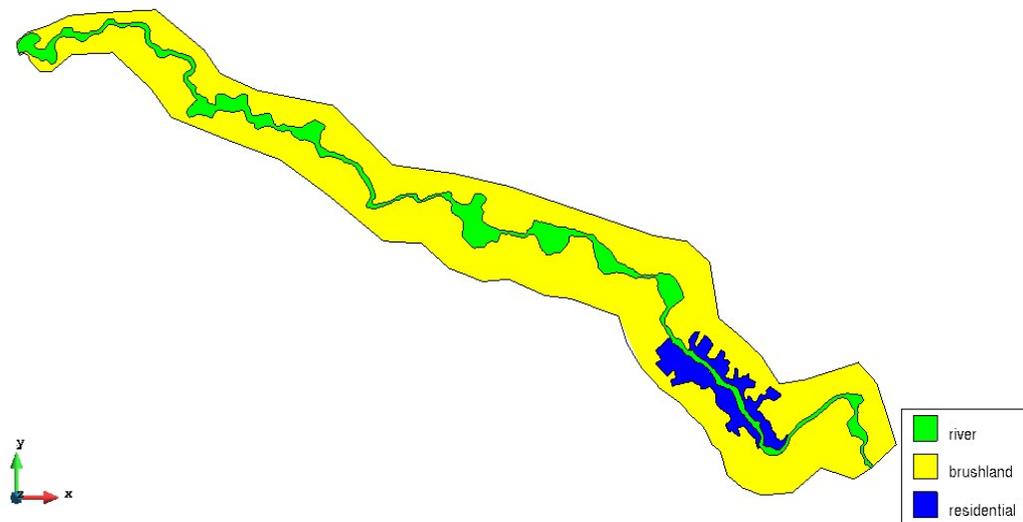


Figura 4.6: Uso do solo utilizado nas simulações.  
Fonte: O Autor (2024).

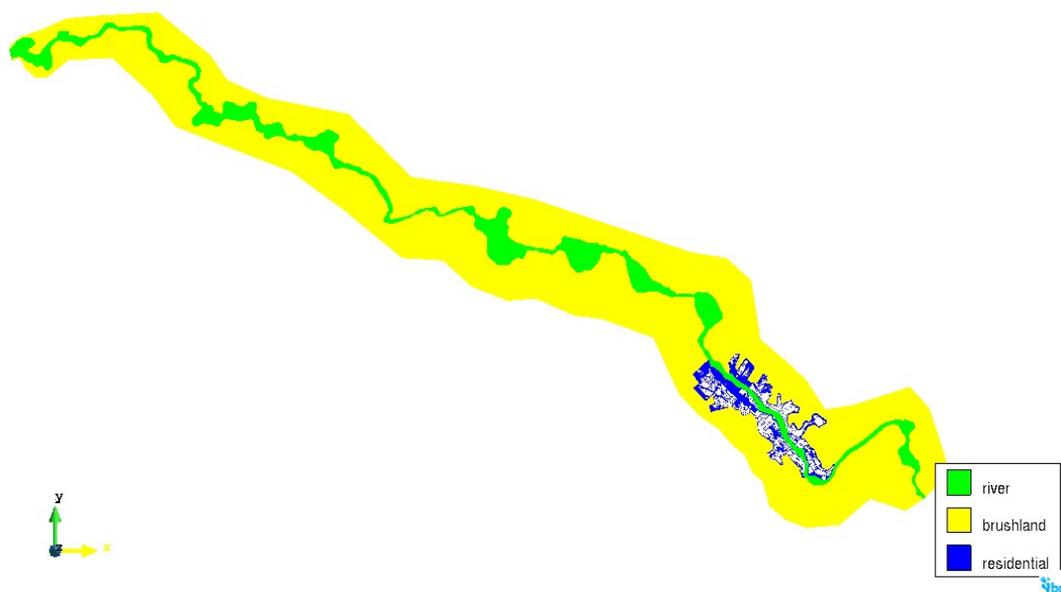


Figura 4.7: Uso do solo utilizado nas simulações com as superfícies contendo os "anéis".  
Fonte: O Autor (2024).

Agora, torna-se necessário a criação da malha para a aplicação do Método de Volumes Finitos (MVF), a qual, para este trabalho, trata-se de uma malha não estruturada. Para isso, são construídos os elementos triangulares através da opção “malha => não estruturada => definir tamanho de superfícies”, definindo o tamanho de 5 metros para os elementos que compõem a área urbana, 50 metros para os elementos que compõem as superfícies do rio e 500 metros para os elementos da planície de inundação. Posteriormente, é gerada uma malha com base no tamanho desses elementos em cada superfície.

Na Figura 4.8 é mostrada a malha obtida para a região de interesse contendo 416.402 elementos triangulares e 208.377 números de vértices, considerando as superfícies contínuas. Já na Figura 4.9 é mostrada a malha para a superfície com "anéis", a qual contém 264.880 elementos triangulares e 149.035 números de vértices.

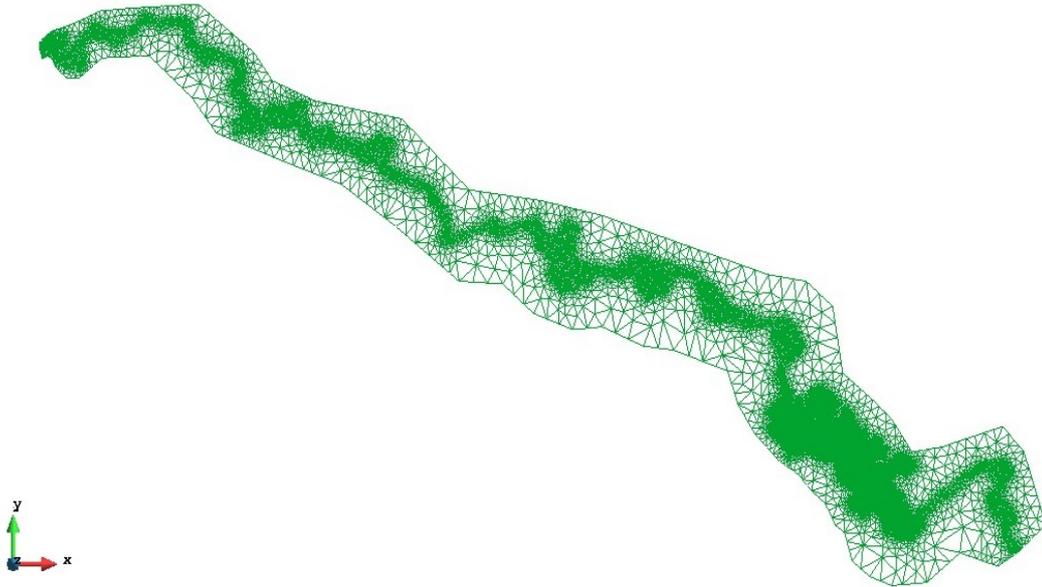


Figura 4.8: Malha gerada para as superfícies contínuas.  
Fonte: O Autor (2024).

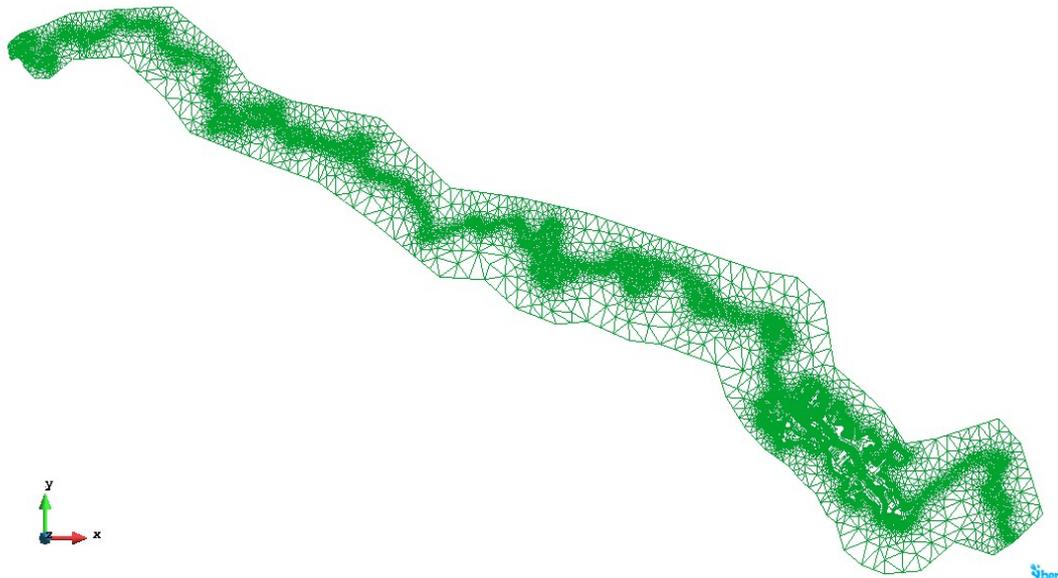


Figura 4.9: Malha gerada para as superfícies com "anéis".  
Fonte: O Autor (2024).

Por fim, é necessário fazer a atribuição dos dados de topografia aos elementos da malha gerada. Isso pode ser feito acessando *“ferramentas IBER => malha => editar*

=> *selecionar arquivo de elevação => buscar + selecionar o arquivo desejado => abrir e aceitar*". Para esta etapa, neste trabalho são investigados distintos modelos digitais de elevação, bem como ajustes em suas estruturas, conforme descrito na próxima seção.

#### 4.1.1 Atribuição dos Dados de Topografia

Partindo das construções apresentadas na seção anterior para o software IBER, foram realizadas 9 (nove) simulações com diferentes MDEs e superfícies, conforme apresentadas nas Figuras 4.2 a 4.5. Para estas simulações, foi utilizado o MDE Copernicus GLO-30 e algumas variações realizadas com o auxílio do software QGIS.

Uma das variações realizadas no referido MDE, foi o rebaixamento da calha do Rio Pomba em 5 metros, pois este MDE, em sua geração, considera a superfície do nível de água do rio. Outra variação realizada neste MDE, foi o ajuste realizado com dados topográficos disponibilizados pelo PAE (Prefeitura de Pádua).

Houve ainda, dois rebaixamentos no leito do Rio Pomba após o ajuste do MDE Copernicus GLO-30 com os dados do PAE, um considerando o rebaixamento de 3 metros e outro com o rebaixamento em 5 metros. Para algumas simulações, também foi realizada a elevação dos locais onde situam-se as edificações nas áreas urbanizadas em 3 metros. Na Tabela 4.1 são mostrados todos os dados de topografia utilizados neste trabalho.

Tabela 4.1: Dados de topografia utilizados nas simulações.

Cenário	MDE	Rebaixamento do Leito do Rio	Elevação das Edificações	Superfícies
1	Copernicus GLO-30	3 metros	não	Contínua
2	Copernicus GLO-30	3 metros	3 metros	Contínua
3	Copernicus GLO-30	3 metros	não	Anéis
4	PAE	5 metros	não	Contínua
5	PAE	5 metros	3 metros	Contínua
6	PAE	5 metros	não	Anéis
7	Copernicus GLO-30 e PAE	3 metros	não	Contínua
8	Copernicus GLO-30 e PAE	3 metros	3 metros	Contínua
9	Copernicus GLO-30 e PAE	3 metros	não	Anéis

Fonte: O Autor (2024).

Como exemplo de diferenças entre as topografias obtidas, na Figura 4.10 é mostrado

o resultado obtido após o rebaixamento do leito do Rio Pomba em 3 metros, no MDE Copernicus GLO-30, utilizado no Cenário 1. Já na Figura 4.11 é apresentado o MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros e elevação das edificações na área urbanizada em 3 metros, base topográfica do Cenário 2. Por fim, na Figura 4.12 tem-se o MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros e exclusão das áreas edificadas, fonte dos dados de topografia do Cenário 3.



Figura 4.10: MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros.  
Fonte: O Autor (2024).



Figura 4.11: MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros e elevação das edificações da área urbanizada em 3 metros.  
Fonte: O Autor (2024).



Figura 4.12: MDE Copernicus GLO-30 com rebaixamento no leito do rio em 3 metros e exclusão das áreas edificadas.

Fonte: O Autor (2024).

## 4.2 Análise dos Modelos Digitais de Elevação e das Superfícies IBER

Para a análise dos resultados dos distintos modelos digitais de elevação, bem como as superfícies contínuas e com anéis, conforme identificado na Tabela 4.1, foi considerada, como condição de contorno de entrada, uma vazão de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , justificada por ser uma vazão superior às vazões máximas obtidas para a UHE Barra do Braúna para os períodos de Janeiro de 2022 e 2023, eventos utilizados para validação das simulações. Já, para a condição contorno de saída, foi definido um fluxo supercrítico/crítico.

Após serem realizadas todas as etapas descritas anteriormente, faz-se necessário executar a simulação para a obtenção dos resultados. Para isso, primeiro, em “*dados => dados do problema => nova simulação*”, foram inseridas as informações sobre o período a ser simulado, o qual, para estas análises, foi configurado com tempo inicial de 0 s e tempo máximo de 86.400 s, o que totaliza 24 horas de simulação, com passo de tempo de 3.600 s (1 hora), como mostrado na Figura 4.13.

O IBER apresenta um ambiente que verifica o comportamento do nível d’água ao longo do tempo na região de interesse, chamado de pós-processamento. No pós-processamento, é possível determinar a profundidade e a elevação da lâmina d’água no decorrer de todo o processo de simulação. Uma das formas de observar os resultados é a geração da imagem

com mapa de máximos, ou seja, é possível obter uma imagem no momento em que houve a maior profundidade da lâmina d'água durante toda a simulação.

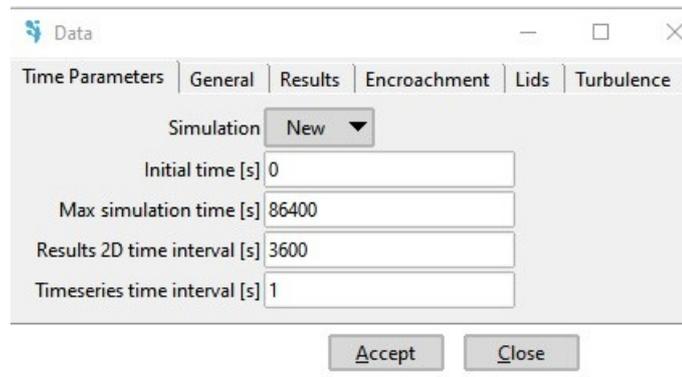


Figura 4.13: Configuração do período a ser simulado no IBER.  
Fonte: O Autor (2024).

Neste trabalho, como as simulações consideraram a vazão de entrada constante (1.500 m<sup>3</sup>/s), observa-se que os mapas de máximos podem ser obtidos no tempo máximo da simulação (86.400 s). Nas Figuras 4.14 a 4.22 são mostrados os mapas de máximos para a região em torno da área urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua, obtidos para os Cenários 1 a 9, respectivamente.

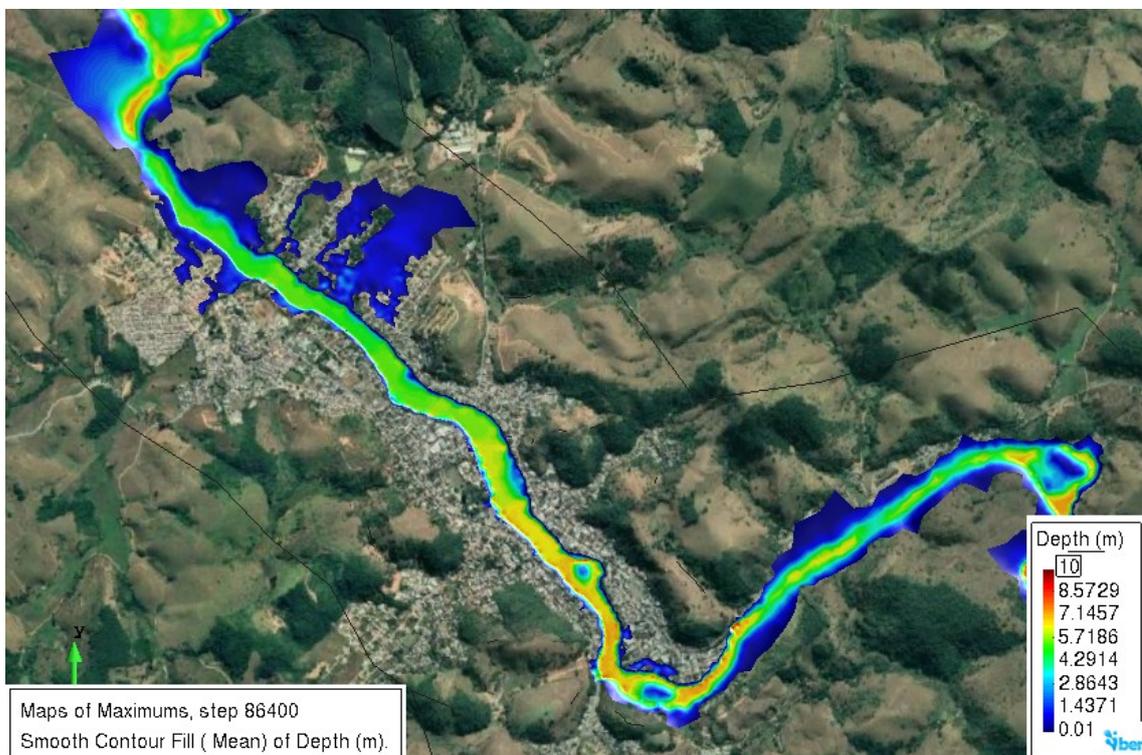


Figura 4.14: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 1, decorridos 86.400 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

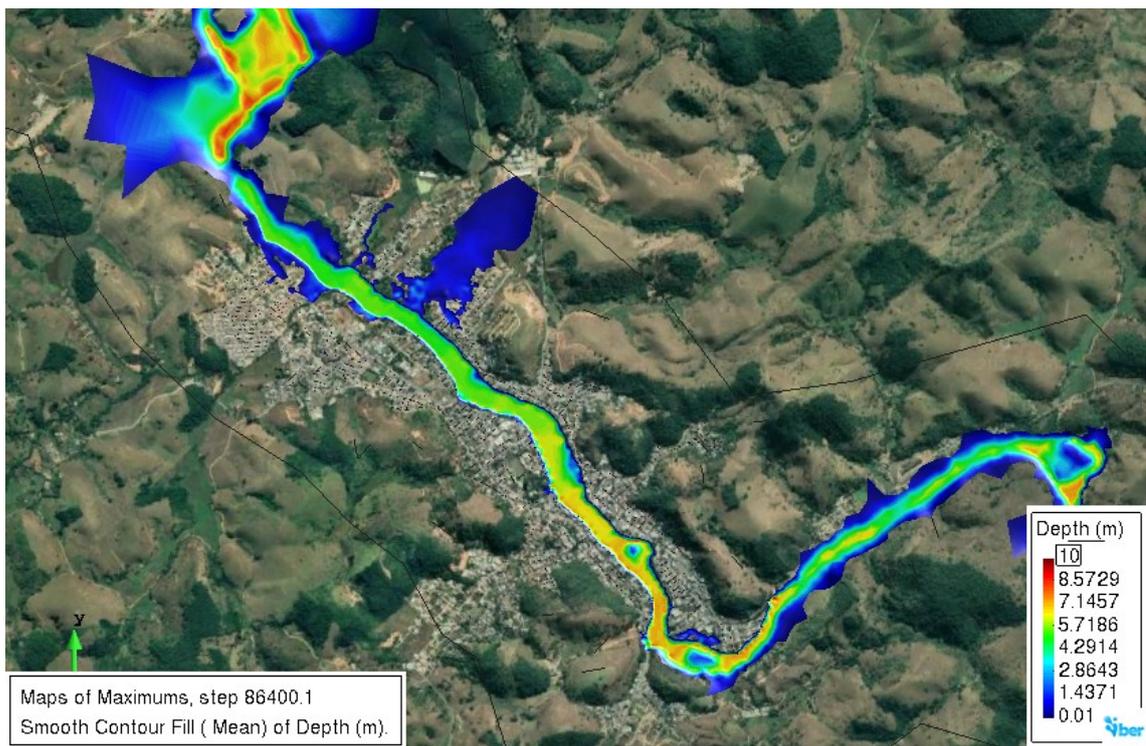


Figura 4.15: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 2, decorridos 86.400 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

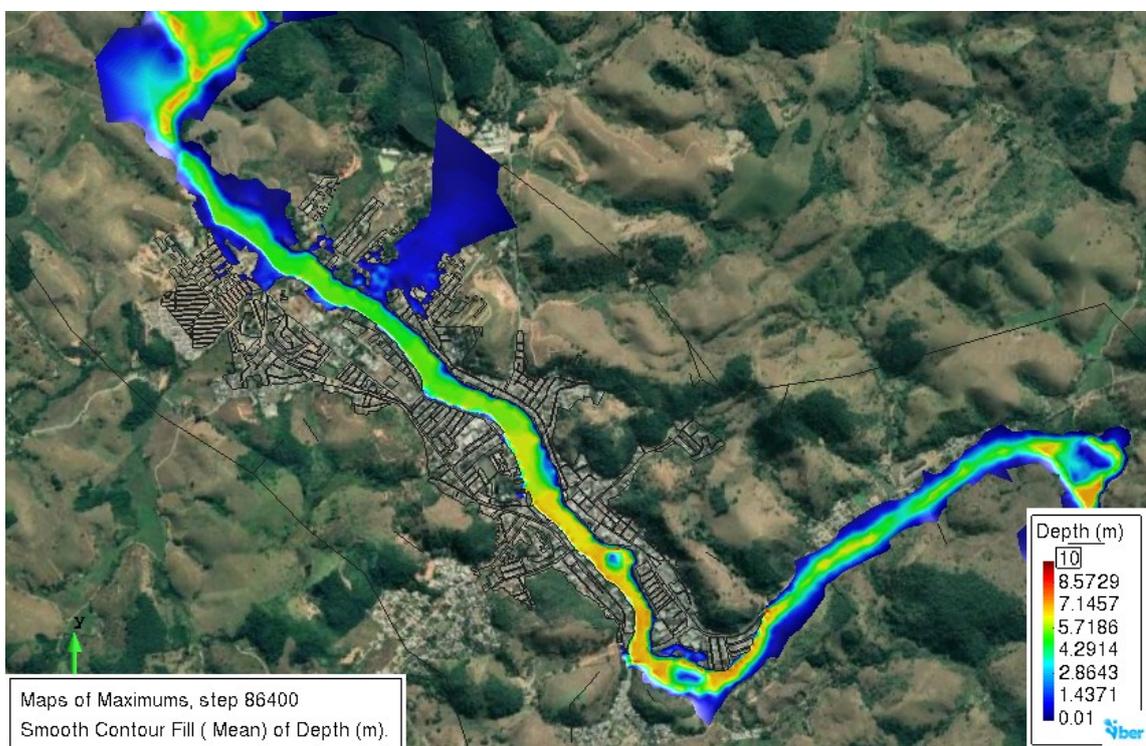


Figura 4.16: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 3, decorridos 86.400 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

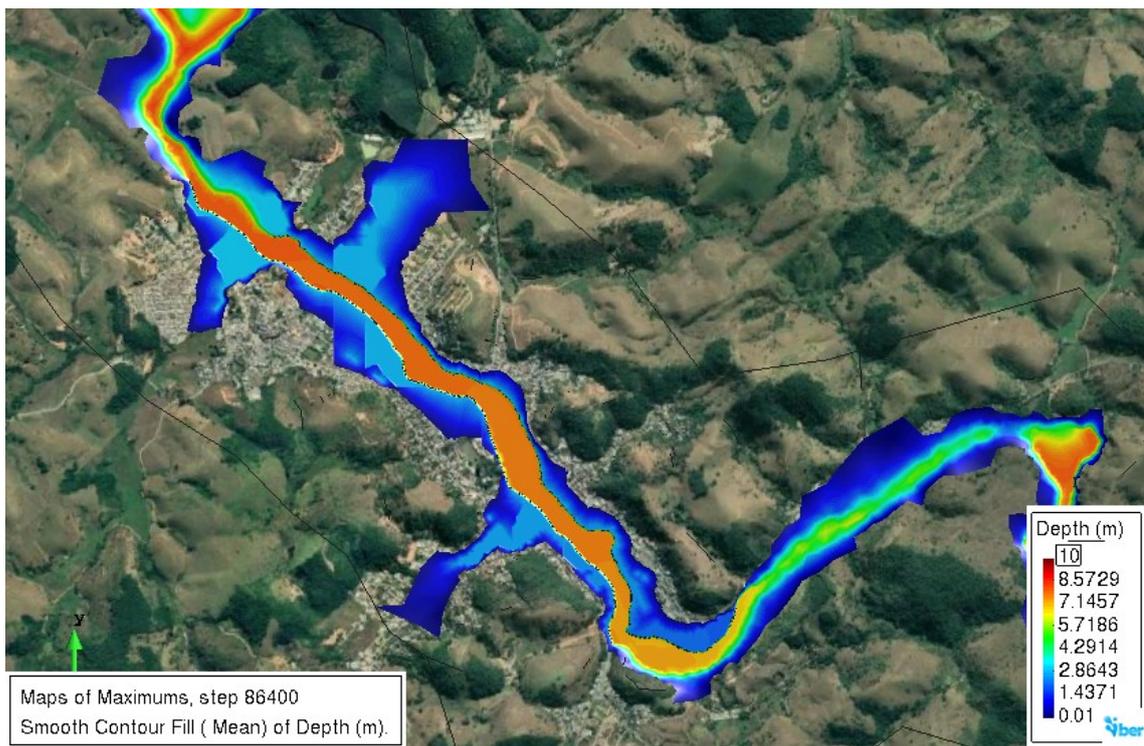


Figura 4.17: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 4, decorridos 86.400 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

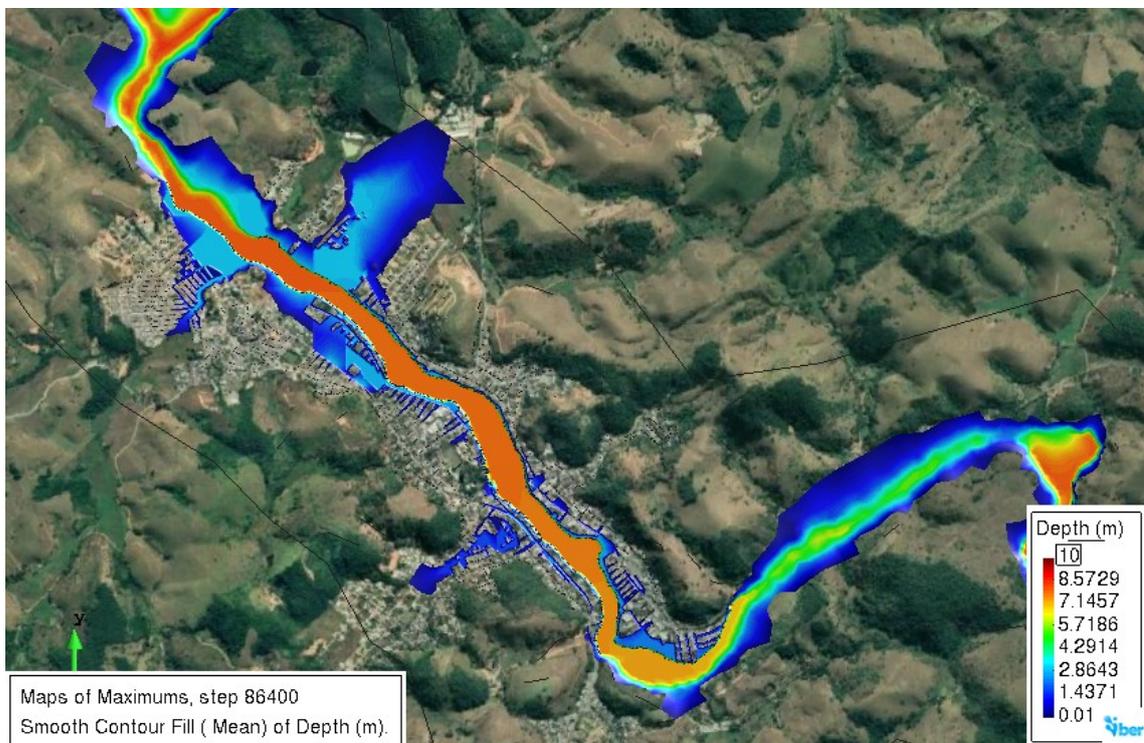


Figura 4.18: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 5, decorridos 86.400 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

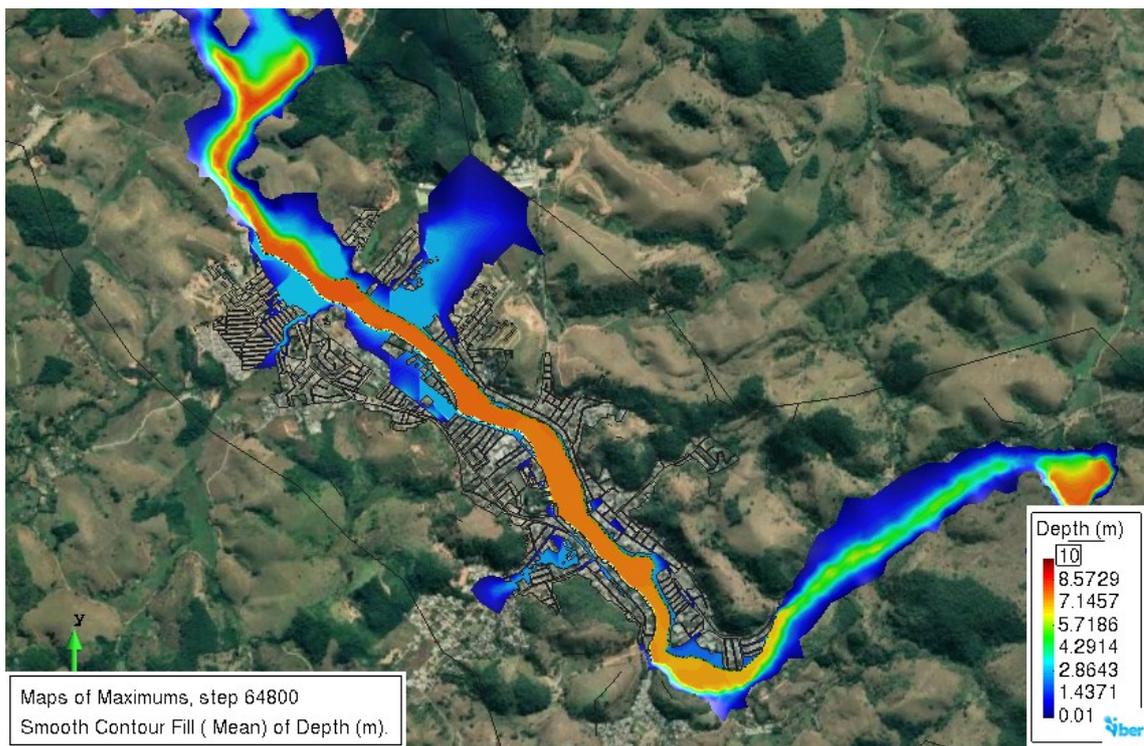


Figura 4.19: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 6, decorridos 64.800 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

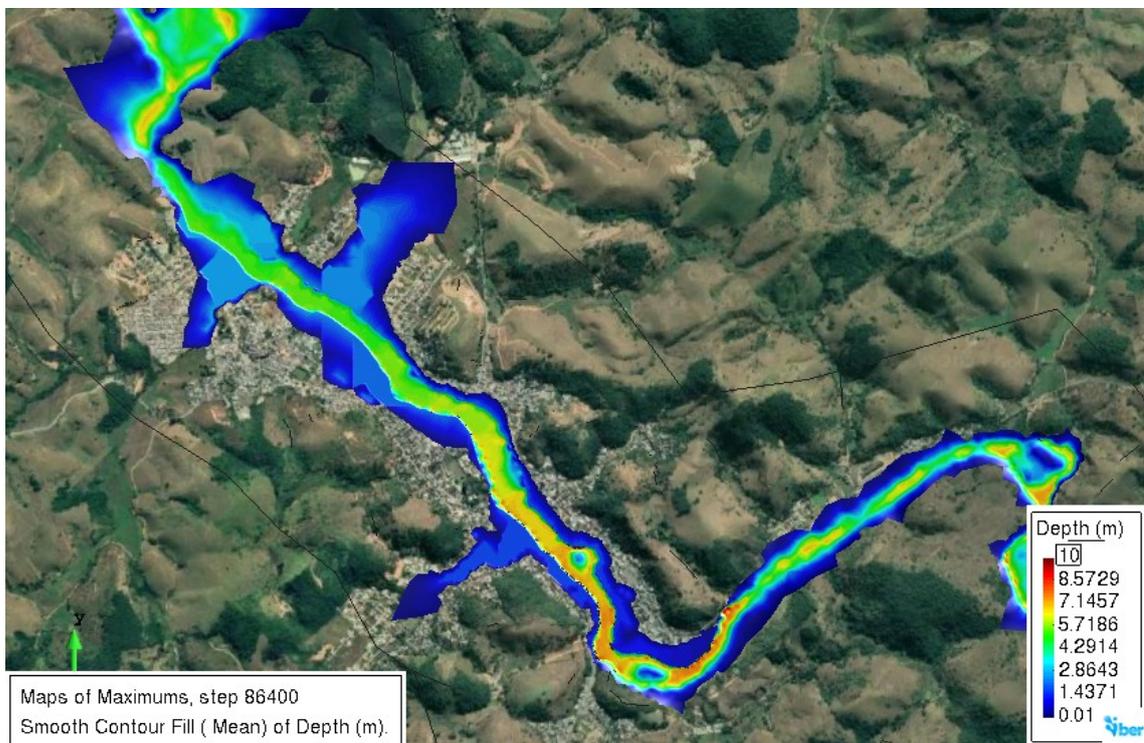


Figura 4.20: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 7, decorridos 86.400 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

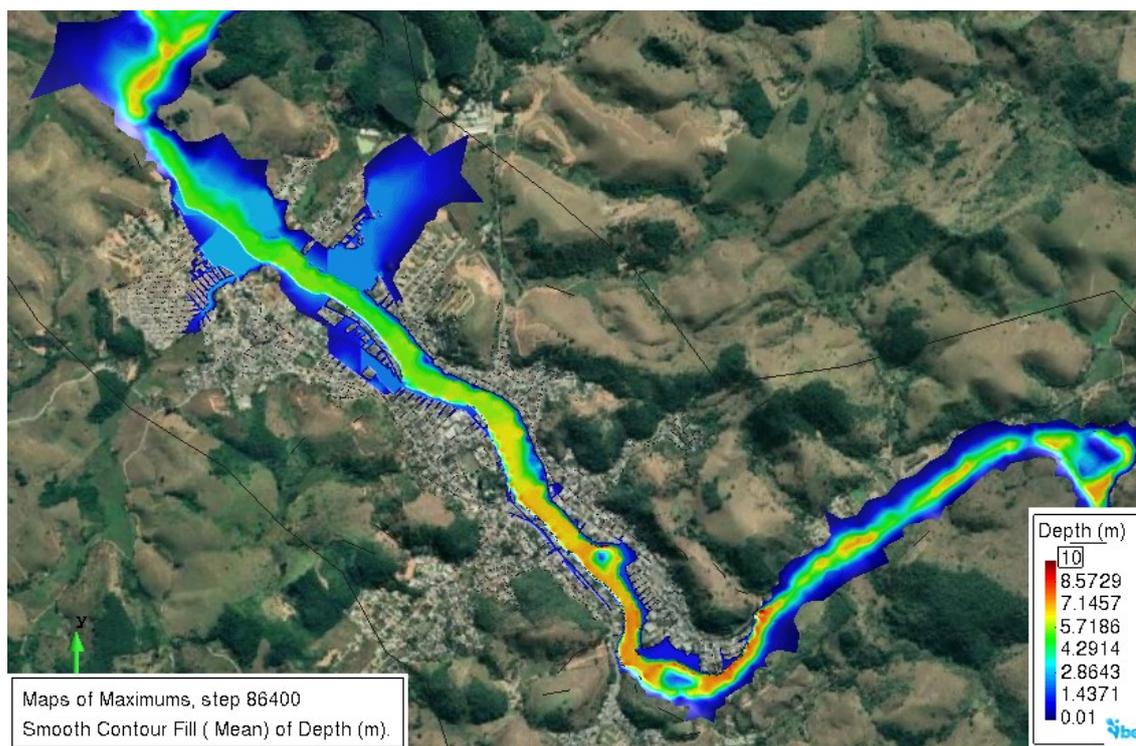


Figura 4.21: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 8, decorridos 86.400 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

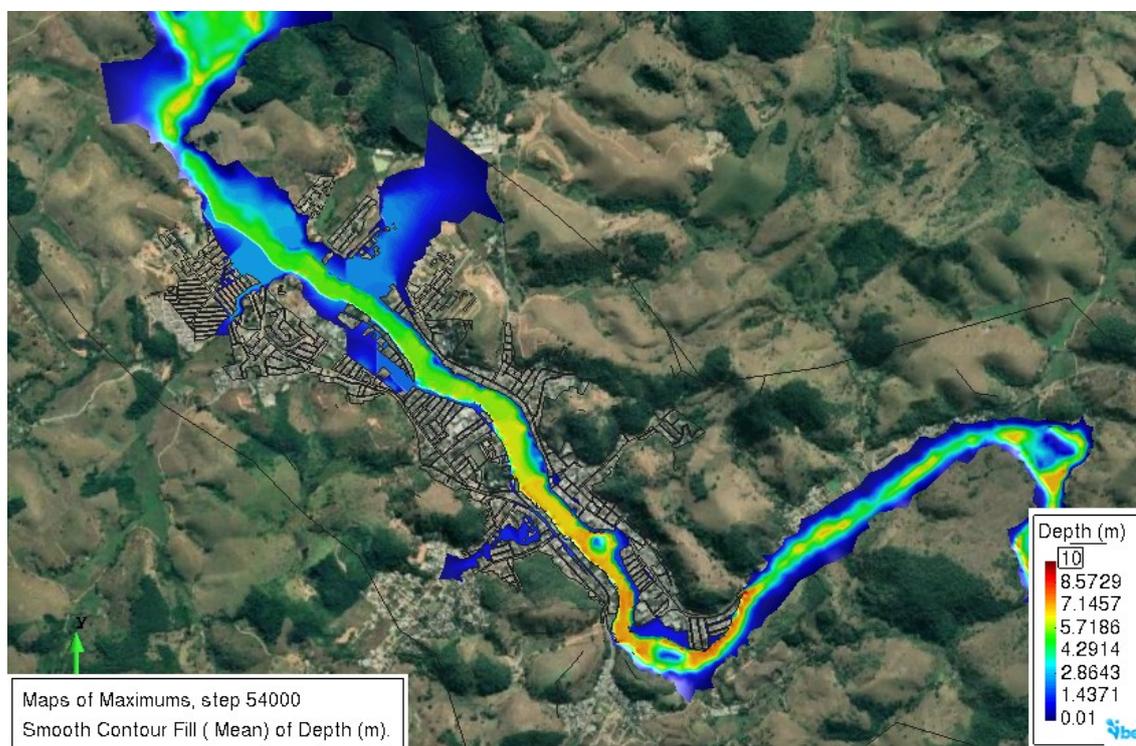


Figura 4.22: Mapa de profundidade máxima obtido para o Cenário 9, decorridos 54.000 s de simulação.

Fonte: O Autor (2024).

Para a análise e comparação dos resultados obtidos nas simulações, foram definidos 4 pontos para a geração de gráficos de profundidade e elevação do nível de água, permitindo, assim, a observação do comportamento nesses locais escolhidos. Os pontos observados ficam próximos ao distrito de Paraoquena, Ponte do Nando, Centro de Santo Antônio de Pádua e próximo à Rodoviária de Pádua. Na Tabela 4.2 são mostradas as coordenadas dos pontos utilizados para a geração dos gráficos.

Tabela 4.2: Coordenadas X e Y dos pontos com a geração dos gráficos.

Ponto	X	Y	Localização
1	784711,1	7620580	Paraoquena
2	789332	7618760	Ponte do Nando
3	792010	7615180	Centro
4	792382	7614420	Rodoviária

Fonte: O Autor (2024).

Inicialmente, foi realizada a análise da profundidade e elevação do conjunto de simulações realizadas a partir dos MDEs contendo apenas o rebaixamento do nível do Rio Pomba e utilizando as superfícies descritas anteriormente para o primeiro caso, ou seja, as superfícies contínuas para a área urbana do município. Sendo essas simulações identificadas pelos Cenários 1, 4 e 7 na Tabela 4.1. O tempo demandado por essas simulações foi de, aproximadamente, dois dias de processamento. Na Figura 4.23 é mostrada a profundidade da lâmina de água nos pontos observados na simulação utilizando o MDE Copernicus GLO-30 (Cenário 1). Já na Figura 4.24 tem-se a profundidade da lâmina de água na simulação com o MDE PAE (Cenário 4). E, na Figura 4.25 é apresentada a profundidade obtida na simulação combinando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE (Cenário 7).

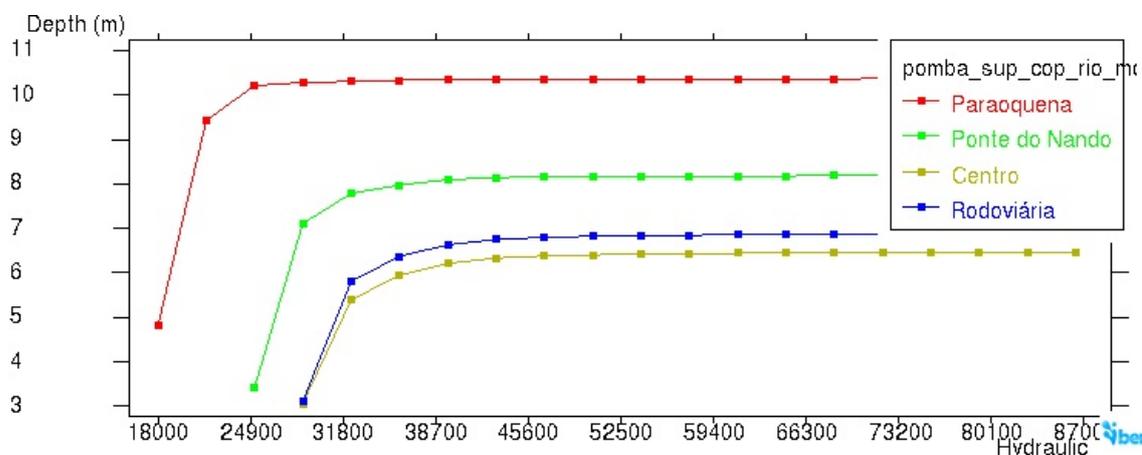


Figura 4.23: Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

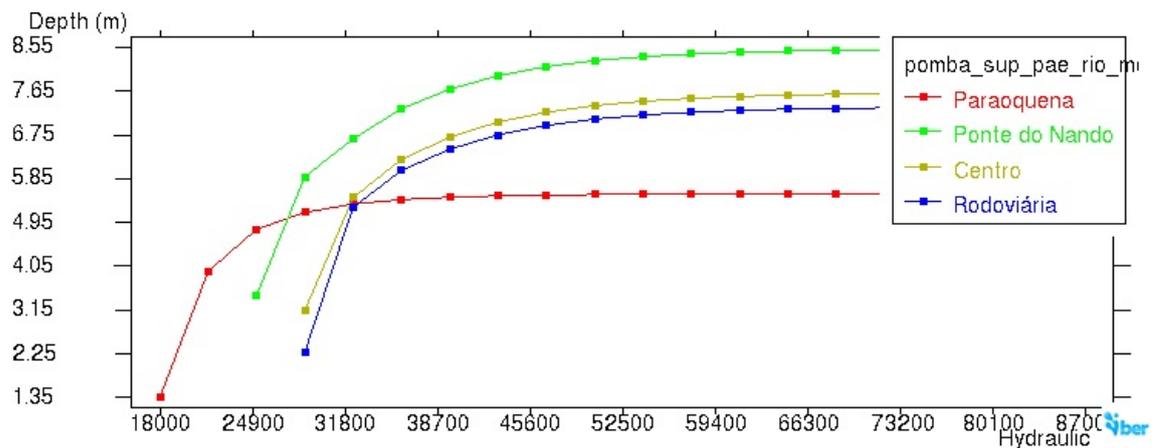


Figura 4.24: Profundidade da lâmina d'água utilizando MDE PAE e superfícies contínuas.  
Fonte: O Autor (2024).

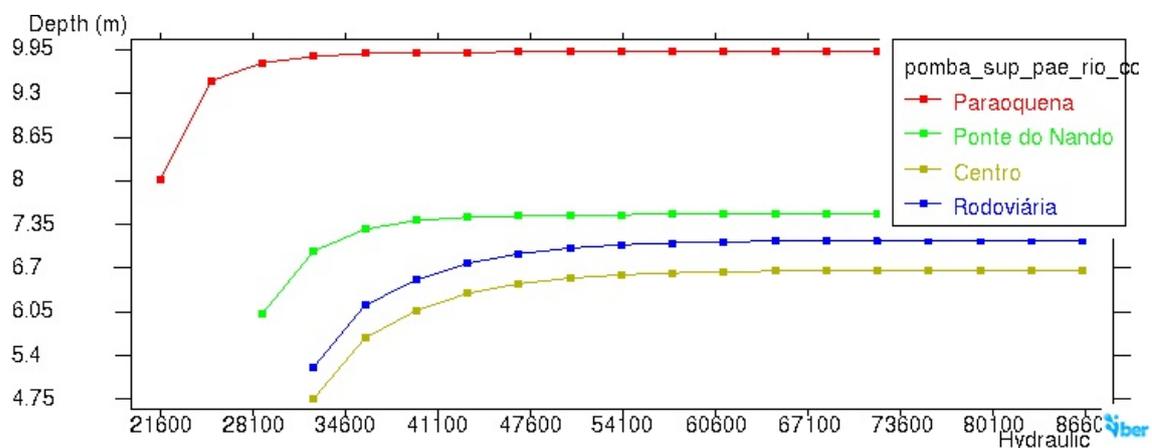


Figura 4.25: Profundidade da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE e superfícies contínuas.  
Fonte: O Autor (2024).

Na sequência, Figura 4.26, é mostrada a elevação da água nos pontos observados durante a simulação usando o MDE Copernicus GLO-30 (Cenário 1), enquanto na Figura 4.27 é apresentada a elevação da água na simulação que emprega o MDE PAE (Cenário 4). Já na Figura 4.28 é exibida a elevação obtida na simulação que combina os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE (Cenário 7). A partir desses resultados, observa-se que, nas três simulações, a água do rio chega em Paraoquena aos 18.000 s (5 horas) de simulação, iniciando a subida dos níveis de água (profundidade e elevação) e estabilizando-se a partir de 24.900 s (aproximadamente, 7 horas) de simulação. Para a Ponte do Nando, à montante da cidade de Santo Antônio de Pádua, a água do rio chega a partir de 24.900 s de simulação e sua estabilização ocorre a partir de 38.700 s (aproximadamente, 11 horas). Nos pontos localizados no centro de Pádua e na Rodoviária, por serem muito próximos geograficamente, a água chega com tempos parecidos, 28.500 s (aproximadamente, 8 horas) e a estabilização ocorre a partir de 45.600 s (12 horas e meia) de simulação.

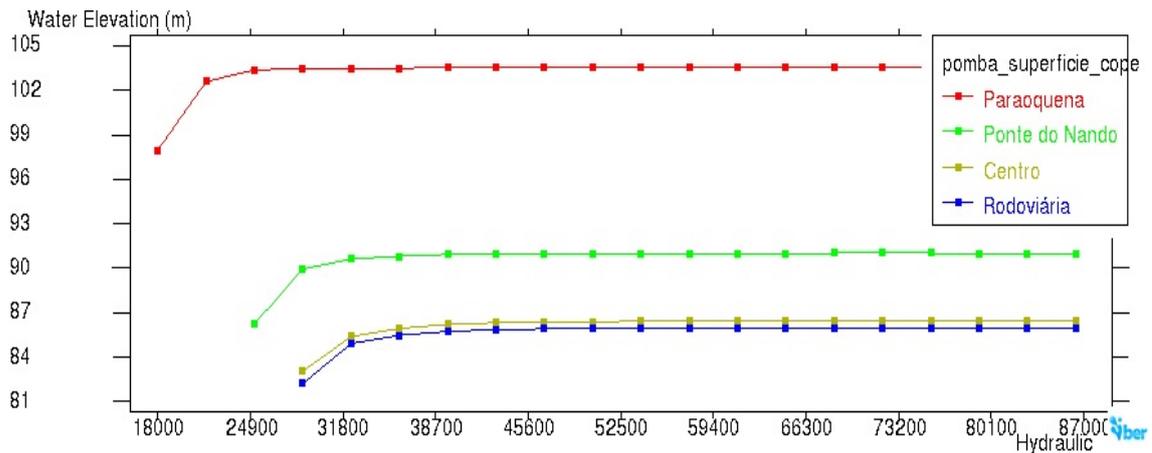


Figura 4.26: Elevação da lâmina d’água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

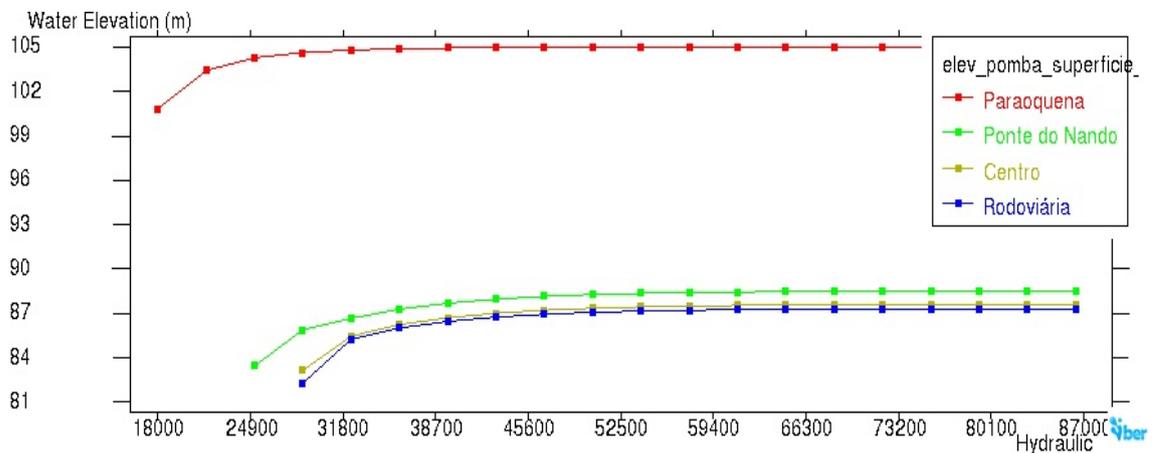


Figura 4.27: Elevação da lâmina d’água utilizando o MDE PAE e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

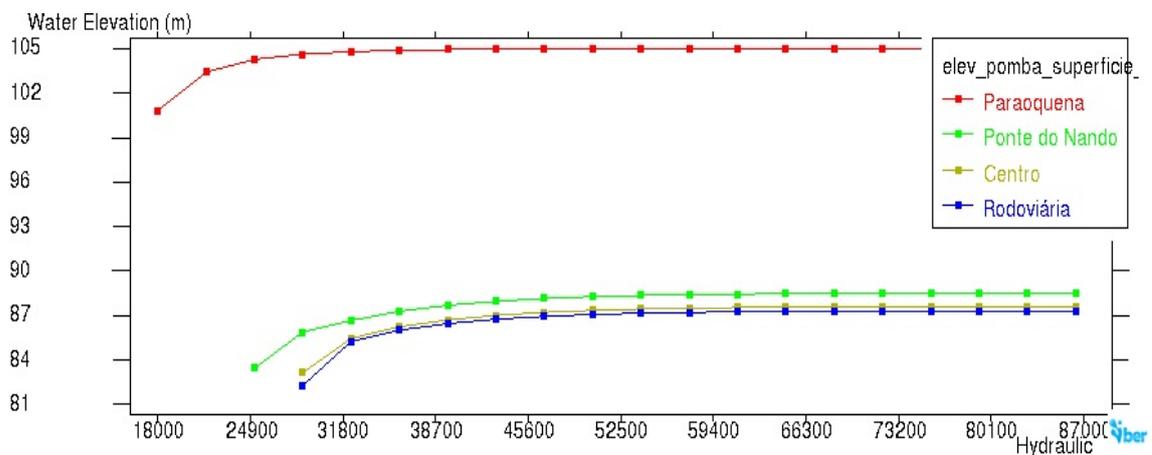


Figura 4.28: Elevação da lâmina d’água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

Na sequência, é apresentada a análise para o segundo conjunto de simulações, o qual utiliza como base para a topografia, os MDEs contendo o rebaixamento na calha do Rio Pomba e a elevação das edificações das áreas urbanizadas, combinados com as superfícies contínuas para a área urbana do município. São as simulações identificadas pelos Cenários 2, 5 e 8 na Tabela 4.1. Para essas simulações, o tempo de processamento demandado foi de, aproximadamente, cinco dias. Na Figura 4.29 é mostrada a profundidade da lâmina de água nos pontos observados durante a simulação utilizando o MDE Copernicus GLO-30 (Cenário 2). Já na Figura 4.30 é apresentada a profundidade da lâmina de água na simulação com o MDE PAE (Cenário 5). E, na Figura 4.31, é exibida a profundidade obtida na simulação que combina os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE (Cenário 8).

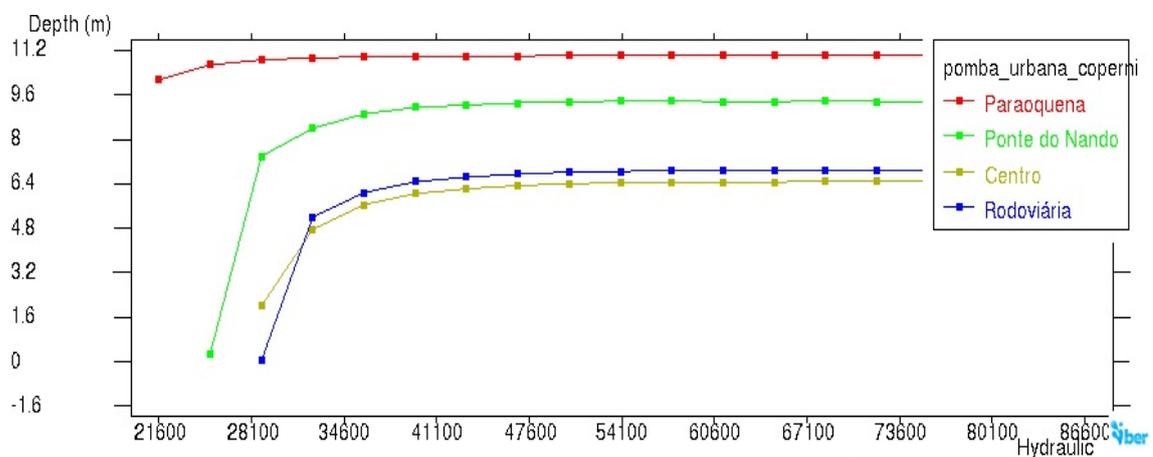


Figura 4.29: Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 com elevação das edificações e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

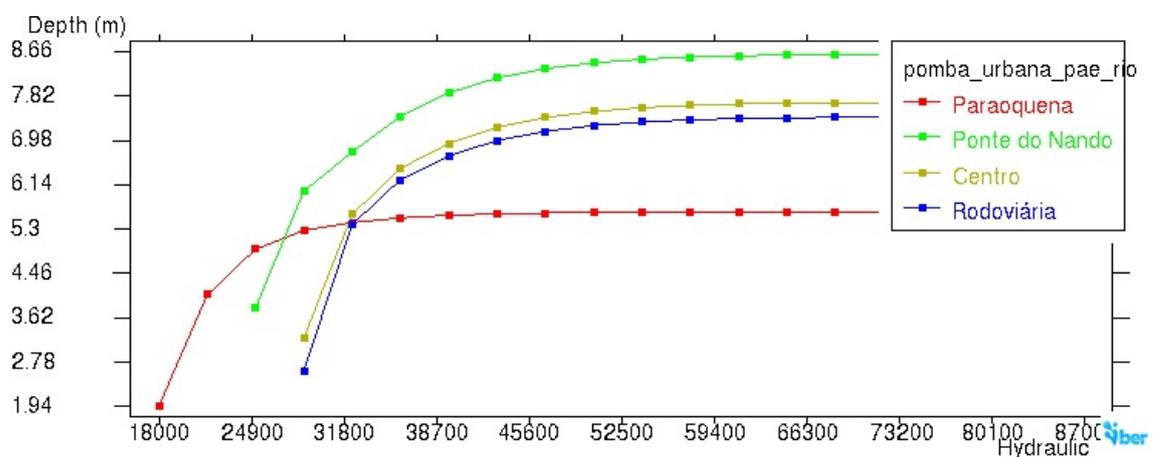


Figura 4.30: Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

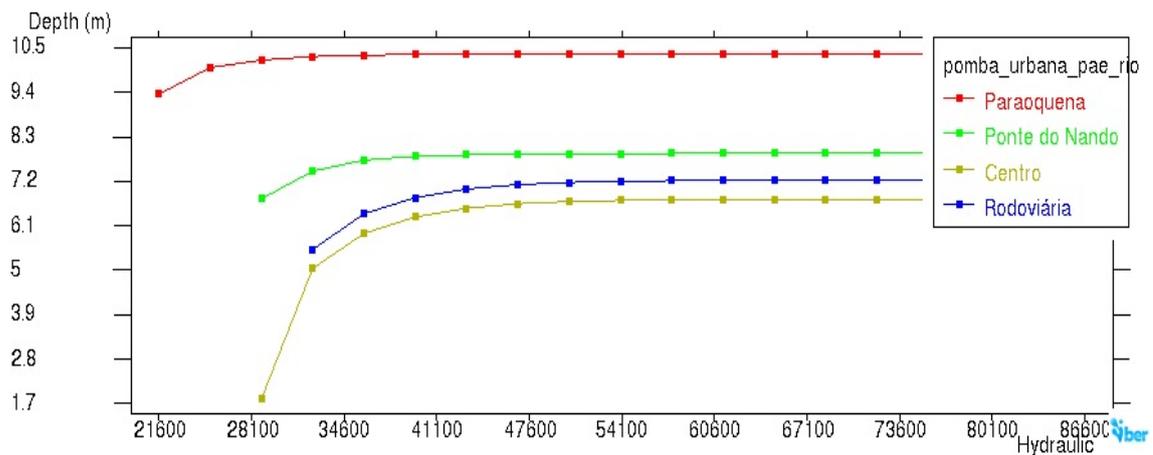


Figura 4.31: Profundidade da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

Além das profundidades, é mostrada, também, conforme Figura 4.32, a elevação da água nos pontos observados durante a simulação utilizando o MDE Copernicus GLO-30 (Cenário 2). Já na Figura 4.33 é apresentada a elevação da água na simulação com o MDE PAE (Cenário 5). Por fim, na Figura 4.34 é exibida a elevação obtida na simulação que combina os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE (Cenário 8).

Com base na análise dos gráficos apresentados nas Figuras 4.32 a 4.34, pode-se observar que, assim como ocorreu anteriormente, nas três simulações, o rio atinge Paraoquena por volta dos 18.000 s, (aproximadamente, 5 horas) de simulação, marcando o início do aumento do nível da água (profundidade e elevação), com estabilização a partir dos 28.100 s (aproximadamente, 8 horas).

Para a Ponte do Nando, a chegada da água ocorre a partir dos 24.900 s de simulação, com estabilização ao redor dos 41.100 s (aproximadamente, 11 horas e meia). No entanto, há uma exceção no Cenário 5, onde o tempo de estabilização é significativamente maior, atingindo 52.500 s (aproximadamente, 14 horas e meia).

Por fim, para os pontos localizados no centro de Pádua e na rodoviária, a chegada da água ocorre aos 28.500 s (aproximadamente, 8 horas), com estabilização a partir dos 45.600 s (aproximadamente, 12 horas e meia).

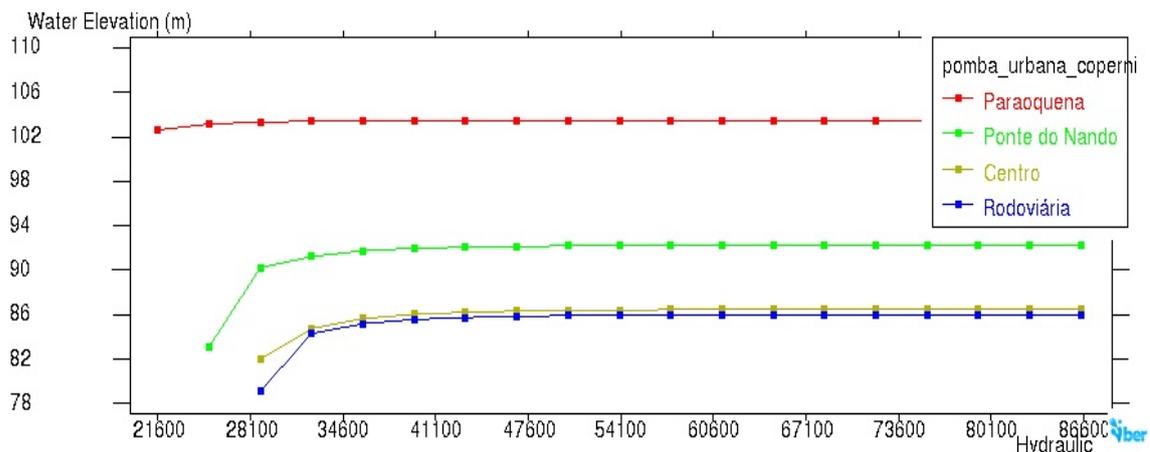


Figura 4.32: Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 com elevação das edificações e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

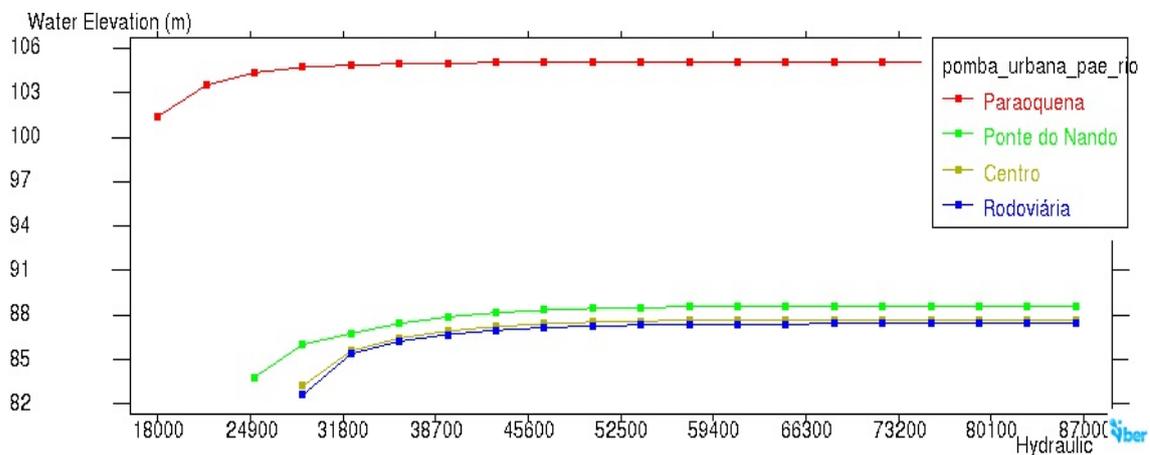


Figura 4.33: Elevação da lâmina d'água utilizando o MDE PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

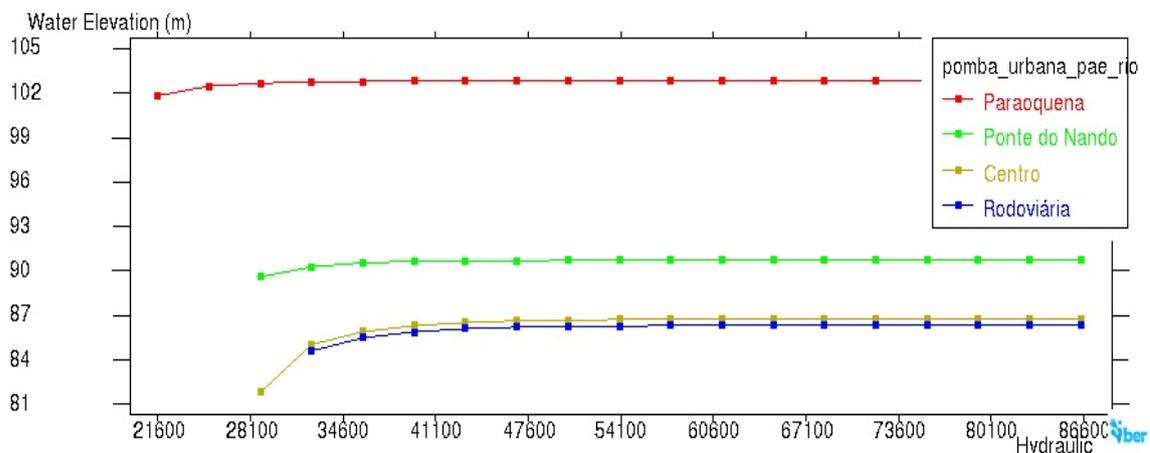


Figura 4.34: Elevação da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com elevação das edificações e superfícies contínuas.

Fonte: O Autor (2024).

No terceiro e último conjunto de simulações analisadas, foram adotados, como base para a topografia, os MDEs contendo apenas o rebaixamento na calha do Rio Pomba, porém, utilizando as superfícies em que houve subtração das áreas com edificações no município. São as simulações identificadas pelos Cenários 3, 6 e 9 na Tabela 4.1. A simulação do Cenário 3, demandou oito dias de processamento e, as simulações dos Cenários 6 e 9, apesar de terem alcançado a estabilidade, não concluíram o tempo total de processamento (84.600 s), ultrapassando nove dias de simulação. Na Figura 4.35 é mostrada a profundidade da lâmina de água nos pontos observados durante a simulação utilizando o MDE Copernicus GLO-30 (Cenário 3). Já na Figura 4.36, é exibida a profundidade da lâmina de água na simulação com o MDE PAE (Cenário 6). E, na Figura 4.37, é apresentada a profundidade obtida na simulação que combina os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE (Cenário 9).

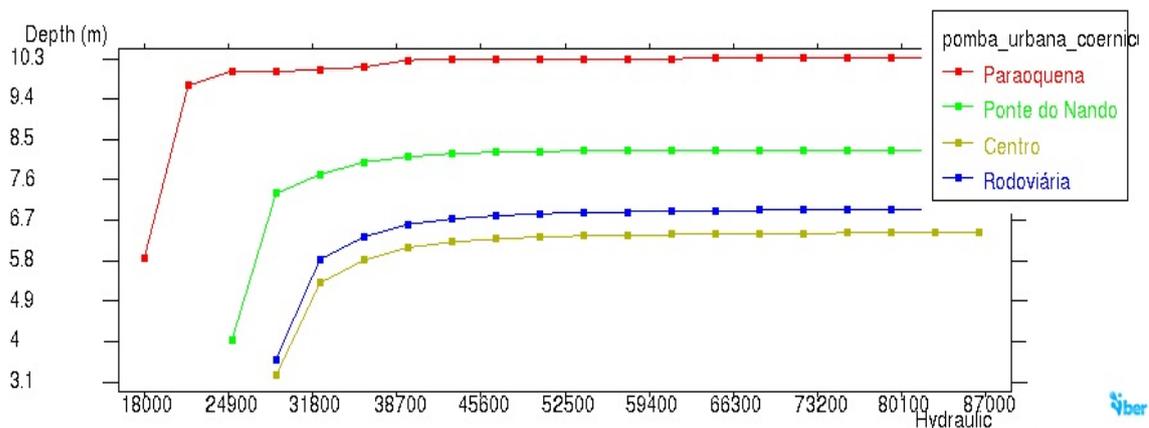


Figura 4.35: Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contendo anéis.

Fonte: O Autor (2024).

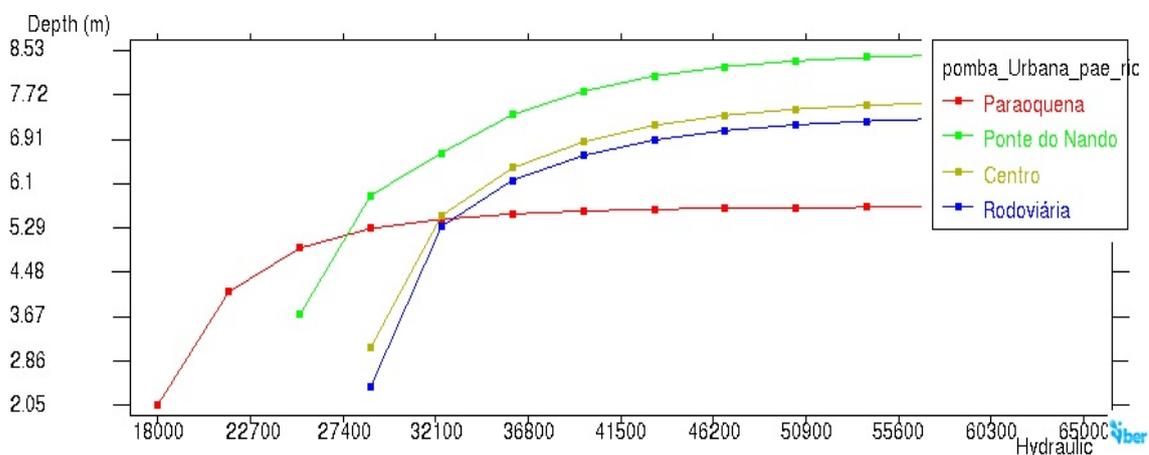


Figura 4.36: Profundidade da lâmina d'água utilizando o MDE PAE e superfícies contendo anéis.

Fonte: O Autor (2024).

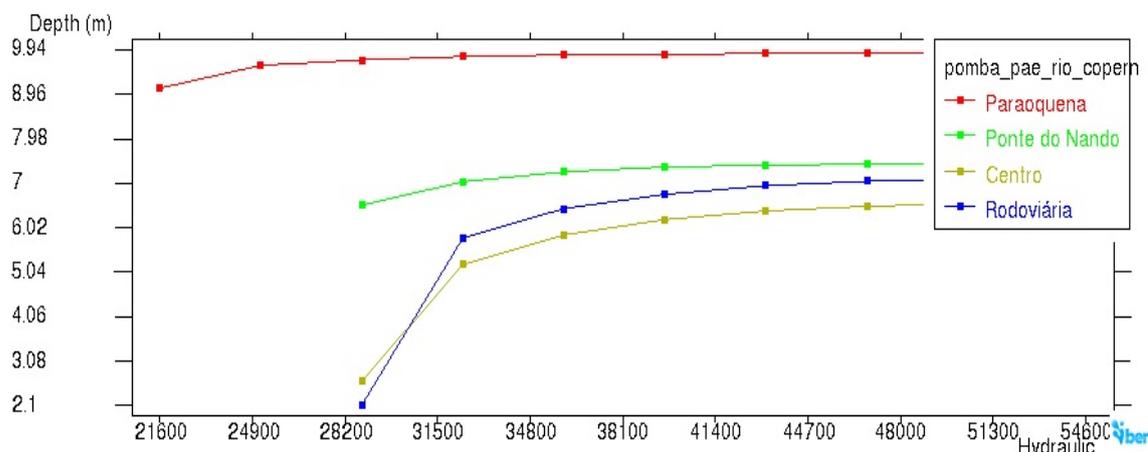


Figura 4.37: Profundidade da lâmina d'água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com superfícies contendo anéis.

Fonte: O Autor (2024).

Finalizando, na Figura 4.38 é mostrada a elevação da água nos pontos observados durante a simulação utilizando o MDE Copernicus GLO-30 (Cenário 3). Na Figura 4.39 é apresentada a elevação da água na simulação com o MDE PAE (Cenário 4). E, na Figura 4.40 é exibida a elevação obtida na simulação que combina os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE (Cenário 9).

Ao analisar este conjunto de gráficos, nota-se que, nas simulações realizadas, a água do rio começa a chegar em Paraoquena por volta dos 18.000 s (aproximadamente, 5 horas), indicando o início do aumento no nível da água, tanto em profundidade quanto em elevação. O nível se estabiliza por volta dos 24.900 s (aproximadamente, 7 horas). Já na Ponte do Nando, a água do rio começa a chegar a partir dos 24.900 s, com estabilização ocorrendo por volta dos 38.700 s (cerca de 11 horas). Por outro lado, os pontos no centro de Pádua e na rodoviária, mostram tempos de chegada de água em torno de 28.500 s (aproximadamente 8 horas). A estabilização nesses locais ocorre por volta dos 45.600 s (aproximadamente, 12 horas e meia).

As simulações realizadas apresentam boas correlações com o comportamento esperado do Rio Pomba para a região estudada. No entanto, nota-se que as simulações dos Cenários 5 e 9 são as simulações que mais aproximam-se da realidade, mostrando o comportamento e espalhamento da água entre as ruas do município de Santo Antônio de Pádua. Porém a simulação do Cenário 9 apresentou um tempo muito alto em seu processamento, superior a 10 dias e, ainda assim, não completou todo o período estipulado, que compreende 86.400 s (24 horas). Deste modo, o Cenário 5 foi escolhido como base para a validação deste estudo, utilizando os dados de vazão reais registrados pelas estações da Rede Hidrometeorológica como condições de contorno, as quais são apresentadas na próxima seção.

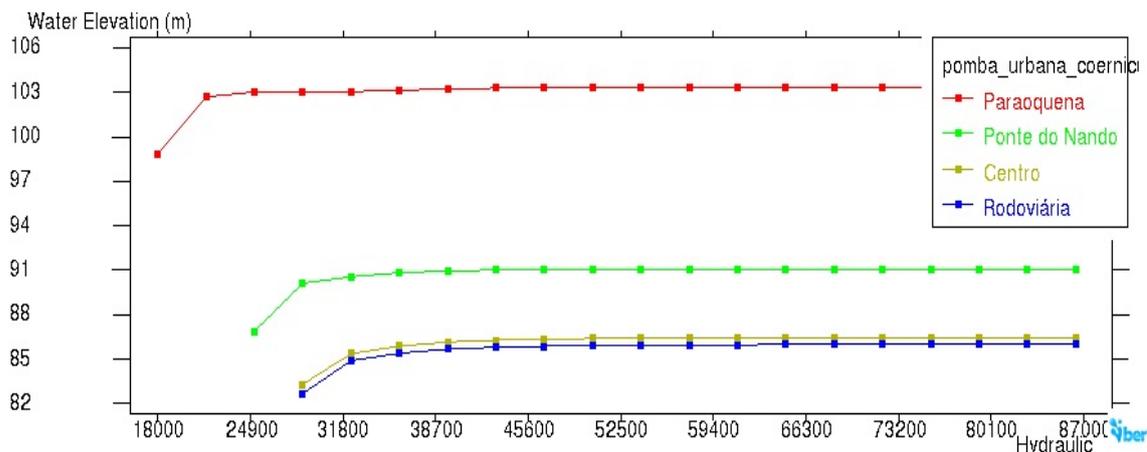


Figura 4.38: Elevação da lâmina d’água utilizando o MDE Copernicus GLO-30 e superfícies contendo anéis.

Fonte: O Autor (2024).

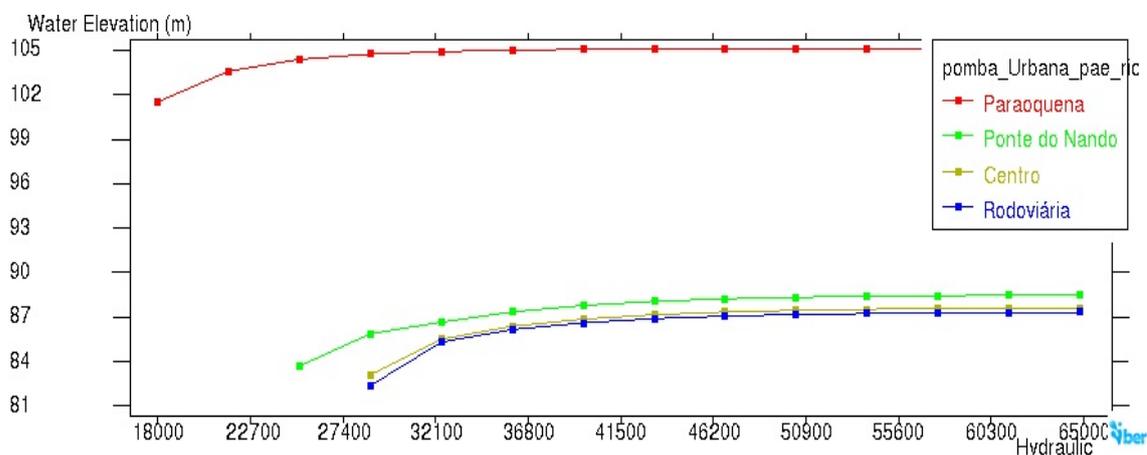


Figura 4.39: Elevação da lâmina d’água utilizando o MDE PAE e superfícies contendo anéis.

Fonte: O Autor (2024).

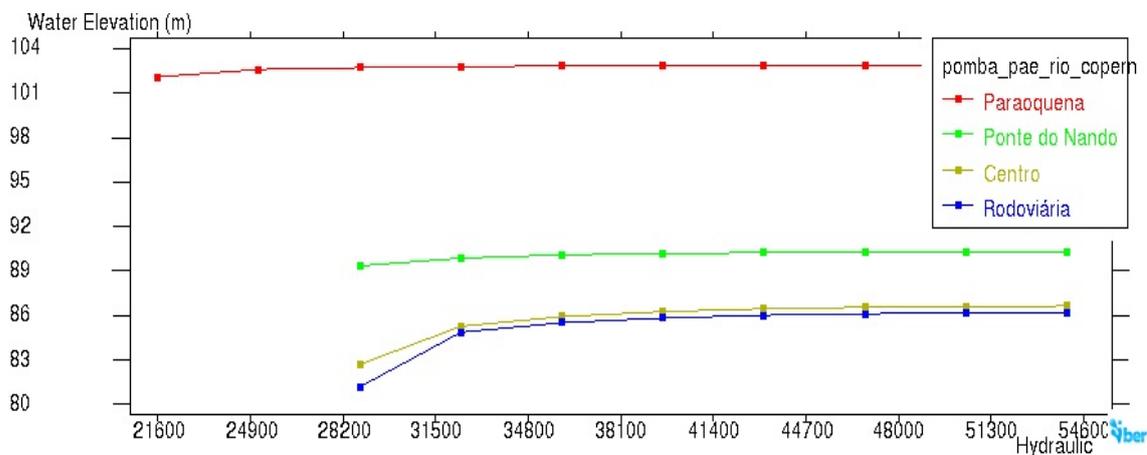


Figura 4.40: Elevação da lâmina d’água utilizando os MDEs Copernicus GLO-30 e PAE com superfícies contendo anéis.

Fonte: O Autor (2024).

### 4.3 Validação das Simulações para Eventos de Inundações em Santo Antônio de Pádua

Após realização das simulações dos cenários apresentadas na Seção 4.2, a configuração do Cenário 5, que se utiliza o modelo digital de elevação gerado a partir dos dados topográficos disponibilizados pelo PAE (Prefeitura de Pádua), foi selecionada para realizar a simulação referente aos últimos eventos de inundações ocorridos no município de Santo Antônio de Pádua.

Para isso, foram utilizados dados de vazão obtidos junto ao Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) gerenciado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), para a vazão da UHE Barra do Braúna, tendo como referência três períodos de inundações distintos em Santo Antônio de Pádua, sendo estes ocorridos em Janeiro de 2022 e dois eventos em Janeiro de 2023, cujos resultados são apresentados nas Seções 4.3.1 a 4.3.3.

Como comparação dos resultados obtidos nas simulações, foram observadas as séries temporais das estações da Rede Hidrometeorológica de medição do nível d'água do Rio Pomba, cuja as localizações são mostradas na Figura 4.41 e, na Tabela 4.3, são apresentadas as respectivas coordenadas.

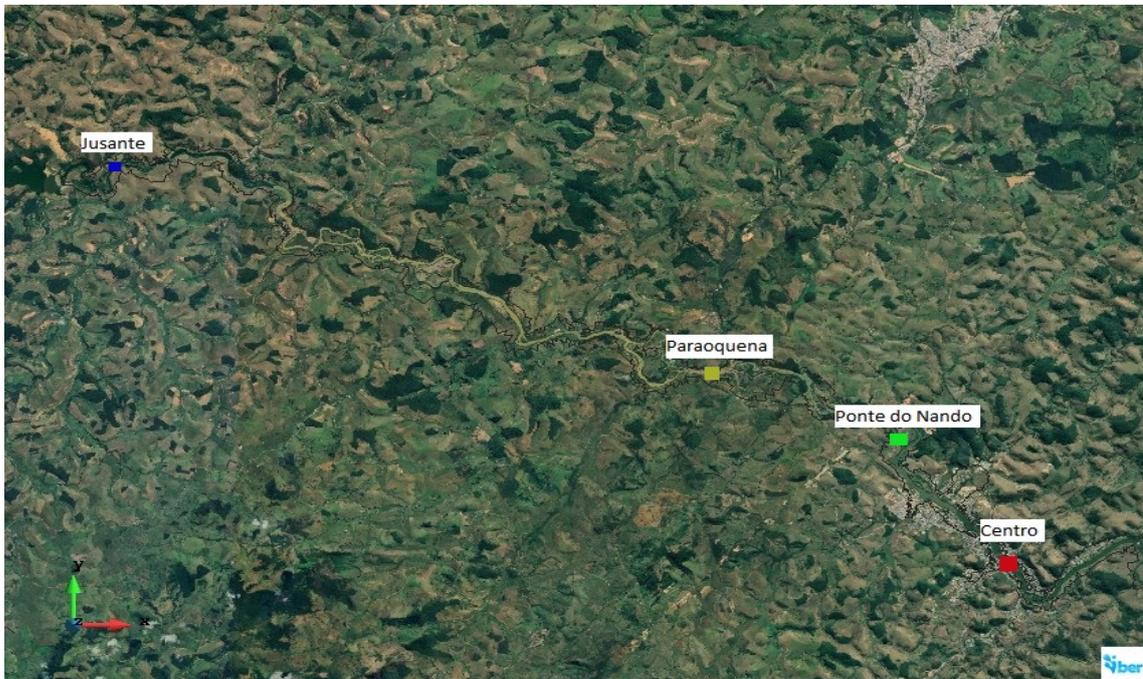


Figura 4.41: Localização das estações hidrometeorológicas no trecho de interesse.

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 4.3: Coordenadas X e Y das estações hidrometeorológicas.

X	Y	Localização
770383	7626370	Jusante
784833	7620560	Paraoquena
789282	7618870	Ponte do Nando
791988	7615220	Centro

Fonte: O Autor (2024).

Nesses pontos em questão, foram gerados gráficos, para efeito comparativo, mostrando a profundidade do Rio Pomba obtida nas simulações, com as medições das estações hidrometeorológicas, denominadas de Jusante, Paraoquena, Ponte do Nando e Centro. Destaca-se que as estações Jusante e Centro são de responsabilidade da ANA e as estações Paraoquena e Ponte do Nando pertencem ao INEA.

O software IBER permite a modificação de uma malha utilizada anteriormente em alguma simulação para que haja a possibilidade de se realizar diferentes simulações para uma mesma região, considerando apenas os elementos que, em algum momento, tiveram água, ou seja, o software permite que sejam removidos do projeto os elementos que não ficaram submersos na primeira simulação. Desta forma, as novas simulações ocorrem em menor tempo. É importante ressaltar que, geralmente é necessário que a segunda simulação possua valores de vazão menores do que a primeira simulação.

Após a realização de uma simulação, o software irá armazenar um arquivo com a extensão *\*.bch* que contém a lista dos elementos secos presentes nessa simulação, o qual poderá ser carregado para o projeto. Para realizar o procedimento no software, deve-se acessar “*Arquivo => importar => arquivo de comando*” e buscar o arquivo “*delete\_dry\_elements.bch*”, que se encontra na pasta do projeto.

Na Figura 4.42 é mostrada a remoção dos elementos secos da simulação do Cenário 5. Após a remoção destes elementos, a malha apresentou uma redução no número de elementos triangulares de 416.402 para 125.620 e no número de vértices de 208.377 para 68.202. Modificada a malha, deve-se inserir as condições de contorno de entrada e saída, que é realizado por meio do comando “*dados => hidroninâmica => condições de contorno*”, procedimento que possibilita informar as vazões de entrada para simulação dos eventos de inundações de interesse, conforme descrito nas respectivas seções a seguir.



Figura 4.42: Remoção dos elementos secos da simulação referente ao Cenário 5.  
Fonte: O Autor (2024).

### 4.3.1 Simulação do Evento de Inundação de Janeiro de 2022

Nesta simulação, foram utilizados dados de vazão obtidos da UHE Barra do Braúna, compreendidos no período entre os dias 06 e 18 Janeiro de 2022, o qual corresponde a um evento de inundação que ocasionou danos à cidade de Santo Antônio de Pádua. As condições de contorno de entrada foram definidas conforme ilustrado na Figura 4.43, na qual nota-se o pico de vazão em  $957 \text{ m}^3/\text{s}$  no dia 10 de Janeiro.

Data	Tempo (s)	Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
"Aquecimento"	0	180
"Aquecimento"	86400	180
06/jan	172800	180
07/jan	259200	188
08/jan	345600	466
09/jan	432000	699
10/jan	518400	957
11/jan	604800	927
12/jan	691200	780
13/jan	777600	619
14/jan	864000	382
15/jan	950400	276
16/jan	1036800	244
17/jan	1123200	228
18/jan	1209600	216

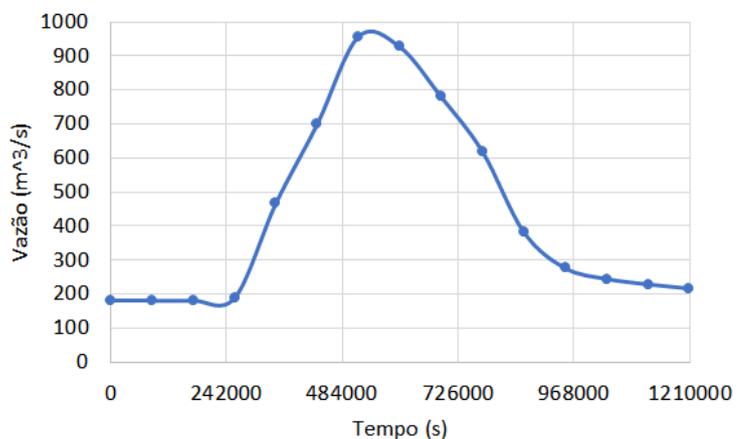


Figura 4.43: Definição das condições de contorno de entrada, Janeiro de 2022.  
Fonte: O Autor (2024).

Para a simulação do período em questão, o software IBER foi configurado com tempo inicial de 0 s e tempo máximo de 1.209.600 s, o que totalizam 15 dias de simulação, com passo de tempo de 3.600 s (1 hora). A vazão referente ao dia 06 de Janeiro, 180 m<sup>3</sup>/s, foi utilizada como um "período de aquecimento", sendo repetida por um período de 172.800 s (2 dias), preenchendo, desta forma, parcialmente o canal do rio. As demais definições foram mantidas, conforme elencadas na Seção 4.1.

Realizados os ajustes necessários, pode-se executar a nova simulação para a obtenção dos dados. O tempo necessário neste processamento foi de três dias e observa-se que a redução do número de elementos foi de suma importância para a redução do tempo de processamento.

Na Figura 4.44 é mostrado o resultado obtido após a finalização da simulação, onde é exibido o mapa de máximo para toda a região de interesse, no tempo de 1.209.600 s e, na Figura 4.45, é ilustrado o mapa de máximo com enfoque na cidade de Santo Antônio de Pádua.

Além disso, para comparação entre os dados medidos nas estações hidrometeorológicas e o resultado gerado pela simulação, foram plotados gráficos de "profundidade (m) × tempo (s)" nas mesmas localizações das estações, conforme Figuras 4.46 a 4.49.

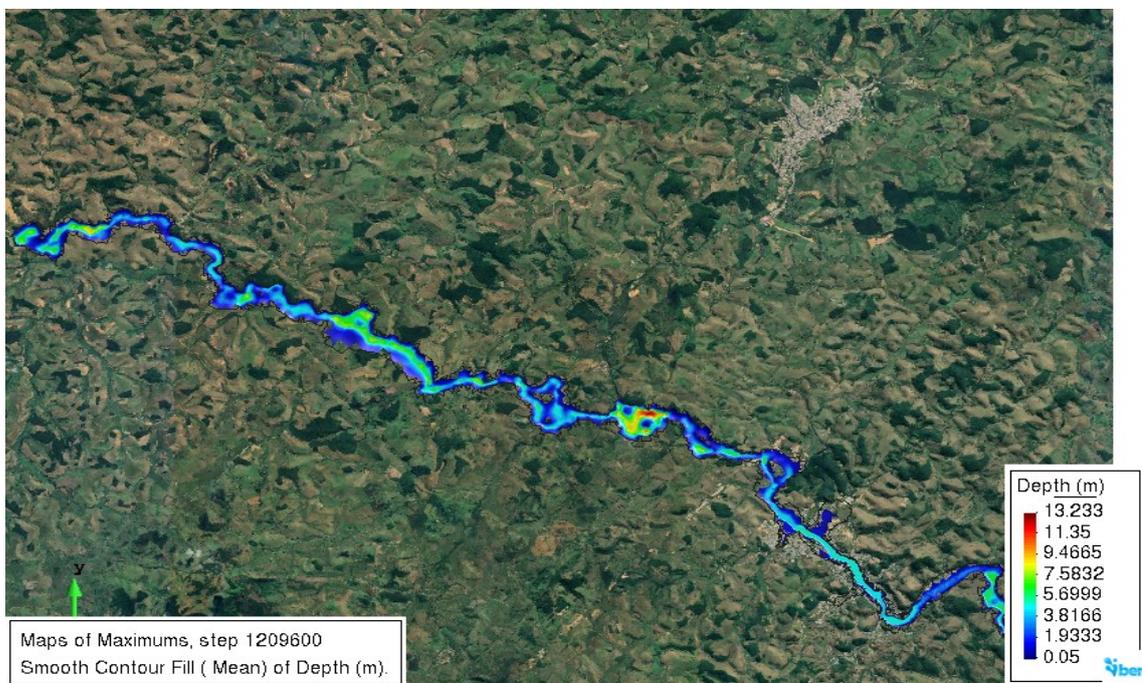


Figura 4.44: Mapa de máximos de toda a região de interesse, em 1.209.600 s.

Fonte: O Autor (2024).

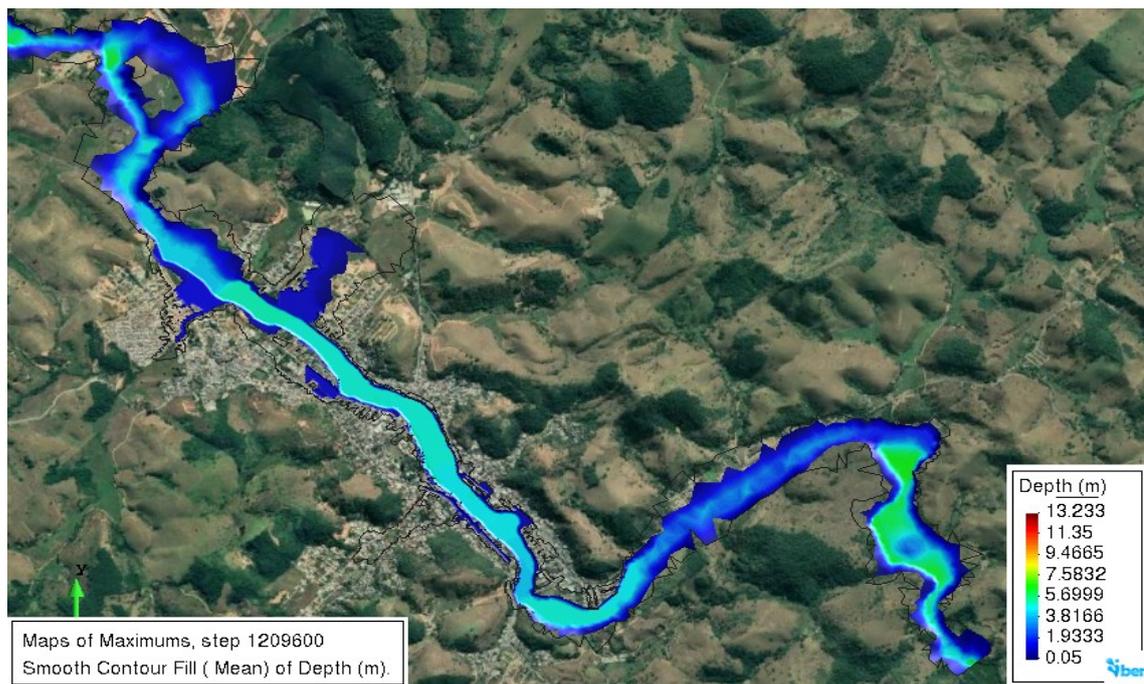


Figura 4.45: Mapa de máximos da cidade de Santo Antônio de Pádua, em 1.209.600 s.  
Fonte: O Autor (2024).

No que se refere à região localizada à jusante da barragem, mostrada na Figura 4.46, observa-se que o nível do rio medido na estação inicialmente, encontra-se em 2 m e na simulação inicia-se com 2,21 m. As curvas possuem comportamento muito próximo, com a subida iniciada em 147.600 s na estação e um poucos antes na simulação, em 122.400 s. Nota-se que o nível máximo medido pela estação foi de 5,28 m em 428.400 s, o que corresponde às 23:00 horas do dia 10/01/2022, e o nível máximo simulado foi de 5,61 m obtido em 374.400 s. Porém, na simulação, o nível do rio apresenta uma redução mais lenta após o pico de inundação quando comparado aos dados na medição da estação hidrometeorológica.

Para o distrito de Santo Antônio de Pádua, Paraoquena, no gráfico de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)", mostrado na Figura 4.47, é possível observar que o comportamento durante a subida do nível do rio é similar, tanto na estação quanto na simulação. O maior valor registrado na estação em Paraoquena foi 5,65 m, encontrado no tempo de 441.000 s, referente às 02:30 h do dia 11/01/2022, já o maior valor obtido na simulação foi de 5,34 m, observado no tempo de 392.400 s. Porém, a estação localizada em Paraoquena apresentou erros em sua medição a partir das 11:45 h do dia 11/01/2022, não tendo mais registrado o nível do rio, o que corresponde ao tempo de simulação de 377.100 s. Apesar disso, observa-se uma boa correlação entre os dados.

Importante mencionar que, para esta localidade a cota de transbordo informada pelo

site do INEA é 3,85 m, que foi alcançada no tempo de simulação de 90.000 s e registrada pela estação em 215.100 s, correspondendo às 11:45 h do dia 08/01/2022.

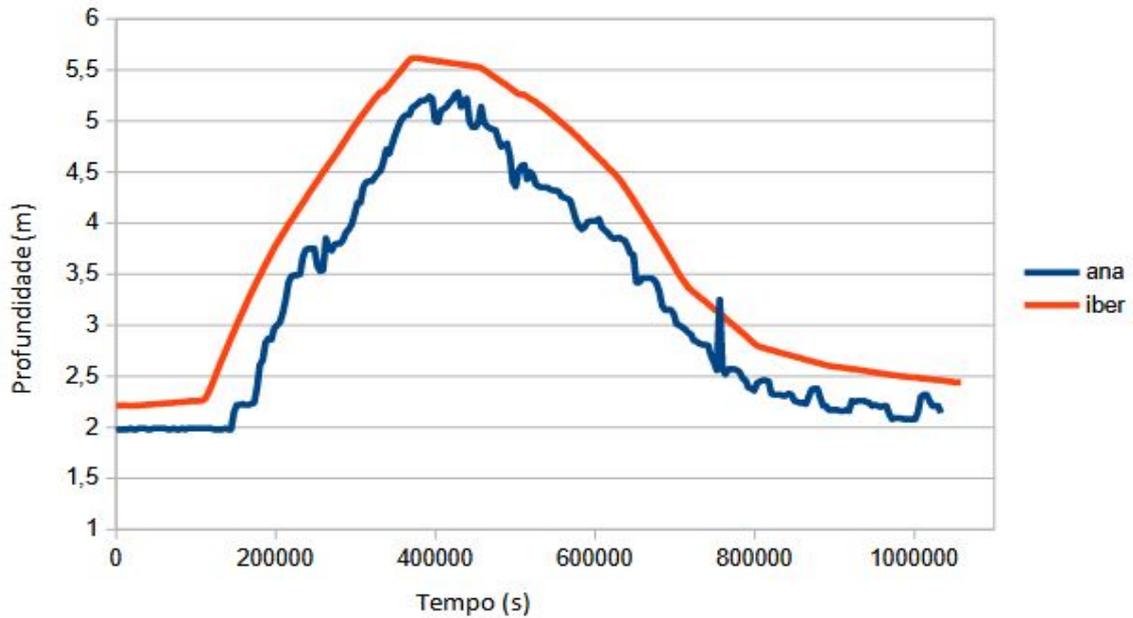


Figura 4.46: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Jusante, em Janeiro de 2022.

Fonte: O Autor (2024).

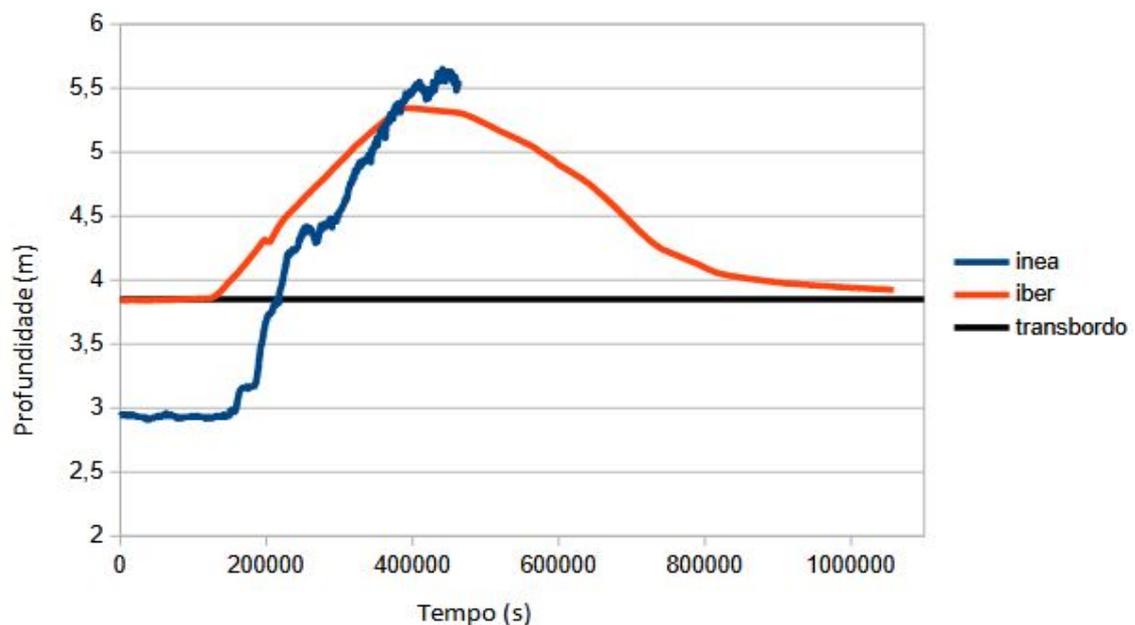


Figura 4.47: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Paraoquena, em Janeiro de 2022.

Fonte: O Autor (2024).

No gráfico de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)", obtido para a Ponte do Nando e apresentado na Figura 4.48, percebe-se um perfil parecido entre o nível do rio registrado pela respectiva estação e a simulação realizada, no que tange aos momentos de subida, nível máximo e descida do rio.

Neste ponto analisado, o nível máximo do rio obtido na simulação foi de 5,97 m, observado no tempo de 396.000 s, enquanto o registrado na estação foi de 6,45 m, no tempo de 447.300 s, o que corresponde às 04:15 h do dia 11/01/2022, mostrando uma diferença de 0,57 m. Para esta estação, a cota de transbordo informada pelo site do INEA é 5 m, registrada pela estação às 12:45 h do dia 09/01/2022, o que corresponde ao tempo de 305.100 s, cota essa, obtida em 248.400 s.

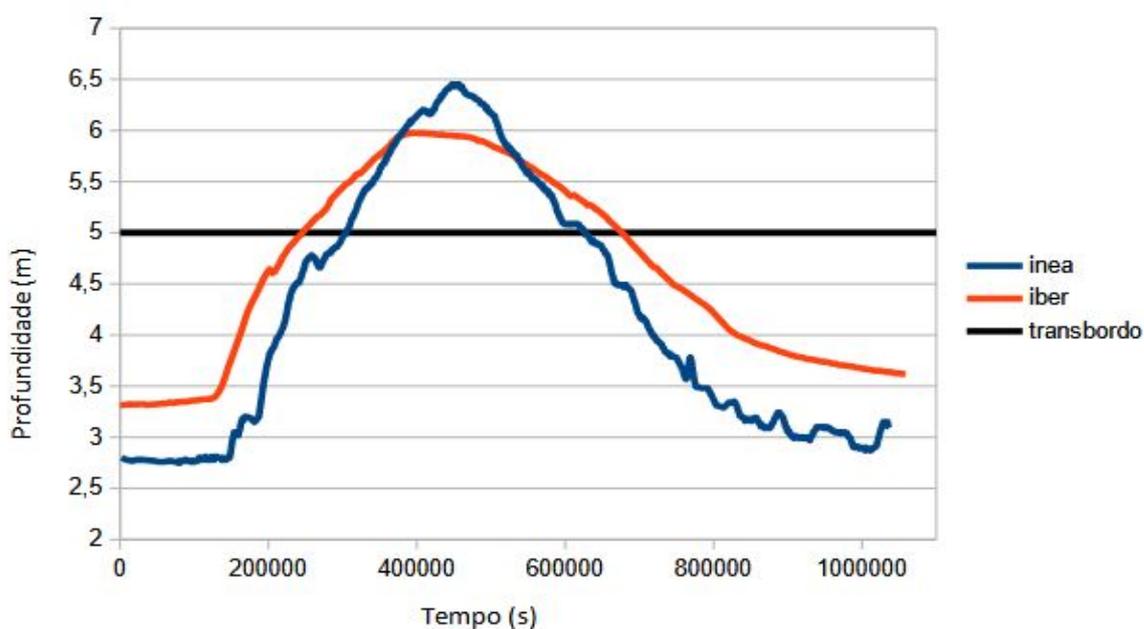


Figura 4.48: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Ponte do Nando, em Janeiro de 2022.

Fonte: O Autor (2024).

No gráfico de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)" gerado para o centro da cidade de Santo Antônio de Pádua e mostrado na Figura 4.49, verifica-se boa correlação entre os dados simulados e registrados pela estação hidrometeorológica, porém, os valores obtidos em simulação são um pouco superiores, como é observado nos níveis máximos, sendo de 4,23 m registrado pela estação e o nível de 4,62 m obtido pela simulação. Em relação ao tempo para alcançar o nível máximo do rio, nota-se que na simulação foi um pouco mais rápido, sendo 403.200 s na simulação e 457.200 s para a estação, que corresponde às 07:00 h do dia 11/01/2022.

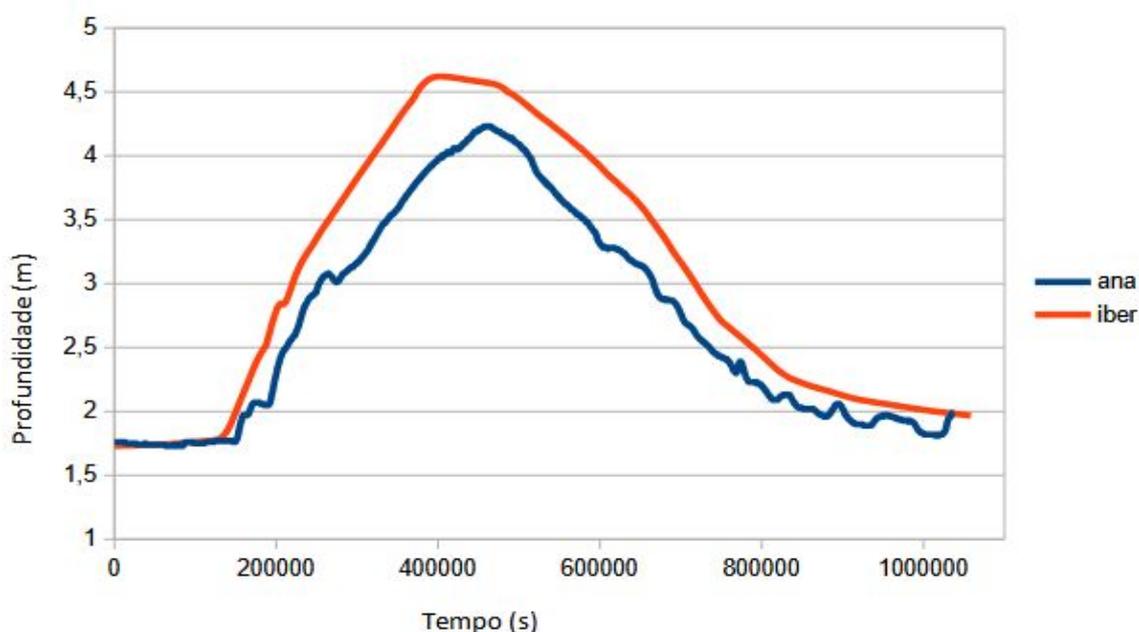


Figura 4.49: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos na estação hidrometeorológica e a simulação - Centro, em Janeiro de 2022.

Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 4.4 é feito o resumo dos resultados obtidos nos quatro pontos analisados. Nota-se que a diferença nos níveis máximos, variou de 0,31 m a 0,48 m, sendo a maior diferença observada na Ponte do Nando, onde a simulação apresentou um nível máximo de 0,48 m inferior ao medido pela estação.

Em relação ao tempo necessário para atingir o nível máximo, as simulações tendem a prever o pico de inundação mais rapidamente do que o observado nas medições. As diferenças variaram de 48.600 s a 54.000 s, com as simulações atingindo o nível máximo até 15 horas antes, caso observado na estação Jusante.

Tabela 4.4: Comparação de nível máximo e cota de transbordo - Janeiro de 2022.

Localização da Estação	Parâmetro Analisado	Valor Medido (m)	Tempo Medido (s)	Valor Simulado (m)	Tempo Simulado (s)	Diferença de Nível (m)	Diferença de Tempo (s)
Jusante	Nível máximo	5,28 m	428.400	5,61 m	374.400	0,33 m	54.000
Paraoquena	Nível máximo	5,65 m	441.000	5,34 m	392.400	0,31 m	48.600
	Cota de transbordo	3,85 m	215.100	3,85 m	90.000	0,00 m	125.100
Ponte do Nando	Nível máximo	6,45 m	447.300	5,97 m	396.000	0,48 m	51.300
	Cota de transbordo	5,00 m	305.100	5,00 m	248.400	0,00 m	56.700
Centro	Nível máximo	4,23 m	457.200	4,62 m	403.200	0,39 m	54.000

Fonte: Autor (2024).

### 4.3.2 Simulação do Primeiro Evento de Inundação de Janeiro de 2023

Para esta simulação, os dados de vazão da UHE Barra do Braúna utilizados como condições de contorno compreendem o período entre os dias 05 e 16 de Janeiro de 2023, nesta ocasião, foram registrados diversos pontos de inundação no município de Santo Antônio de Pádua. Essas condições de contorno de entrada foram definidas conforme ilustrado na Figura 4.50. Neste período observa-se dois picos de vazão, sendo o maior,  $995 \text{ m}^3/\text{s}$ , registrado no dia 08 de Janeiro e, o segundo,  $919 \text{ m}^3/\text{s}$ , no dia 12 de Janeiro.

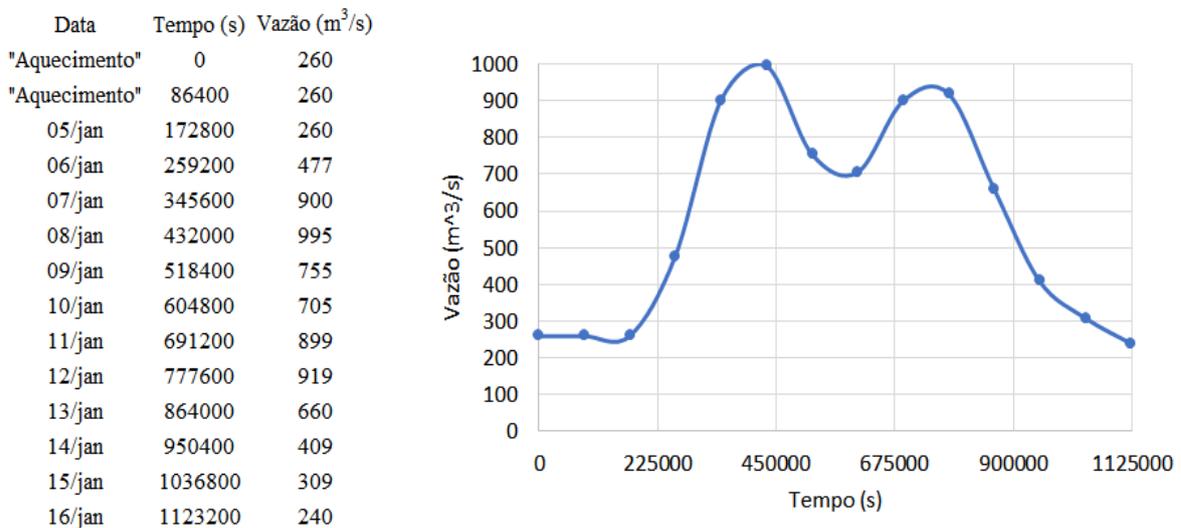


Figura 4.50: Definição das condições de contorno de entrada, 05 a 16 de Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Nesta simulação, o software IBER foi configurado com tempo inicial de 0 s e tempo máximo de 1.123.200 s, totalizando 14 dias de simulação, com passo de tempo de 3.600 s (1 hora). A vazão referente ao dia 05 de Janeiro,  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ , foi utilizada como um "período de aquecimento", sendo repetida por um período de 172.800 s (2 dias), de forma a preencher o leito do rio com o fluxo base, antes da onda de cheia. As demais definições foram mantidas de acordo com o apresentado na Seção 4.1.

Após realizados os ajustes necessários e definição das configurações, executa-se a nova simulação para obtenção dos resultados. Para esta simulação, foram necessários quatro dias de processamento, confirmando que a redução no número de elementos a serem considerados ajuda na redução do tempo da simulação.

Realizado o processamento, os resultados podem ser visualizados na tela de pós-processamento. Na Figura 4.51 é exibido o mapa de máximo para toda a região de interesse, obtido no tempo de simulação de 1.123.200 s. Já na Figura 4.52 é ilustrado o

mapa de máximo, no mesmo tempo, com destaque para a cidade de Santo Antônio de Pádua.

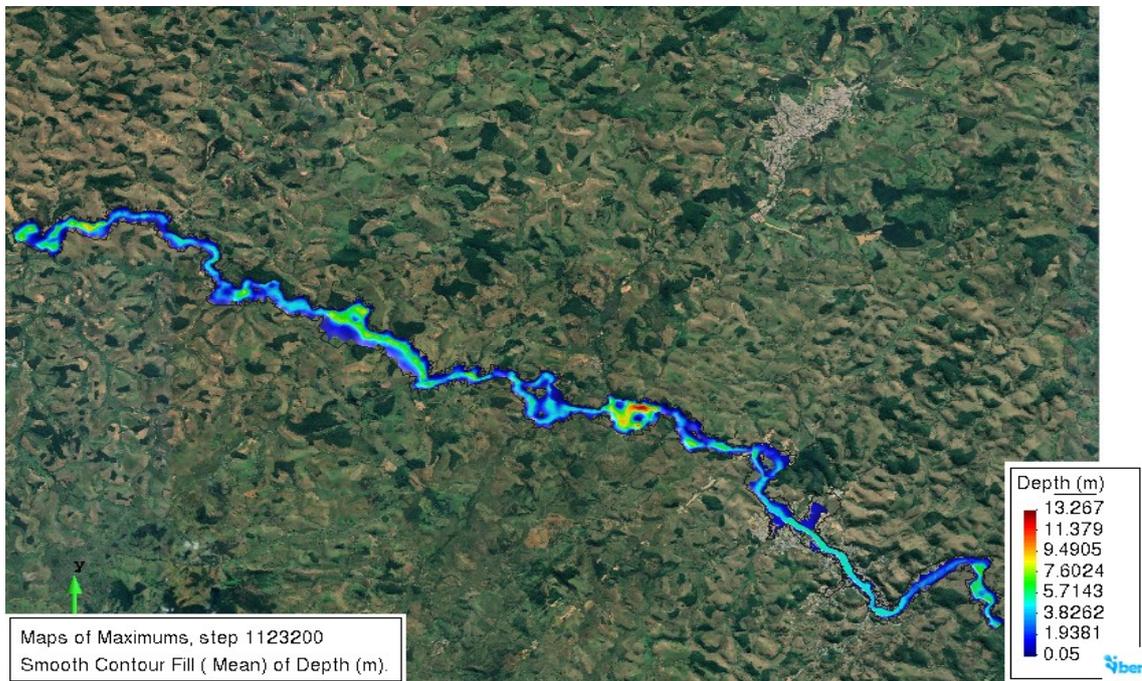


Figura 4.51: Mapa de máximos de toda a região de interesse, em 1.123.200 s.  
Fonte: O Autor (2024).

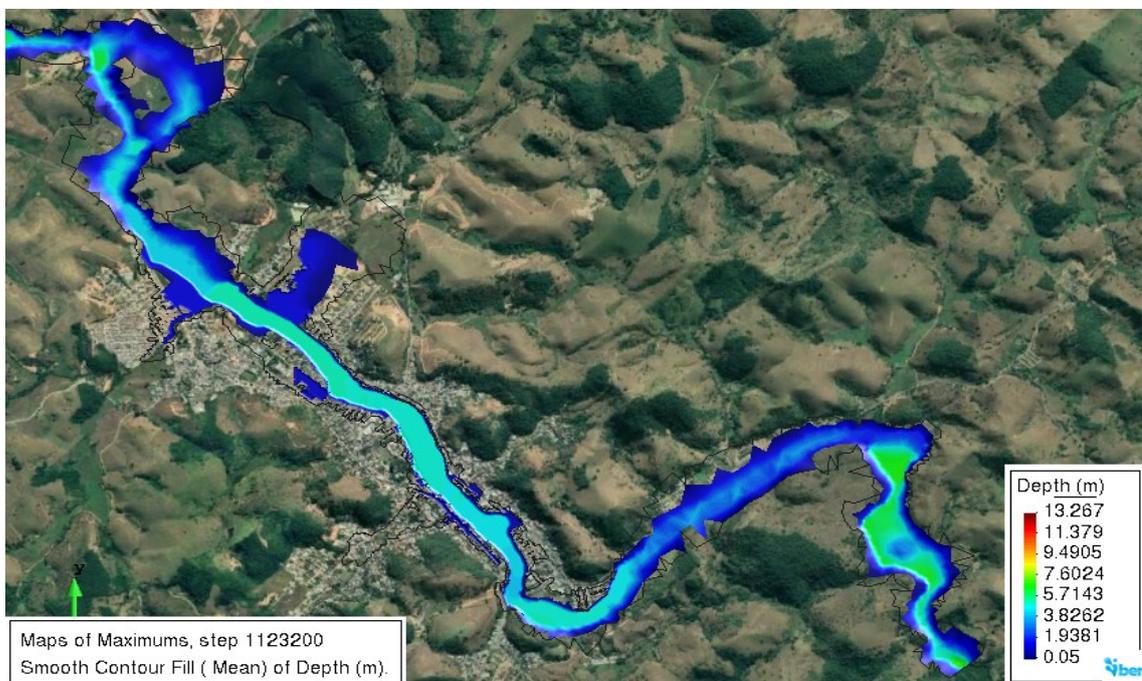


Figura 4.52: Mapa de máximos da cidade de Santo Antônio de Pádua, em 1.123.200 s.  
Fonte: O Autor (2024).

Nesta simulação, foram utilizadas as estações hidrometeorológicas exibidas na Figura

4.41 e gerados gráficos de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)" para efeito comparativo com os dados obtidos pela simulação.

Para a estação localizada à jusante da barragem, exibida na Figura 4.53, observa-se que houve algum erro de medição para o período considerado, uma vez que não houve variação no nível do rio medido, mantendo-se estável em 1,80 m, enquanto os dados da simulação mostram uma variação no nível do rio, havendo dois picos principais de nível máximo atingido, conforme também verifica-se nos dados de vazão de entrada (vazão na UHE Barra do Braúna) ilustrados pela Figura 4.50. Para a referida localidade, o maior nível encontrado na simulação foi 5,72 m ocorrido em 259.200 s, sendo este o primeiro pico observado no gráfico, posteriormente, o nível abaixou 0,92 m, sendo registrado o nível em 4,80 m no tempo de 432.000 s, voltando a subir até 5,50 m num segundo momento, observado em 604.800 s.

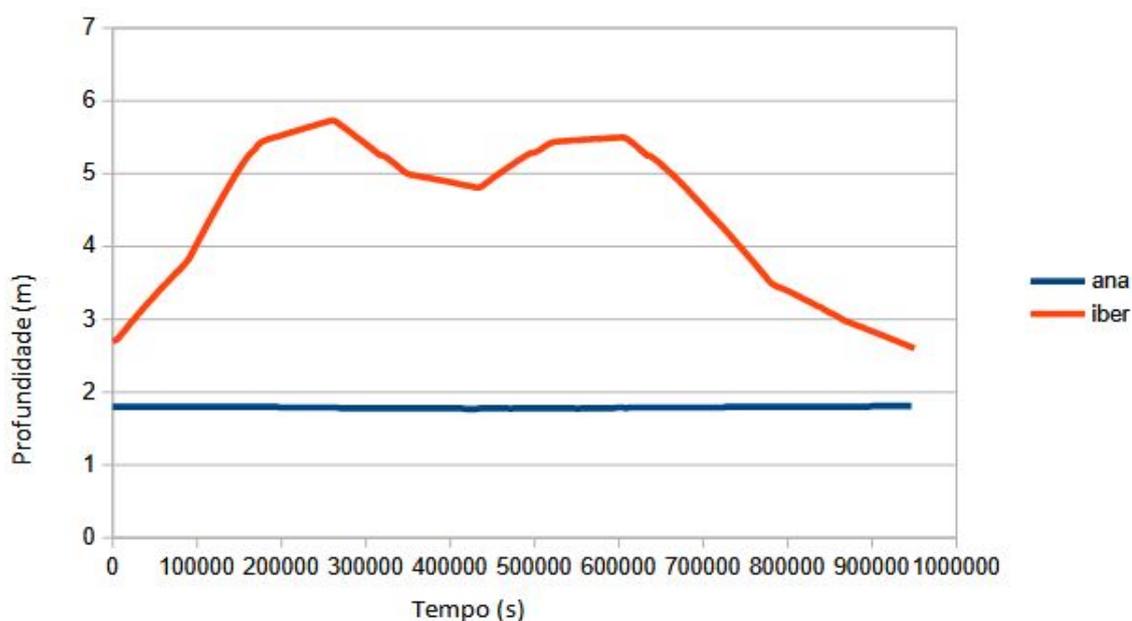


Figura 4.53: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Jusante, em Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

O gráfico de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)" para o distrito de Paraoquena, ilustrado na Figura 4.54, apresenta um comportamento muito próximo entre os dados obtidos pela simulação e os níveis registrados na estação hidrometeorológica. A cota de transbordo para o distrito é de 3,85 m, a qual foi registrada em 135.900 s pela estação, correspondendo às 13:45 h do dia 06/01/2023. Destaca-se que o valor inicial na simulação é de 3,98 m, portanto, já superior à cota de transbordo para a localidade.

Neste caso, nota-se que os maiores níveis foram obtidos pela estação, no entanto,

a diferença entre os dados é da ordem de alguns centímetros. A estação registrou o nível máximo de 5,61 m às 08:45 h do dia 08/01/2023, correspondendo ao tempo de 290.700 s e, os dados simulados, apresentaram o nível de 5,37 m, obtidos em 291.600 s da simulação. Posteriormente, o nível registrado pela estação desceu até 4,28 m às 14:30 h do dia 10/01/2023, tempo de 484.200 s, já para a simulação, a diminuição foi um pouco menor, até 4,90 m em 464.400 s. Às 07:15 h do dia 12/01/2023 a estação registrou um novo pico de elevação, chegando a 5,33 m no tempo de 630.900 s, comportamento similar ao simulado, em que o nível do rio se elevou até 5,26 m no tempo de 630.000 s.

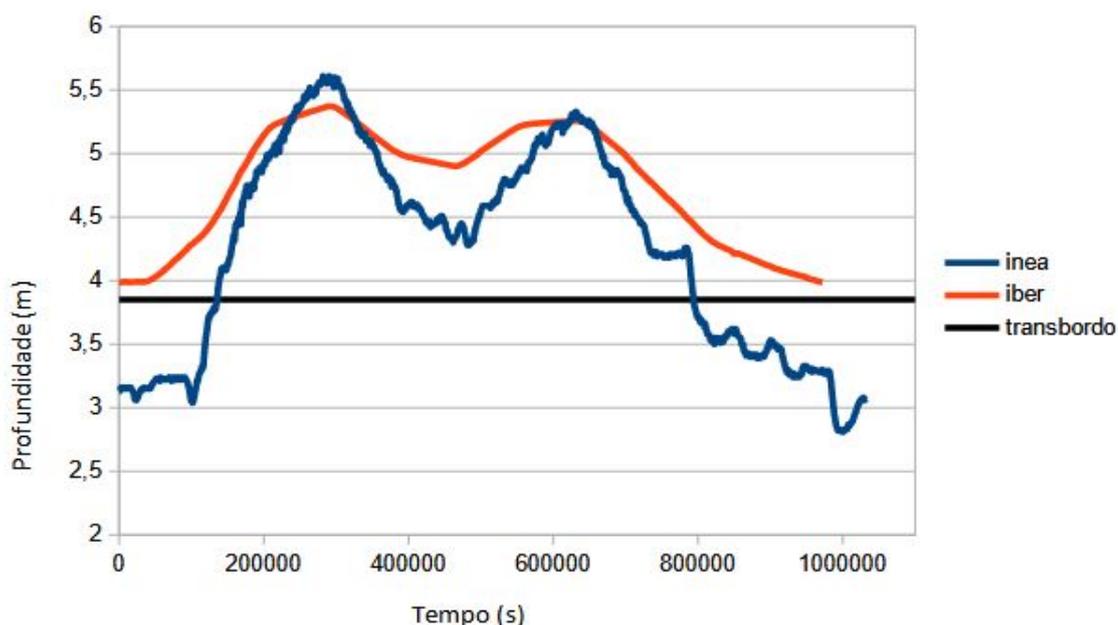


Figura 4.54: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Paraoquena, em Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Na estação denominada Ponte do Nando, o gráfico de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)" apresentado na Figura 4.55, mostra que a cota de transbordo indicada para a cidade de Santo Antônio de Pádua, 5 m, foi primeiramente observada nos dados obtidos pela simulação, o que ocorreu em 151.200 s e, posteriormente, registrada pela estação hidrometeorológica em 168.300 s, marca atingida às 22:45 h do dia 06/01/2023, nota-se que a diferença de tempo foi pequena, na ordem 17.100 s, aproximadamente, 5 horas.

Nesta estação, observa-se uma boa correlação entre as curvas presentes nos gráficos, mostrando valores próximos para os dados registrados pela respectiva estação hidrometeorológica e os dados obtidos na simulação no período considerado.

Em relação ao valor máximo marcado na estação, observa-se o nível do rio em 6,52 m, ocorrido às 10 h do dia 08/01/2023, correspondendo ao tempo de 295.200 s e, na simulação,

o valor máximo foi de 5,95 m no tempo de 291.600 s. Nível este, que foi reduzindo até às 08 h do dia 10/01/2023, registrando o valor de 4,77 m na estação, no tempo de 460.800 s, assim como na simulação, em que foi registrado o valor de 5,33 m no tempo de 468.000 s. Após esse período, o nível do rio voltou a subir, tendo sido registrado na estação o nível de 6,12 m às 07:30 h do dia 12/01/2023, no tempo de 631.800 s, esse valor foi um pouco maior que o valor obtido na simulação, sendo 5,86 m no tempo de 633.600 s. Observa-se que as diferenças entre os dados obtidos na simulação e os da estação foram pequenas, o que mostra que os valores numéricos estão bem próximos aos dados registrados pela estação do INEA nesta região.

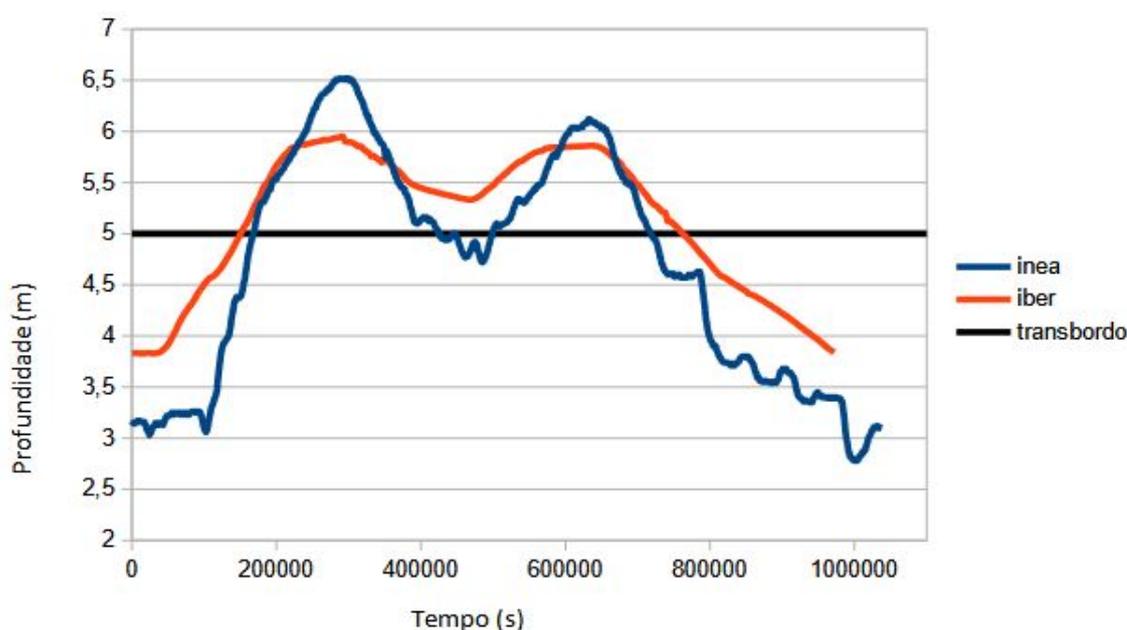


Figura 4.55: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Ponte do Nando, em Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Para a estação localizada no centro da cidade de Santo Antônio de Pádua, Figura 4.56, houve uma diferença nos valores encontrados na simulação e os registrados pela estação hidrometeorológica. Assim como o ocorrido na simulação realizada para o período de 2022, os valores de profundidade obtidos na simulação foram maiores que os registrados pela estação hidrometeorológica.

Neste ponto analisado, o valor máximo foi registrado na estação às 09:45 h do dia 08/01/2023, marcando o valor de 4,28 m, em 294.300 s e, o valor máximo atingido na simulação, foi de 4,72 m, observado no tempo de 295.200 s, mostrando uma diferença de 0,44 m entre os valores máximos. Em seguida, nota-se a redução no nível do rio, chegando ao valor de 3,07 m na estação, observado no tempo de 489.600 s, o que corresponde às

16 h do dia 10/01/2023, já a simulação encontrou um valor de 3,91 m um pouco antes, ocorrido em 471.600 s.

Como observado nas demais estações, um novo pico foi registrado, posteriormente, neste mesmo episódio de inundação, em que a estação registrou que o nível do rio subiu até 3,96 m, às 09:15 h do dia 12/01/2023, correspondendo ao tempo de 638.100 s, enquanto o valor encontrado na simulação foi de 4,53 m no tempo de 640.800 s.

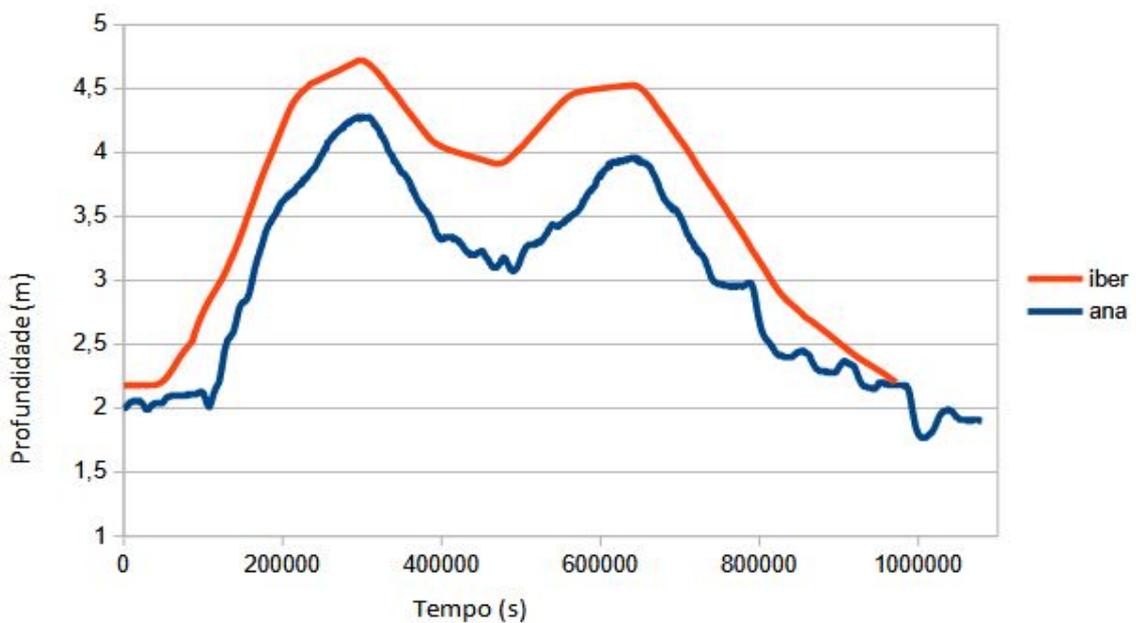


Figura 4.56: Gráfico comparativo entre os dados medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Centro, em Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 4.5, é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos quatro pontos analisados nesta simulação, ou seja, estações Jusante, Paraoquena, Ponte do Nando e Centro.

A simulação tende a subestimar os níveis máximos em algumas regiões (como Paraoquena e na Ponte do Nando) e superestimar em outras (como no Centro de Santo Antônio de Pádua), porém, as diferenças nos valores são inferiores a 0,60 m.

Em relação aos tempos, medidos e simulados, as diferenças são pequenas, indicando que a simulação é eficaz na previsão dos momentos de pico. A maior diferença de tempo observada, foi de 17.100 s, aproximadamente 5 horas, encontrada na observação da cota de transbordo para a Ponte do Nando.

Tabela 4.5: Comparação de nível máximo e cota de transbordo - primeiro evento de Janeiro de 2023.

Localização da Estação	Parâmetro Analisado	Valor Medido (m)	Tempo Medido (s)	Valor Simulado (m)	Tempo Simulado (s)	Diferença de Nível (m)	Diferença de Tempo (s)
Jusante	Nível Máximo 1	-	-	5,72	259.200	-	-
	Nível Máximo 2	-	-	5,50	604.800	-	-
Paraoquena	Nível Máximo 1	5,61	290.700	5,37	291.600	0,24	900
	Nível Máximo 2	5,33	630.900	5,26	630.000	0,07	900
	Cota de Transbordo	3,85	135.900	-	-	-	-
Ponte do Nando	Nível Máximo 1	6,52	295.200	5,95	291.600	0,57	3.600
	Nível Máximo 2	6,12	631.800	5,86	633.600	0,26	1.800
	Cota de Transbordo	5,00	168.300	5,00	151.200	0,00	17.100
Centro	Nível Máximo 1	4,28	294.300	4,72	295.200	0,44	900
	Nível Máximo 2	3,96	638.100	4,53	640.800	0,57	2.700

Fonte: Autor (2024).

### 4.3.3 Simulação de Evento de Inundação no Final de Janeiro de 2023

Nesta simulação, foram usados dados de vazão da UHE Barra do Braúna como condição de contorno de entrada compreendendo o período de 20 a 30 de Janeiro de 2023, no qual foi observado que o rio atingiu a cota de transbordo em algumas regiões do município. Na Figura 4.57 é mostrada as condições de contorno utilizadas nesta simulação. Para o período, observa-se que a vazão máxima, de  $651 \text{ m}^3/\text{s}$ , foi registrada no dia 26 de Janeiro de 2023.

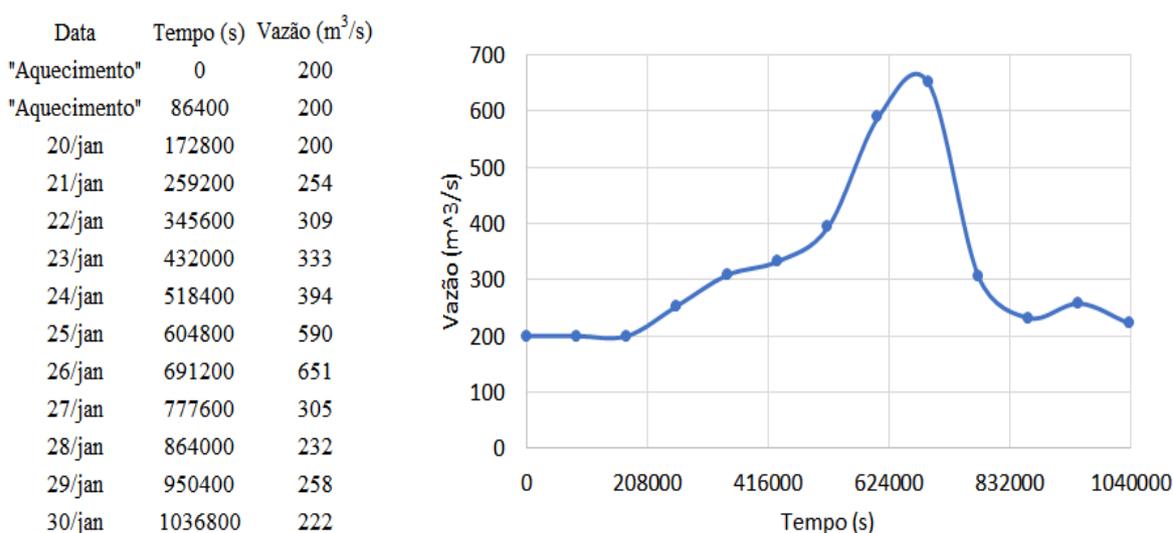


Figura 4.57: Definição das condições de contorno de entrada, 20 a 30 de Janeiro de 2023. Fonte: O Autor (2024).

O software IBER foi configurado com tempo inicial de 0 s e tempo máximo de

1.036.800 s, totalizando 13 dias de simulação, com passo de tempo de 3.600 s (1 hora), para registro dos resultados. Para o "período de aquecimento", foi utilizada a vazão de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  referente ao dia 20 de Janeiro, sendo repetida pelo período de 172.800 s (2 dias), preenchendo, assim, o canal do rio, antes da onda de cheia. As demais definições foram mantidas conforme apresentado anteriormente na Seção 4.1.

Após realizados os ajustes necessários e definição das configurações, executa-se a nova simulação e obtenção dos resultados. Para esta simulação, foram necessários três dias de processamento, confirmando, mais uma vez, que a redução no número de elementos traz uma redução do tempo de processamento.

Os resultados obtidos na simulação são exibidos na tela de pós-processamento. Na Figura 4.58 é exibido o mapa de máximo para toda a região de estudo, obtido no tempo de simulação de 1.036.800 s. Já na Figura 4.59 é ilustrado o mapa de máximo com destaque para a cidade de Santo Antônio de Pádua, para o mesmo tempo de simulação.

Ademais, do mesmo modo que ocorreu com as simulações apresentadas anteriormente, novamente, foram gerados os gráficos de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)" para efeito comparativo entre os dados obtidos pela simulação e os dados registrados pelas estações hidrometeorológicas, exibidas na Figura 4.41, para o período considerado.

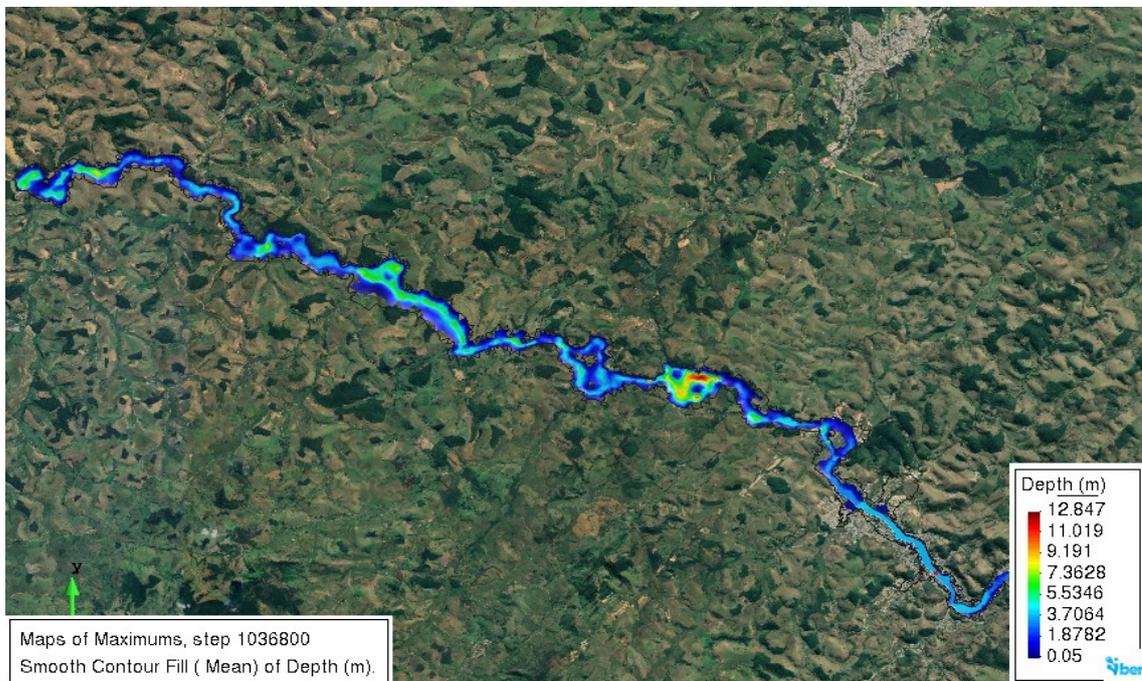


Figura 4.58: Mapa de máximos de toda a região de interesse, em 1.036.800 s.

Fonte: O Autor (2024).



Figura 4.59: Mapa de máximos da cidade de Santo Antônio de Pádua, em 1.036.800 s.  
Fonte: O Autor (2024).

O gráfico de "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)" apresentado na Figura 4.60 refere-se a estação Jusante, local em que, assim como no período anterior de Janeiro de 2023, apresentou problemas de medição, de modo que o nível do rio se manteve estável em 1,80 m de profundidade. Já os dados simulados trouxeram uma profundidade máxima de 4,56 m no tempo de simulação de 540.000 s.

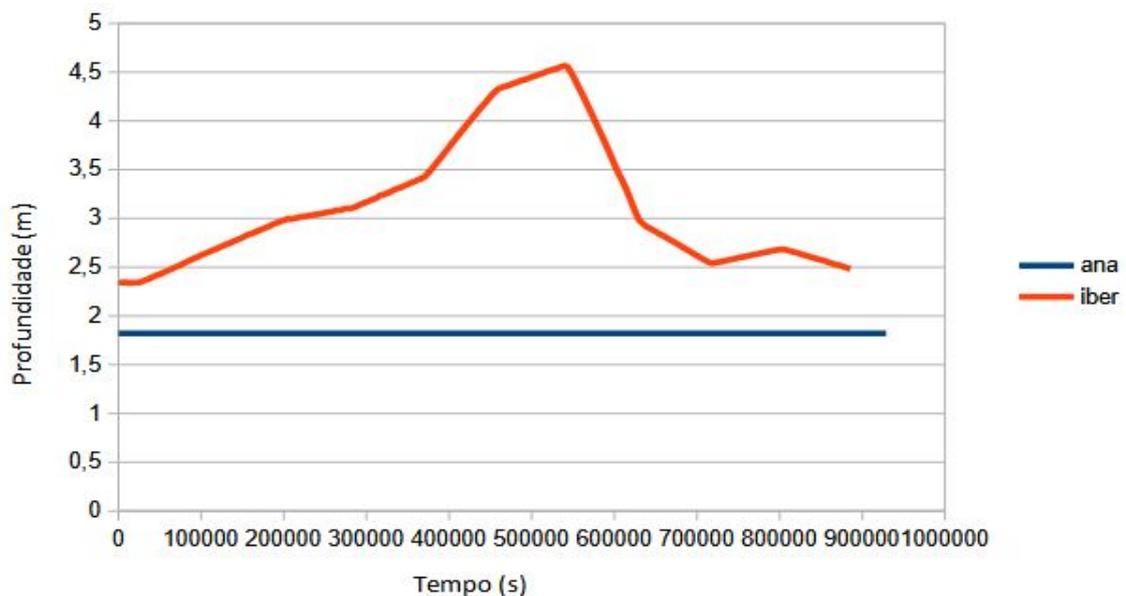


Figura 4.60: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Jusante, final de Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 4.61 é ilustrado o gráfico para o distrito de Paraoquena. Nesta região, a cota de transbordo informada pelo INEA é 3,85 m, valor inferior aos 3,86 m obtidos inicialmente pela simulação. Essa profundidade foi registrada pela estação às 20:15 h do dia 24/01/2023, correspondente ao tempo de 418.500 s.

Neste ponto, o valor máximo obtido na simulação é o mesmo que o registrado pela estação, 4,77 m, diferindo apenas no tempo, ocorrido em 550.800 s na simulação e registrado às 10:15 h do dia 26/01/2023, o que corresponde ao tempo de 555.300 s. No gráfico, nota-se que após passada a onda de cheia, o nível do rio retornou à valores próximos aos 3 m, enquanto na simulação o nível permaneceu em 4 m.

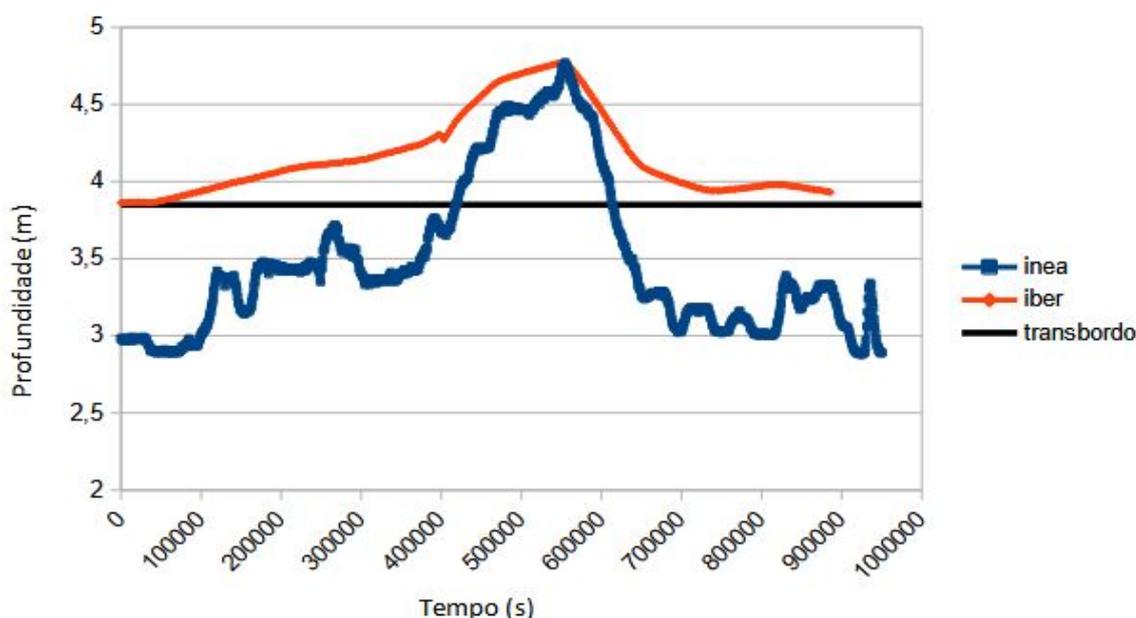


Figura 4.61: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Paraoquena, final de Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Já no gráfico "profundidade (m)  $\times$  tempo (s)" na Ponte do Nando, Figura 4.62, observa-se um comportamento parecido entre os dados simulados e os registrados na estação, embora a simulação apresente valores maiores de profundidade. Nesta localidade, a cota de transbordo é de 5 m, que foi alcançada em 471.600 s na simulação e, posteriormente, registrada pela estação às 3 h do dia 26/01/2023, no tempo de 529.200 s.

Em relação à máxima, tanto a profundidade quanto o tempo foram bem próximos, sendo o valor de 5,17 m em 554.400 s, obtido na simulação e, o nível de 5,24 m registrado na estação, às 10:30 h do dia 26/01/2023, o que corresponde ao tempo de 556.200 s. Após a máxima, ambas situações registram descidas rápidas no nível, a simulação se estabiliza próximo aos 3,7 m e o nível da estação hidrometeorológica fica entre 3 m e 3,5 m.

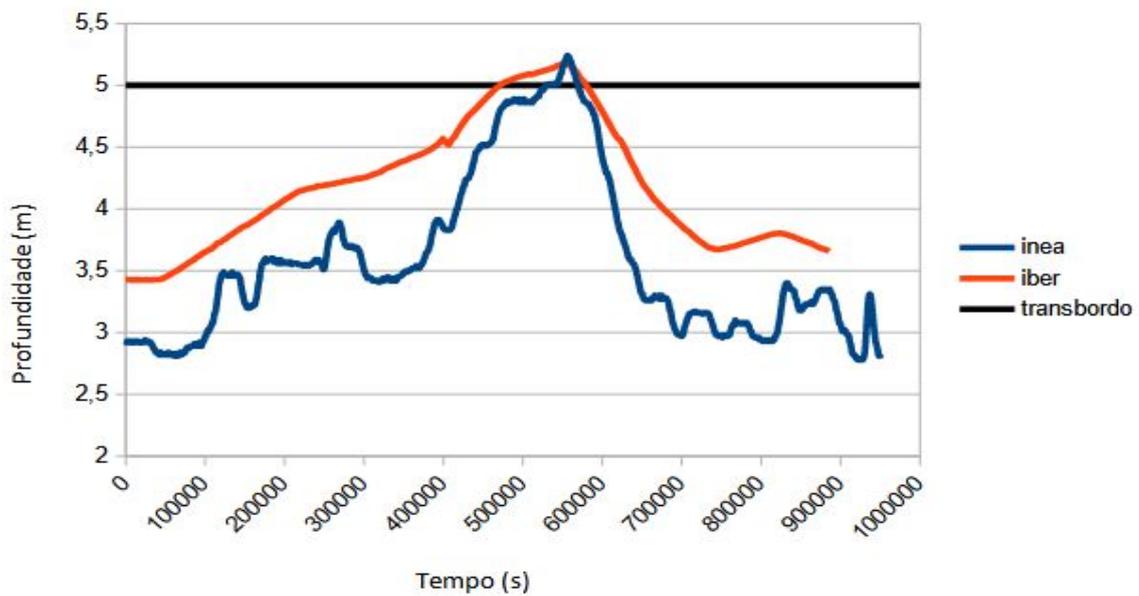


Figura 4.62: Gráfico comparativo entre os dados de profundidade medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Ponte do Nando, final de Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Para o centro de Santo de Antônio de Pádua, o gráfico (Figura 4.63), mostra o mesmo padrão entre os dados simulados e os registrados na estação, porém, a simulação apresenta um valor maior em relação à profundidade máxima na região. A simulação teve seu pico em 3,69 m no tempo de 558.000s e a estação registrou o valor de 3,37 m em 560.700 s. Após a passagem da onda de cheia, em ambos, o valor retornou para próximo de 2 m.

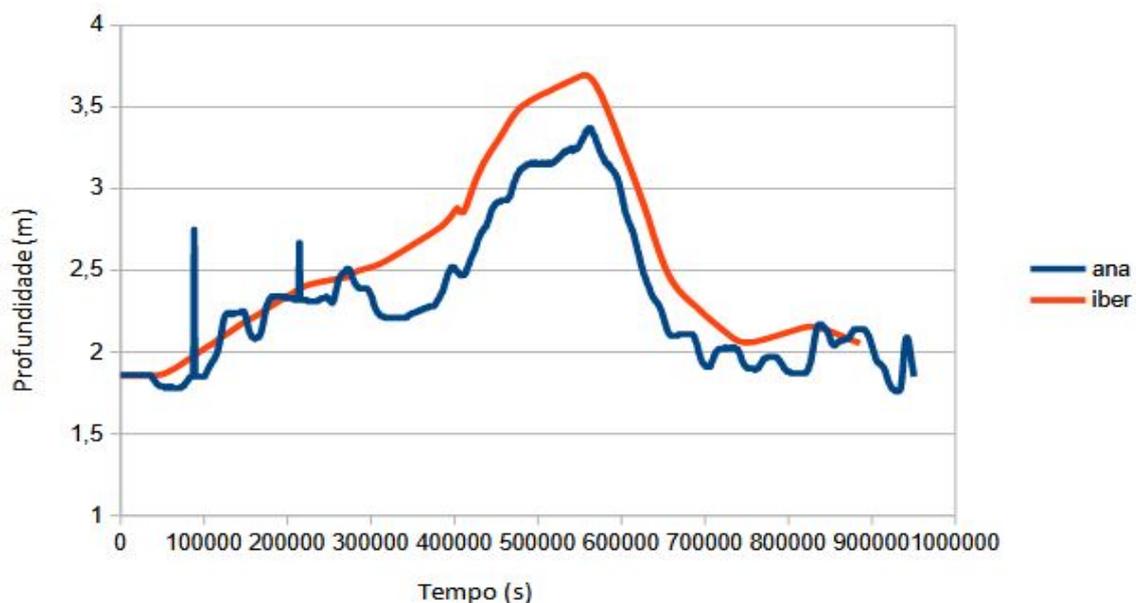


Figura 4.63: Gráfico comparativo entre os dados medidos pela estação hidrometeorológica e a simulação - Centro, final de Janeiro de 2023.

Fonte: O Autor (2024).

Por fim, na Tabela 4.6 são mostrados os resultados obtidos neste período de simulação de forma resumida. Em geral, as simulações são bastante precisas, com diferenças mínimas entre os níveis medidos e simulados. As diferenças de tempo para atingir os níveis máximos e as cotas de transbordo são pequenas, o que sugere que a simulação é eficaz na previsão dos momentos críticos. No entanto, as simulações tendem a antecipar os eventos de transbordo, como observado na Ponte do Nando.

Tabela 4.6: Comparação de Nível Máximo e Cota de Transbordo Evento de Inundação no Final de Janeiro de 2023.

Localização da Estação	Parâmetro Analisado	Valor Medido (m)	Tempo Medido (s)	Valor Simulado (m)	Tempo Simulado (s)	Diferença de Nível (m)	Diferença de Tempo (s)
Jusante	Nível Máximo	1,80	-	4,56	540.000	2,76	-
	Cota de Transbordo	3,85	418.500	3,86	-	0,01	-
Paraoquena	Nível Máximo	4,77	555.300	4,77	550.800	0,00	4.500
	Cota de Transbordo	5,00	529.200	5,00	471.600	0,00	57.600
Ponte do Nando	Nível Máximo	5,24	556.200	5,17	554.400	0,07	1.800
	Nível Máximo	3,37	560.700	3,69	558.000	0,32	2.700

Fonte: Autor (2024).

## 4.4 Relação Vazão da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna com o Nível do Rio Pomba

Nesta seção são apresentados os gráficos mostrando a relação entre a vazão da UHE Barra do Braúna e o nível (profundidade) do Rio Pomba observado nas localizações das estações hidrometeorológicas. Para a construção destes gráficos, foram realizadas simulações utilizando o Cenário 5.

Nestas simulações, foi considerada como condição de contorno de entrada uma vazão constante utilizando o período de tempo de 86.400 s (24 horas), permitindo assim a estabilização do nível do rio para a vazão de entrada. Foram realizadas 15 simulações, iniciando com a vazão em  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  e variando a cada  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  até atingir a vazão de  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Na Figura 4.64 é mostrado o gráfico obtido para a estação Jusante, onde o eixo  $x$  apresenta a vazão e, no  $y$ , é apresentada a profundidade. O gráfico revela um aumento acelerado da profundidade até cerca de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , seguido por um aumento mais gradual. A profundidade máxima observada é de 7,09 metros na vazão de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.4 Relação Vazão da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna com o Nível do Rio Pomba97

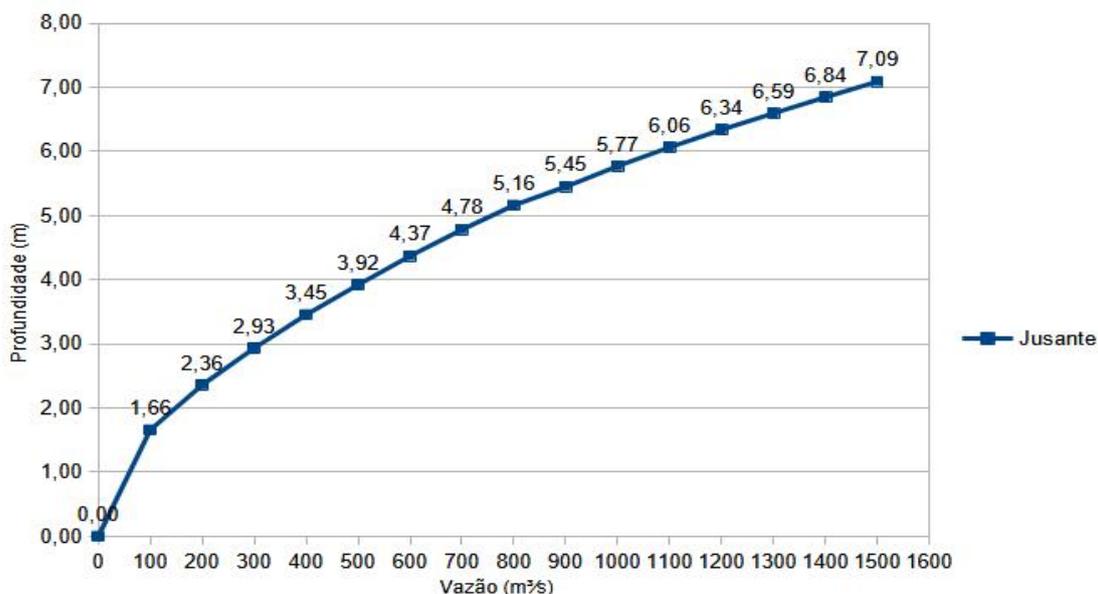


Figura 4.64: Gráfico relacionando a vazão da UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Jusante.

Fonte: O Autor (2024).

Por outro lado, na Figura 4.65 é mostrado o gráfico obtido para o distrito de Paraquena, no eixo  $x$  observa-se a vazão e o  $y$  traz a profundidade. Para esta localidade, a cota de transbordo é 3,85 m e nota-se que essa pode ser atingida a partir da vazão de 200 m<sup>3</sup>/s. De acordo com gráfico, nota-se uma relação linear entre o aumento da vazão e a profundidade, com um aumento de 0,20 m a cada 100m<sup>3</sup>/s de vazão. Observa-se a profundidade máxima de 6,22 metros na vazão de 1.500 m<sup>3</sup>/s.

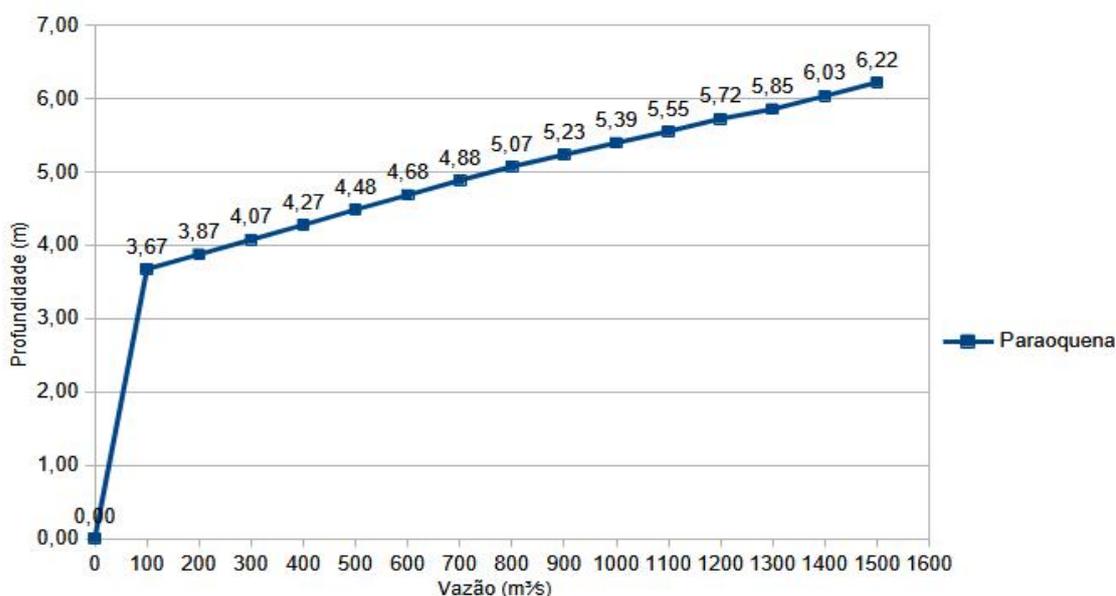


Figura 4.65: Gráfico relacionando a vazão da UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Paraquena.

Fonte: O Autor (2024).

Já o gráfico apresentado na Figura 4.66 é referente à região da Ponte do Nando, logo a montante da cidade de Santo Antônio de Pádua. O gráfico mostra uma tendência crescente, em que, conforme a vazão aumenta, a profundidade também aumenta, porém, a relação demonstra não ser linear. Nas vazões iniciais, até 300 m<sup>3</sup>/s, ocorre um grande aumento na profundidade e, nas vazões maiores, o crescimento da profundidade é mais gradual.

Nesta região a cota de transbordo é de 5 m, e observa-se que é atingida na vazão de 600 m<sup>3</sup>/s. Após o transbordo, a profundidade continua a aumentar, mas a um ritmo mais lento, atingindo 7,19 metros na vazão de 1.500 m<sup>3</sup>/s.

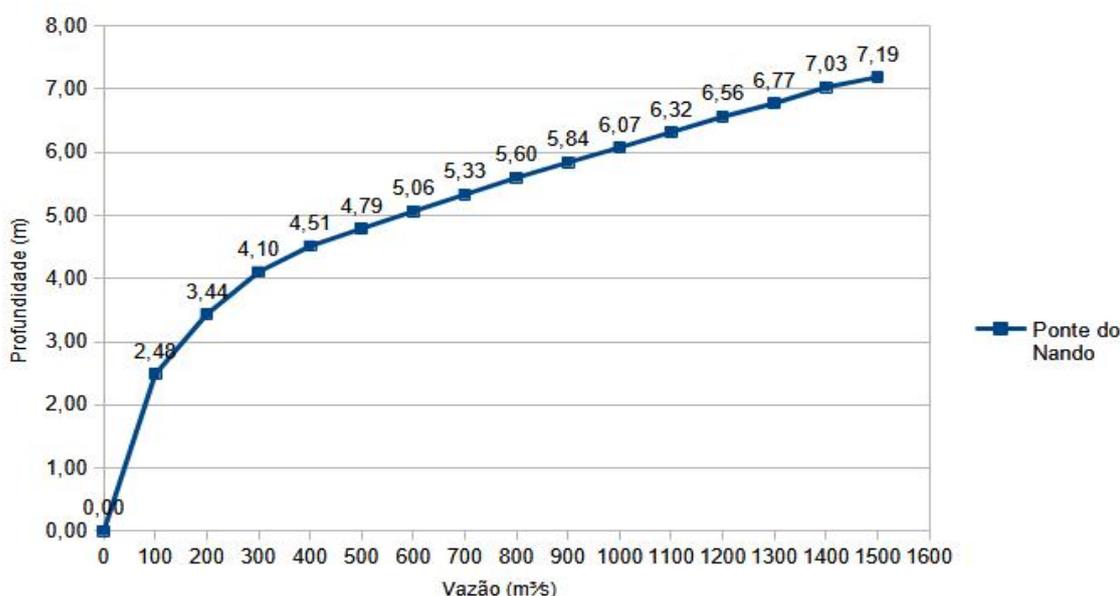


Figura 4.66: Gráfico relacionando vazão UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Ponte do Nando.

Fonte: O Autor (2024).

Finalizando, na Figura 4.67 é apresentado o gráfico para a região do Centro de Santo Antônio de Pádua. A profundidade aumenta rapidamente até cerca de 400 m<sup>3</sup>/s e, em seguida, de forma mais moderada. Isso indica uma resposta semelhante ao gráfico de Paraoquena, com a diferença de que a profundidade continua a aumentar de forma mais linear após os 400 m<sup>3</sup>/s.

Todas as regiões analisadas apresentam um rápido aumento de profundidade inicial com o aumento da vazão, seguido por um comportamento mais estável à medida que a vazão continua a subir. Isso sugere que após o transbordo, o rio consegue lidar relativamente bem com aumentos adicionais de vazão sem grandes variações na profundidade.

#### 4.4 Relação Vazão da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna com o Nível do Rio Pomba99

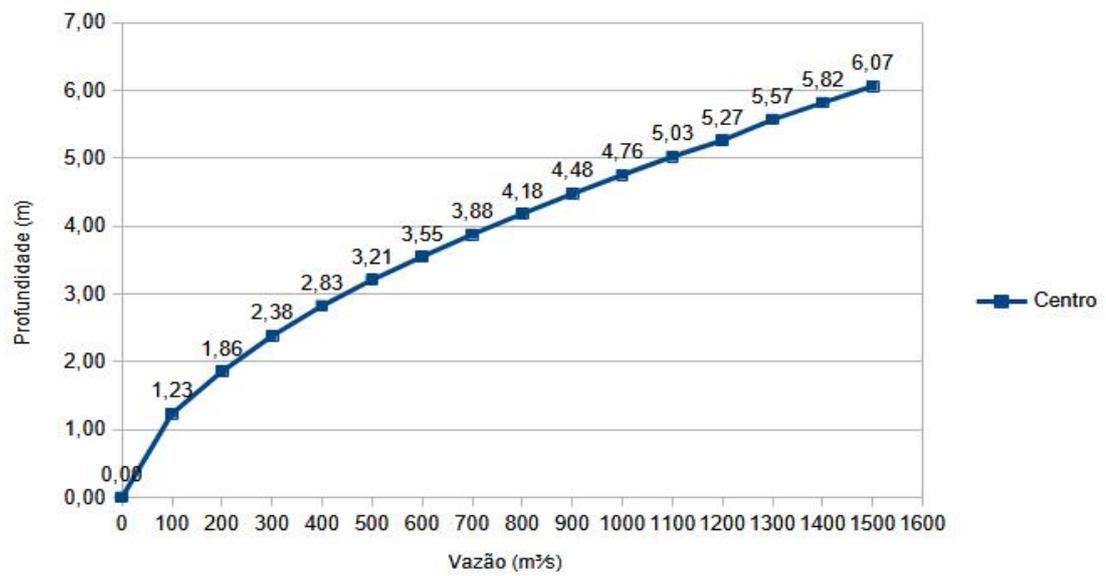


Figura 4.67: Gráfico relacionando a vazão da UHE Barra do Braúna com a profundidade do Rio Pomba na estação Centro.

Fonte: O Autor (2024).

# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste estudo, assim como a sequência proposta para sua continuidade.

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho buscou analisar eventos de inundação no trecho do Rio Pomba localizado na região de Santo Antônio de Pádua utilizando o software IBER para realizar simulações com diferentes modelos digitais de elevação (MDEs) disponíveis para a referida área, com o objetivo de modelar e investigar as variações do nível de água no Rio Pomba no município, de acordo com a vazão liberada pela UHE Barra do Braúna. Para tanto, a pesquisa utilizou modelos matemáticos, que buscam a solução das equações de Saint Venant em duas direções, utilizando o Método dos Volumes Finitos (MVF), acoplados a softwares computacionais, direcionados a análise dos eventos de inundações.

Dentre as análises realizadas, destaca-se a possibilidade de se conhecer o comportamento do Rio Pomba e, assim, obter informações a respeito dos impactos e danos causados no município de Santo Antônio de Pádua, frente aos diversos cenários de inundações, os quais historicamente atingem o município. Observa-se que o desenvolvimento da cidade, localizada em grande parte na planície de inundação do Rio Pomba, é um fator que contribui para a ocorrência destes eventos de inundação.

Inicialmente, foram obtidos os modelos de elevação digital disponíveis para a área de estudo, afim de realizar simulações e comparar dentre os modelos de elevação aquele mais adequado para representar a topografia da região. Nesse sentido, foi possível constatar que a resolução espacial dos modelos de elevação está intimamente relacionada com a qualidade

da modelagem hidrodinâmica realizada, no sentido de, quanto menor a resolução espacial maiores os detalhes observados no comportamento e fluxo da água.

As manipulações realizadas nos MDEs, bem como as alterações realizadas nas superfícies, se mostraram eficientes para a observação do comportamento e espalhamento da água nos eventos de inundações na cidade. Os diferentes cenários analisados neste trabalho, ajudaram a elucidar como a água se comporta, sem a interferência das construções na cidade, mostrado nos Cenários 1, 4 e 7, uma vez que esses mostram apenas o relevo natural da região. Os demais cenários apresentam o comportamento da água nas ruas do município, considerando as áreas edificadas do mesmo. Importante ressaltar que, dentre esses cenários, a forma de modificação foi diferente, nos Cenários 2, 5 e 8 houve a elevação dos locais onde situam-se as edificações nas áreas urbanizadas em 3 metros, já nos Cenários 3, 6 e 9 houve a exclusão das áreas edificadas, criando os anéis nas superfícies, desta forma, observa-se que esse último conjunto de simulações demandou um tempo muito superior aos demais para seu processamento com resultado próximo ao segundo conjunto de simulações.

Outro fator importante de se observar, é que para as simulações apresentadas nos cenários supracitados, a definição de uma vazão de entrada de  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ , superior aos dados de vazão obtidos junto ao SAR para a UHE Barra da Bráuna nos períodos considerados, possibilitou a exclusão dos elementos secos nas simulações posteriores, o que contribuiu significativamente para a redução do tempo de processamento das novas simulações. Assim, as simulações que, inicialmente, duravam em torno de 6 a 7 dias de processamento, considerando um período de 1 dia (24 horas) de simulação, apresentaram uma redução para 3 dias de processamento, em simulações que compreenderam 10 dias (240 horas).

Além disso, o Cenário 5, escolhido para a realização das simulações com dados reais de vazão da UHE Barra da Braúna, referentes ao período de Janeiro de 2022 e os dois períodos em Janeiro de 2023, apresentou um ajuste satisfatório nos resultados numéricos obtidos quando comparados com as estações hidrometeorológicas da ANA e INEA, tomando como referência os dados de nível d'água reais medidos no mesmo período. As simulações foram bastante precisas, com diferenças mínimas entre os níveis medidos e simulados. O mesmo se aplica aos tempos, as diferenças de tempo para atingir os níveis máximos e as cotas de transbordo são pequenas, mostrando que a simulação é eficaz na previsão dos momentos críticos, embora as cotas de transbordo sejam geralmente atingidas mais cedo nas simulações, sugerindo uma antecipação na modelagem.

As simulações com o objetivo de relacionar o nível do Rio do Pomba com a vazão

da UHE Barra do Braúna mostraram a possibilidade de prever o comportamento do Rio nas localidades em que as estações hidrometeorológicas estão instaladas. Em três pontos analisados (Jusante, Ponte do Nando e Centro), a profundidade aumenta de forma não linear com o aumento da vazão. Inicialmente, há um crescimento rápido da profundidade à medida que a vazão aumenta, seguido por um crescimento mais lento à medida que a vazão continua a subir. Este comportamento sugere que o rio possui uma certa capacidade de acomodação para pequenos aumentos de vazão, mas à medida que essa capacidade é atingida, o aumento na profundidade se torna menos acentuado. Apenas Paraoquena difere deste padrão, apresentando um comportamento do rio de modo linear. Fato que carece de uma maior investigação, uma vez que o modelo pode não estar bem calibrado para essa região.

Os gráficos indicam que a capacidade de escoamento do rio varia significativamente entre as diferentes regiões, Ponte do Nando e Jusante têm uma capacidade maior, enquanto Paraoquena e Centro têm uma capacidade relativamente menor, transbordando a vazões mais baixas. Isso sugere que o perfil topográfico e as características geomorfológicas do leito do rio variam consideravelmente ao longo do seu curso, impactando diretamente a resposta do rio a diferentes níveis de vazão. Com diferenças de comportamento do rio em cada localidade, a análise revela uma considerável variabilidade na resposta do rio ao aumento de vazão, isso sugere que o gerenciamento de risco de inundações deve ser adaptado a cada ponto específico. Paraoquena é a região mais vulnerável à inundação, com transbordo ocorrendo a menores vazões, medidas de proteção mais rigorosas podem ser necessárias nesta área.

Por fim, verificou-se que o software IBER atendeu bem às necessidades de modelagem proposta neste trabalho, realizando satisfatoriamente simulações em uma área extensa e apresentando resultados condizentes com as inundações ocorridas no município no período estudado. Dessa forma, pode contribuir com a administração pública auxiliando na prevenção e minimizando os danos causados pelos eventos de inundação na cidade de Santo Antônio de Pádua.

## 5.2 Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos neste estudo foi possível a verificação da relação entre a vazão da UHE Barra do Braúna e o nível do Rio Pomba em Santo Antônio de Pádua, uma estimativa que pode contribuir para a segurança dos munícipes, no caso de enfrentamento

de cheias e inundações. Neste contexto, a divulgação das informações obtidas com este estudo torna-se fundamental para as ações da Defesa Civil no município, ou seja, projetar esse conhecimento para fora do meio acadêmico e levá-lo a prática.

Pretende-se aperfeiçoar o modelo desenvolvido neste trabalho, ampliando as informações sobre a área de estudo. Visando um modelo mais representativo das condições da região, torna-se importante a inclusão das informações de precipitação da região e a observação de seus impactos nos níveis d'água no Rio Pomba. Outras informações tornam-se relevantes no aprimoramento, como a inclusão de dados dos afluentes do Rio Pomba localizados à jusante da barragem como, por exemplo, o Ribeirão Santo Antônio.

Análises e aperfeiçoamento em relação ao coeficiente de rugosidade utilizado no modelo podem ser importantes, trazendo a adequação deste parâmetro na observação do tempo de chegada da onda (pico) de cheia no município de Santo Antônio de Pádua. Dessa forma, variar os parâmetros que controlam o escoamento e a capacidade de retenção de água no solo e no leito do rio podem trazer um modelo ainda mais ajustado à realidade da região de estudo.

Em algumas localidades, como Paraoquena, a simulação mostrou que o nível do rio permaneceu elevado por mais tempo após o pico de inundação, comparado aos dados medidos. Isso pode indicar que o modelo está subestimando a capacidade de dispersão e infiltração da água após o pico. Melhorar a modelagem da interação entre o rio e a planície de inundação, bem como o efeito das margens do rio e a vegetação, pode ajudar a atenuar melhor as ondas de cheia. Para tal, tem-se a intenção de utilizar um computador com configuração mais robusta (melhor processador e mais memória RAM, por exemplo) de forma a se realizar a modelagem com malhas mais refinadas no modelo.

Após a implementação dos ajustes, torna-se importante testar o modelo em múltiplos cenários históricos, incluindo outros eventos extremos de inundações e também condições de seca, dessa forma, tornando possível de se verificar a robustez e a qualidade das previsões alcançadas com o modelo.

# Referências

- [1] ANA. Agência Nacional de águas e Saneamento Básico. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 15 mai. 2024.
- [2] ANA. SAR – Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/>, 2017. Acesso em: 17 abr. 2024.
- [3] ASSIS, A. A. D. O ciclo hidrológico: proposta de uma atividade investigativa no contexto da educação do campo. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília (UnB), 2021. Especialização em Ensino de Ciências - Ciência é 10, Brasília, DF.
- [4] BARREIRO, F. N. As influências antrópicas no ciclo da água: uma proposta para a literatura infantil. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, 2021. Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Rede Nacional para Ensino das Ciências Ambientais.
- [5] BITENCOURT, J. *Deslocamentos internos e forçados no rio de janeiro: (Des)proteção social e conflitos armados*. Curitiba: Editora CRV, 2024.
- [6] CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no brasil. *Caderno Prudentino de Geografia 1*, 42 (2020), 140–161.
- [7] CARVALHO, N. P. Análise de eventos de cheias do rio pomba na cidade de santo antônio de pádua-rj utilizando o software iber. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ, 2022. Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.
- [8] CARVALHO JÚNIOR, O. A., GOMES, M. C. V., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T. *Revisões de literatura da geomorfologia brasileira*. Brasília: Universidade de Brasília, 2022.
- [9] CESTARI, W. A. *Plano de Ação de Emergência - PAE. Barragem da UHE Barra do Braúna, Rio Pomba - Recreio-MG*. São Paulo: Geometrisa, 2020.
- [10] CHAGAS, C. S., FERNANDES FILHO, E. I., ROCHA, M. F., CARVALHO JÚNIOR, W. D., SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 14* (2010), 218–226.
- [11] CREMON, E., BETTIOL, G., JÚNIOR, J., MACEDO, F., RABELO, M. Avaliação da altimetria do mde cop-30 no centro-oeste do brasil. *Revista Brasileira de Cartografia 74*, 3 (2022).

- [12] CRISTÓVÃO, E. C. A implantação de empreendimentos hidrelétricos: impactos e repercussões socioambientais. o caso da uhe barra do braúna (mg). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, 2014. Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Ciências Humanas.
- [13] CÂMARA DE SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA - RJ. História, 2024. Disponível em: <https://www.santoantoniodepadua.rj.leg.br/institucional/historia>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- [14] ESA. EUROPEAN SPACE AGENCY. Copernicus Global Digital Elevation Model. Distributed by OpenTopography. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 29 ago. 2023.
- [15] ESTEVES, A. A. J. A. Resiliência generativa: Uma ferramenta de análise espacial das mudanças de um sistema urbano. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto (Portugal), Porto, Portugal, 2021. Programa Doutoral em Engenharia Civil – 2020/2021 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [16] FARR, T., ROSEN, P., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRIK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys* 45 (2007).
- [17] FERREIRA FILHO, D. F., SOUSA FILHO, H. N. Identificação de áreas com risco de inundações em oriximiná (pa): contribuições à elaboração do zoneamento ambiental municipal. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará (UFPA), 2022. Especialização em Tecnologias Aplicadas à Regularização Fundiária e Prevenção de Conflitos Socioambientais, Habitacionais e Sanitários: Rede Amazônia, Belém, PA.
- [18] FERREIRA JÚNIOR, A. V. *Fundamentos de geologia e petrografia*. Recife: Editora Universitária da UFPE (EDUFPE), 2021.
- [19] FLORINSKY, I. *Digital terrain analysis in soil science and geology*, 1st ed. Elsevier, Russia, 2012.
- [20] GRESSLER, M. Alternativas de simulação de rompimento de barragem de rejeitos no software hec-ras: uma análise comparativa. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul (UFRGS), 2022. Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Porto Alegre, RS.
- [21] IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. Santo antônio de pádua. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/santo-antonio-de-padua/panorama>, 2024. Acesso em: mar. 2024.
- [22] LOPES, R. H., ALMEIDA, E. S., RODRIGUES, J. P., VIEIRA, M. C., VIEIRA, M. E., PEREIRA, M. B. A construção da ponte raul veiga: política e comemoração do centenário da independência em santo antônio de pádua no ano de 1922. *Revista Vértices* 19, 2 (2017), 193–213.

- [23] MACÊDO, R. J. A., SURYA, L. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores srtm e alos palar para análise digital de terreno. *Revista Contexto Geográfico* 3, 6 (2018), 47–55.
- [24] MAISTRO, J. Análise dos impactos motivados pela supressão das matas ciliares no pontal do paranapanema-sp: o caso da bacia hidrográfica do ribeirão santo antônio. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, SP, 2024. Programa de Pós-Graduação em Geografia.
- [25] MENDES, L. C. Usos múltiplos da represa formada pela uhe barra do braúna em laranjal-mg. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2016. Curso de Graduação em Geografia, Juiz de Fora, MG.
- [26] MINISTÉRIO DAS CIDADES, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. *Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios*. Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Brasília, 2007.
- [27] OLIVEIRA, S., FIGUEIRA, S., PEREIRA, T. J., BÊDO, M. V. N., TELLES, W. R. Análise da influência da malha computacional na simulação do rompimento de uma barragem por meio do software iber. estudo de caso: barragem de barra do braúna. *Revista Cereus* 15, 4 (2023), 125–140.
- [28] OPENTOPOGRAPHY. Opentopography. <https://www.opentopography.org/>, 2022.
- [29] PEITER, C. C., CARRISSO, R. C. C., PIRES, D. C. B. O arranjo produtivo local de santo antônio de pádua, 2024. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1181/1/0%20Arranjo%20Produtivo%20Local%20de%20Santo%20Ant%C3%B4nio.pdf>. Acesso em: 20 de jun. de 2024.
- [30] PINHEIRO, H. S. K., CHAGAS, C. D. S., CARVALHO JÚNIOR, W. D., ANJOS, L. H. C. D. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 9 (2012), 1384–1394.
- [31] PIRACIABA, B., LEMOS, L. Dinâmicas territoriais no estado do rio de janeiro: reflexões em torno da região noroeste fluminense. *O Território* (2017), 151.
- [32] RIGHI, E., BASSO, L. A., TRENTIN, A. B. Metodologia para zoneamento de risco frente as inundações graduais: área urbana do município de uruguaiana-rs. *Revista Humanidades & Inovação* 8 (2021).
- [33] SANTOS, I. B. Desigualdades digitais: interseccionalidades entre os fatores socioeconômicos e o nível de competências digitais no brasil. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS, 2023. Programa de Pós-graduação em Economia do Desenvolvimento.
- [34] SANTOS, J. C. Comparação entre a área inundável obtida por imagens óticas de satélite e simulações realizadas no hec-ras e hand model: estudo de caso de uma sub-bacia do alto paranapanema. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São José dos Campos, SP, 2023. Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais.

- [35] SANTOS, K., MIRANDA, J. Percepções de estudantes do ensino médio de uma escola pública de santo antônio de pádua/rj acerca do rio pomba. *Revista Tempos e Espaços em Educação* 11 (09 2018), 269.
- [36] SANTOS, S. V. O. *Potencialidades e limitações das terras no município de Santo Antônio de Pádua-RJ*. PhD thesis, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, 2023. Programa de Pós-Graduação em Geografia.
- [37] SANZ-RAMOS, M., CEA, L., BLADÉ, E., LÓPEZ-GÓMEZ, D., SAÑUDO, E., CORESTEIN, G., GARCÍA-ALÉN, G., ARAGÓN-HERNÁNDEZ, J. L. *Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria (CIMNE), Barcelona, Spain, 2022.
- [38] SILVA, W. R., MENDES, K. G., FERREIRA, R. D. S. Desenvolvimento de uma estação meteorológica a partir de materiais reutilizados e sensores de baixo custo. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 46 (2024).
- [39] SILVA, S. M. Ocupações das margens de riachos e eventos de inundação: o caso de aroeiras, paraíba. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2021. Licenciatura em Geografia, CAMPINA GRANDE, PB.
- [40] SIRKO, W., KASHUBIN, S., RITTER, M., ANNKAH, A., BOUCHAREB, Y., DAUPHIN, Y., KEYSERS, D., NEUMANN, M., CISSE, M., QUINN, J. Detecção de edifícios em escala continental a partir de imagens de satélite de alta resolução. arXiv preprint arXiv:2107.12283, 2021.
- [41] STEINSTRASSER, C. E. Método difusivo de lax aplicado na solução das equações de saint-venant. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005. Programa de Pós-graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.
- [42] SÁNCHEZ, R. E. Produção de habitação social: o caso do conjunto habitacional san francisco, assunção, paraguai. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, RJ, 2023. Programa de PósGraduação em Arquitetura.
- [43] TACHIKAWA, T., KAKU, M., IWASAKI, A., GESCH, D., OIMOEN, M., ZHANG, Z., DANIELSON, J., KRIEGER, T., CURTIS, B., HAASE, J. Aster global digital elevation model version 2 - summary of validation results. Relatório Técnico, NASA, 2017.
- [44] VALERIANO, M. M., ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of srtm data. *Applied Geography (Sevenoaks)* 32 (2011), 300–309.
- [45] VIEIRA, M. S., TAVARES, A. S., UAGODA, R. E. S., ASSUNÇÃO, P. Uso de traçadores corantes fluorescentes na identificação de rotas de fluxos em sistemas cársticos: Panorama de estudos no brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 17, 3 (2024), 1961–1976.

- 
- [46] VIEIRA, S. D. Logística humanitária para amenizar as consequências das inundações em santo antônio de pádua. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, RJ, 2013. Proograma de Pós-graduação em Engenharia Industrial.
- [47] ZANATA, I. M., OLIVEIRA, V. P. S., TELLES, W. R. O uso da modelagem computacional para simulação e comparação dos modelos digitais de elevação do noroeste fluminense. estudo de caso: Rio pomba e rio paraíba do sul. *Revista de Gestão Social e Ambiental* 18, 3 (2023), 1–21.