Universidade Federal Fluminense

NATÁLIA PEREIRA CARVALHO

ANÁLISE DE EVENTOS DE CHEIAS DO RIO POMBA NA CIDADE DE SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA-RJ UTILIZANDO O SOFTWARE IBER

NATÁLIA PEREIRA CARVALHO

ANÁLISE DE EVENTOS DE CHEIAS DO RIO POMBA NA CIDADE DE SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA-RJ UTILIZANDO O SOFTWARE IBER

Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação 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:

Professor D.Sc. Wagner Rambaldi Telles

Coorientador:

Professor D.Sc. Ricardo Silveira Souza

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VOLTA REDONDA

2022

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

C331a Carvalho, Natália Pereira

Análise de eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ utilizando o software IBER / Natália Pereira Carvalho. - 2022.

102 f.: il.

Orientador: Wagner Rambaldi Telles. Coorientador: Ricardo Silveira Souza.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior, Volta Redonda, 2022.

1. Enchente e inundações em Santo Antônio de Pádua. 2. Rio Pomba. 3. Modelagem matemática e computacional. 4. Software IBER. 5. Produção intelectual. I. Telles, Wagner Rambaldi, orientador. II. Souza, Ricardo Silveira, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior. IV. Título.

CDD - XXX

ANÁLISE DE EVENTOS DE CHEIAS DO RIO POMBA NA CIDADE DE SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA-RJ UTILIZANDO O SOFTWARE IBER

Natália Pereira Carvalho

Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação 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:

Prof. Wagner Rambaldi Telles, D.Sc.

MCCT-UFF (Presidente)

Prof. Gustavo Benitez Alvarez, D.Sc.

MCCT-UFF

Prof. Nelson Machado Barbosa, D.Sc.

UENF

Dedico este trabalho à população da cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ, que sempre me acolheu tão bem e que sofrem com as cheias do rio Pomba. Saiba que vocês não estão sozinhos nessa luta. Que essa pesquisa possa ajudar a população paduana no período de cheias do rio Pomba. E também in menórian de meu pai e de meu avô.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ser minha fortaleza.

Aos meus pais, Célio Ferreira de Carvalho (*In Memórian*) e Rosângela Maria Pereira Carvalho pelo amor, apoio e incentivo incondicional. Por ser a minha base, sofrendo e passando por cada adversidade junto comigo. Minha eterna gratidão.

À minha irmã Lorena Pereira Carvalho pelo carinho e apoio de sempre.

Ao meu namorado, Igor Mota Machado e sua família, pela atenção, compreensão, força e apoio incondicional.

In Memorian também, ao meu avô Arandy Rodrigues Pereira, que também nos deixou nesse ano.

Ao meu orientador, Wagner Telles pela paciência e compreensão no ano mais difícil da minha vida, além de todas as orientações, críticas e incentivo. Poder ter sido sua orientanda, foi uma honra.

Aos meus amigos de mestrado pela convivência, vivência e troca de conhecimentos.

Aos amigos pessoais pelo convívio, apoio e compreensão.

Minha família de uma maneira geral, que estiveram presentes, me apoiando, fortalecendo e entenderam muitas vezes a minha ausência.

À Universidade Federal Fluminense e seu corpo docente pelo crescimento intelectual e construção de novos conhecimentos.

E a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação.

Esse estudo foi apoiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (projetos com número de processos E-26/210.400/2018 e G. E47/2021-SEI260003/016517/2021-R210.107/2022).

O rio Pomba mais uma vez

Veio nos ensinar

Que contra a natureza

O homem não deve lutar.

Só deixou a nossa gente

Às festas comemorar.

Foi Natal e Ano Novo

E aos Santos Reis louvar.

Foi quando ele resolveu

Agora vou passar

Vou mostrar a minha força,

Sem um tapa lhe dá.

Foi lá em Santa Bárbara do Tircúrio

Que ele começou a se organizar.

Juntou com rio Novo e Xopotó

E as suas águas

começou a aumentar.

Foi lá pras bandas de Cataguases

Nas zonas de Minas Gerais,

Que saiu fora da caixa

e começou a transbordar.

Vai ser lá em barra do Braúna

que a minha vazão

começou a aumentar.

Foi quando aqui embaixo

o povo começou a preocupá

O prefeito reuniu a sua equipe

E mandou a rádio Feliz avisar

Quem mora na ribeirinha

Escute o que vou falar:

Pode subir os seus móveis

E proteger seus animá.

Para quem quiser mudar

Os caminhões eu vou mandar

Pois aqui embaixo tem um CIEP

Pra você se abrigar.

Vou mudar o Hospital

pro colégio Estaduá.

Pois o Hélio Montezano

corre o risco de alagá.

Mas preste muita atenção

No que agora eu vou falar:

As consultas por aqui,

Serão de modo emergência

Pois quem tiver com COVID

e Gripe

A consulta será em outro lugar.

Mesmo depois de tudo isso,

O povo ainda continuou a duvidar.

Ligando pra rádio Feliz

E começaram a perguntar:

O Niverdir e Alessandro de Souza

Começaram a aconselhar

Se mora perto do rio

É melhor se mudar.

Pois já dizia um ditado

Melhor prevenir do que remediar

É o que eu sempre digo,

Vamos parar de reclamar

Graças a Deus aqui em Pádua

Ainda dá tempo de avisar

Só perde as suas coisas

Quem não quer acreditar

E mais uma vez ficou a lição

O rio, só queria passar.

Autor: Palhaço de Folia

De Santo Antônio de Pádua.

RESUMO

O constante fenômeno de enchentes e inundações ocorridas no município de Santo Antônio de Pádua, localizado no Estado do Rio de Janeiro, tem causado muitos prejuízos de diversas ordens sendo eles econômicos, sociais, ambientais e de saúde pública, os quais vêm desestruturando a harmonia social devido ao medo constante da população, em períodos de chuvas, de se tornarem vítimas da natureza. Diante de tais fatos, este estudo procurou fazer 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 eliminar o problema ou minimizar os danos por ele causados ao município e sua população. Para tal, o estudo trouxe em seu bojo informações sobre os fenômenos naturais envolvendo o ciclo hidrológico com os quais possa-se elucidar o que seriam as inundações e as enchentes a partir do ponto de vista da literatura especializada no tema em questão. Também foi realizada uma caracterização do local e objeto de estudo, trazendo informações históricas e geográficas, tais como o histórico das principais inundações e enchentes sofridas pelo município e a caracterização da bacia hidrográfica que forma rio Pomba, visando desenvolver uma modelagem matemática utilizando o software IBER com o propósito de expor os resultados finais encontrados neste estudo e auxiliar na prevenção dos danos causado na cidade de Santo Antônio de Pádua devido as cheias do rio Pomba. Com base nos resultados obtidos, o desenvolvimento da modelagem, bem como a utilização do software IBER foram considerados satisfatórios para solução do problema aqui proposto.

ABSTRAT

The constant phenomenon of flooding and inundation in the municipality of Santo Antônio de Pádua, located in the State of Rio de Janeiro, has caused many damages of various types, including economic, social, environmental and public health, which have been disrupting social harmony. due to the constant fear of the population, in periods of rain, of becoming victims of nature. In view of these facts, this study sought to analyze flood events on the Pomba river in the city of Santo Antônio de Pádua, using the IBER software to identify the main vectors of the phenomenon and gather information with which it is possible to propose solutions in order to eliminate the problem or minimize the damage it causes to the municipality and its population. To this end, the study brought information about the natural phenomena involving the hydrological cycle with which it is possible to elucidate what floods and inundations would be from the point of view of the specialized literature on the subject in question. A characterization of the place and object of study was also carried out, bringing historical and geographical information such as the history of the main floods and floods suffered by the municipality and the characterization of the watershed that forms the Pomba river aiming to develop a mathematical modeling using the IBER software with the purpose of exposing the final results found in this study and helping to prevent the damage caused in the city of Santo Antônio de Pádua due to the floods of the Pomba river. Based on the results obtained, the development of the modeling, as well as the use of the IBER software, were found to solve the problem proposed here.

PALAVRAS-CHAVE

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

GLOSSÁRIO

ANA Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

COPPE Coordenação de Programas de Pós-graduação em Engenharia

COPPETEC Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos

COSEAC Coordenadoria de Seleção da UFF

EER Experimental Energy Reactor

FEMAR Fundação de Estudos do Mar

G1 Portal de notícias brasileiro mantido pelo grupo Globo

HidroWeb Rede Hidrometeorológica Nacional

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LJ Luus-Jaakola

MAPIO Mapa.net

MPEs Micro, Média e Pequenas Empresas

MARETEC Marine, Environment & Tecnology Center

MVF Método de Volumes Finitos

NASA National Aeronautics and Space Administration

NFIP National Flood Insurance Program

NWS National Weather Service

PAP Plano de Águas Pluviais

PCA Particle Collision Algorithm

RHN Rede Hidrometeorológica Nacional

RTIN Rede Irregular de Triângulos ou Retângulos

Sistema de Intervenções Estruturais Destinados a Mitigação do Efeito das

SIEMEC

Cheias

SisBaHia Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

SISPREC Sistema de Previsão de Eventos Críticos

LISTA DE SÍMBOLOS

h[m]	Profundidade		
U_x , U_y $[m/s]$	Velocidades média na profundidade		
$g \left[m/s^2 \right]$	Aceleração da gravidade		
$\rho [kg/m^3]$	Densidade da água		
$Z_b[m]$	Elevação do fundo do rio		
τ_s []	Atrito na superfície livre devido ao contato produzido pelo vento		
τ_b []	Atrito devido ao contato pelo fundo		
v_t [mPa.s]	Viscosidade turbulenta em Pascal segundo 10P		
x, y [m/s]	Coordenadas espaciais		
$n [sm^{-1/3}]$	Coeficiente de rugosidade (ou de Manning)		
$V_{x,10}, V_{y,10} [m]$	Componentes de velocidade do vento a uma altura de 10 m		
$ V_{10} $ $[m]$	Módulo da velocidade do vento em 10 m de altura		
$C_{V,D}$ []	Coeficiente de arrasto da superfície		
$u_f[m/s]$	Velocidade de atrito com o solo		
$k \left[m^2/s^{-2} \right]$	Energia cinética turbulenta		
$d_{wall} [m]$	Distância do ponto sub análise até a parede mais próxima		
$\varepsilon \left[m^2/s^{-3} \right]$	Taxa de dissipação de energia turbulenta		
C_f []	Coeficiente empírico		
C_k []	Coeficiente empírico		
C_{ε} []	Coeficiente empírico		
C_{μ} []	Coeficiente empírico		
$C_{\varepsilon 1}$ []	Coeficiente empírico		
$C_{\varepsilon 2}$ []	Coeficiente empírico		
σ_k []	Coeficiente empírico		
σ_{ε} []	Coeficiente empírico		

SUMÁRIO

	LISTA DE ILUSTRAÇOES	xii
	LISTA DE TABELAS	xvi
1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	Metodologia	22
1.4	Organização do Trabalho	23
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO	25
2.1	Contexto Histórico e Preliminar	25
2.2	Inundações	30
2.3	Estudo de Caso: Santo Antônio de Pádua	36
2.3.1	Bacia Hidrográfica do Rio Pomba	37
2.3.2	Caracterização Histórica e Geográfica de Santo Antônio de Pádua	39
2.3.3	Eventos Críticos Envolvendo as Cheias em Santo Antônio de Pádua	42
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E SOLUÇÃO DO PROBLEMA	477
	PROPOSTO	47
3.1	Modelagem Matemática do Problema Proposto	47
3.2	O Software IBER	51
3.3	Obtenção de Dados da Região de Interesse	56
3.3.1	Aquisição de Dados de Topografia e Área Urbanizada	56
3.3.2	Aquisição de Dados de Níveis D`Água	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4 1	Desenvolvimento da Etapa de Pré-Processamento para a Região de	
4.1	Estudos	66
4.2	Análise de Variação das Malhas Espaciais	74
4.3	Análise da Influência da Zona Urbanizada	86
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	94
5.1	Conclusões	94

	•
v	1
- ^	

5.2	Trabalhos Futuros	95
	REFERÊNCIAS	97

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Representação do ciclo hidrológico 29			
Figura 2.2 -	Esquema ilustrativo das diferenças entre os termos inundação e			
	enchente	31		
Figura 2.3 -	Nascente do rio Pomba localizada no município de Barbacena-MG	38		
Figura 2.4 -	Mapa hidrográfico do rio Pomba seus municípios 38			
Figura 2.5 -	Imagem do rio Pomba em sua travessia pela cidade de Santo Antônio			
	de Pádua	41		
Figura 2.6 -	Ruas alagadas no município de Santo Antônio de Pádua nas inundações			
	de 2008	43		
Figura 2.7 -	Ruas alagadas no município de Santo Antônio de Pádua nas inundações			
	de 2012	44		
Figura 2.8 -	Ruas alagadas no município de Santo Antônio de Pádua nas inundações			
	de 2018	46		
Figura 3.1 -	Tela inicial do software IBER	51		
Figura 3.2 -	Representação da malha estruturada composta por elementos			
	quadrangulares (esquerda) e malha não estruturada composta por			
	elementos triangulares(direita)	53		
Figura 3.3 -	Representação de malha sem dados de topografia(esquerda) e a mesma			
	malha após a inclusão das informações topográficas(direita)	54		
Figura 3.4 -	Janela de pós-processamento do software IBER	55		
Figura 3.5 -	Página Inicial do projeto TOPODATA	56		
Figura 3.6 -	Coordenadas de topografia de cada região do território nacional	57		
Figura 3.7 -	Mapa interativo do território nacional			
Figura 3.8 -	Ambiente para download de arquivos formato desejado pelo usuário 5			
Figura 3.9 -	Arquivos do projeto TOPODATA com as informações de altitude da	50		
	região de interesse	59		
Figura 3.10 -	Região urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua sem a			
	demarcação das edificações(esquerda) e após a demarcação das			
	edificações(direita)	60		
Figura 3.11 -	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos	61		

Figura 3.12 -	Portal HidroWeb 6			
Figura 3.13 -	Mapa iterativo referente a Rede Hidrometeorológica Nacional			
Figura 3.14 -	- Região ao redor de Santo Antônio de Pádua e estações da Rede			
	Hidrometeorológica Nacional nas proximidades	63		
Figura 3.15 -	Download de dados convencionais			
Figura 3.16 -	Download de dados telemétricos	64		
Figura 3.17 -	Dados telemétricos da estação de monitoramento localizada no centro			
	de Santo Antônio de Pádua	64		
Figura 3.18 -	Dados de níveis d'água no rio Pomba utilizado como entrada no modelo	65		
Figura 3.19 -	Dados de níveis d'água no rio Pomba utilizado para a calibração do			
	modelo	65		
Figura 4.1 -	Superfícies representando as planícies e o curso d'água do rio Pomba			
	na área de interesse	66		
Eigung 4.2	Perfil da elevação da lâmina d'água no contorno de entrada do modelo			
Figura 4.2 -	obtidos no site da ANA	67		
Figura 4.3 -	Condições de contorno de entrada do modelo	67		
Figura 4.4 -	Condições de contorno de saída do modelo	68		
Figura 4.5 -	Condição inicial do modelo			
Figura 4.6 -	Coeficiente de rugosidade para as superfícies que caracterizam o rio e			
	a planície	69		
Figura 4.7 -	Malha gerada para a região de interesse	69		
Figura 4.8 -	Representação da malha de cálculo após a associação dos dados			
	topográficos	70		
Figura 4.9 -	Dados referentes ao período de tempo da simulação	70		
Figura 4.10 -	Perfil da profundidade ao longo do tempo na ponte Raul Veiga			
Figura 4.11 -	Perfil da elevação ao longo do tempo na ponte Raul Veiga			
Figura 4.12 -	Mapa de profundidade no instante em que a onda de cheia atinge seu			
	pico em 235 000 s, aproximadamente	72		
Figura 4.13 -	Mapa de elevação no instante em que a onda de cheia atinge seu pico			
	em 235 000 s, aproximadamente	73		
Figura 4.14 -	Mapa de máximo referente à profundidade do rio na região de interesse			
Figura 4.15 -	Mapa de máximo referente à elevação da lâmina d'água na região de			
	interesse	74		

Figura 4.16 -	Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga, variando o tamanho de	
	elementos da malha da planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a	
	malha do rio constante	75
Figura 4.17 -	Perfil da elevação d'água na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos	
	elementos da malha da planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a	
	malha do rio constante	76
Figura 4.18 -	Mapa de máximo da profundidade variando o tamanho dos elementos	
	da malha da planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a malha do rio	
	constante	77
Figura 4.19 -	Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água variando o tamanho	
	dos elementos da malha de planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a	
	malha do rio constante	78
Figura 4.20 -	Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos	
	elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha da	
	planície constante	79
Figura 4.21 -	Perfil da elevação da água na ponte Raul Veiga, variando o tamanho	
	dos elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha	
	da planície constante	80
Figura 4.22 -	Mapa de máximo variando o tamanho dos elementos da malha do rio	
	em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície constante	81
Figura 4.23 -	Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água variando o tamanho	
	dos elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha	
	da planície constante	82
Figura 4.24 -	Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos	
	elementos da malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da	
	planície em 10 metros	83
Figura 4.25 -	Perfil da elevação d'água na ponte Raul Veiga, variando o tamanho da	
	malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície em 10	
	metros	84
Figura 4.26 -	Mapa de máximo da profundidade variando o tamanho dos elementos	
	da malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície em 10	
	metros	85

Figura 4.27 -	Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água variando o tamanho	
	dos elementos da malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da	
	planície em 10 metros	86
Figura 4.28 -	Superfícies representando as planícies, rio, edificações e vias de área	
	urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua	87
Figura 4.29 -	Superfícies representando as planícies, rio e vias da área urbanizada da	
	cidade de Santo Antônio de Pádua, com a área das	
	construções/edificações desconsideradas	87
Figura 4.30 -	Representação do tamanho dos elementos da malha e vista	
	tridimensional da mesma para o Cenário A	88
Figura 4.31 -	Representação do tamanho dos elementos da malha e vista	
	tridimensional da mesma para o Cenário B	88
Figura 4.32 -	Representação do tamanho dos elementos da malha e vista	
	tridimensional da mesma para o Cenário C.	89
Figura 4.33 -	Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga para os Cenários A, B e C	
	simulados	89
Figura 4.34 -	Perfil da elevação d'água na ponte Raul Veiga para os Cenários A, B e	
	C simulados	90
Figura 4.35 -	Mapa de máximo de profundidade para os Cenários A, B e C simulados	
Figura 4.36 -	Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água para os cenários A, B	
	e C simulados	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Relação dos principais conceitos sobre inundação gradual		
Tabela 2.2 -	Relação dos principais conceitos sobre inundações bruscas		
Tabela 2.3 -	Alternância das inundações e suas classificações em cada ano em		
	Santo Antônio de Pádua	42	
Tabela 2.4 -	Resumo dos eventos climáticos e inundações no município de Santo		
	Antônio de Pádua	45	

1 INTRODUÇÃO

O homem vem modificando o meio em que vive, de modo a "adequá-lo" às suas necessidades, o que repercute em alterações do ciclo hidrológico. Por exemplo, o barramento de rios que modifica o regime de escoamento, aumenta a evaporação e eleva o nível das águas subterrâneas (lençol freático), além de outras consequências sobre a vida marinha. Outro exemplo é a impermeabilização do solo devido à urbanização, a qual faz com que a infiltração se dê em menor quantidade e aumenta o escoamento superficial, causando alagamentos. O desmatamento é outro fator a ser citado, pois, na medida em que diminui a interceptação, deixa os solos expostos à ação das chuvas e do escoamento superficial, causando erosão e transporte de nutrientes e sedimentos para rios e lagos, como, por exemplo, o lançamento de efluentes de uma indústria em pequena corrente de água que irá influir na qualidade da água de todos seus demais cursos d'água.

Do ponto de vista científico:

Além de alterar as fases do ciclo hidrológico, as atividades antrópicas têm uma série de repercussões sobre o meio ambiente, tais como: contaminação de corpos d'água, devido ao lançamento de efluentes de origem industrial, agrícola ou doméstico(esgoto das cidades); introdução de espécies exóticas (espécies que não eram encontradas na região e foram introduzidas pelo homem); ocupação de planícies de inundação; mudanças globais no clima; desmatamento; contaminação do ar, ocasionando chuvas ácidas, etc.(PAZ, 2004, p.11).

Todos os impactos e ações em um ponto da bacia hidrográfica poderão repercutir em toda a sua área a jusante. Em particular, quatro indicadores são utilizados, geralmente, para descrever a rede de drenagem de uma bacia: ordem dos cursos d'água, densidade de drenagem, extensão média do escoamento superficial e sinuosidade do curso d'água principal.

Além disso, é importante ressaltar que as superfícies vertentes e a rede de drenagem estão em constante interação. Entretanto, quando ocorre cheia no rio, este extravasa da sua calha principal, alcançando a planície de inundação, ocorrendo fluxo inverso de água e sedimentos (no sentido calha do rio para planície de inundação).

Diante desse contexto, a utilização de softwares desenvolvidos para a modelagem de corpos hídricos, pode auxiliar na investigação de eventos de cheias e inundações em bacias

hidrográficas. Cabe ressaltar, porém, que a escolha do software depende dos objetivos a serem alcançados na simulação a ser realizada. Logo, na literatura, é possível encontrar diversos softwares destinados a problemas diversos.

Pode-se citar, o *Delft3D*, o qual é um software de código aberto, um modelo numérico interdisciplinar, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Deltares (Delft, Holanda) utilizado para modelagem hidrodinâmica. É amplamente usado pela comunidade que trabalha com modelagem para responder a problemas e pesquisas em ambientes costeiros e de rios. As aplicações do *Delft3D* incluem: modelagem hidrodinâmica, modelagem de ondas e modelagem de qualidade de água.

Costa (2018) o utilizou para reconstruir a pluma de rejeitos de minério de ferro, na região costeira adjacente do rio Doce-ES, e sua dispersão no ambiente marinho para o período de simulação de novembro de 2015 a fevereiro de 2016. Os resultados numéricos de elevação da maré foram registrados e comparados com as seis principais componentes harmônicas fornecidas pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) nas estações localizadas na área de estudo. E verificou-se boa concordância, com erros inferiores a 24% para as amplitudes e 32% para as fases.

Xavier (2019), também utilizou este mesmo software para simular a circulação hidrodinâmica durante um ano climatológico e um ano seco. Para forçar o modelo foram usados os padrões de vento local e o fluxo climatológico de água em superfície e de vazões fluviais climatológicas. Os resultados de nível do mar foram validados com harmônicos de maré locais e as velocidades do modelo foram validadas com dados *in situ*, coletadas no ano de 2009. O modelo apresentou boa correlação para os componentes de maré, corrente longitudinal e residual.

Outro exemplo a ser mencionado é o sistema MOHID, o qual começou a ser desenvolvido desde 1985 pelo grupo MARETEC do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, podendo ser considerado um laboratório numérico. O código-fonte do modelo é aberto, acessível através da página do MOHID. É um sistema integrado para o fluxo de água que, inicialmente, consistia em três módulos principais: WATER para a dinâmica de fluidos tridimensionais, LAND para a hidrologia e SOIL para o fluxo de águas subterrâneas.

Juliano et al. (2012), utilizaram este software para simular o processo de deriva oceânica na Bacia de Campos-RJ, com o intuito de estudar problemas ambientais com petróleo. Enquanto Telles (2014), em sua tese de Doutorado, o utilizou para a modelagem do comportamento hidráulico dos principais rios que compõem a bacia hidrográfica do rio Bengalas, localizada no município de Nova Friburgo-RJ, a qual abrange a área mais urbanizada da referida cidade. Já,

para a calibração do modelo foram adotados alguns métodos de otimização, mais precisamente, os algoritmos de Luus-Jaakola (LJ) e Colisão de Partículas (do inglês (*Particle Collision Algorithm* - PCA), acoplados ao referido sistema, com o intuito de determinar os principais parâmetros necessários à modelagem de corpos hídricos, bem como suas bacias hidrográficas. Foram utilizados dados topográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponibilizados pela prefeitura após a elaboração do Plano de Águas Pluviais (PAP) da região de interesse. Os resultados apresentaram-se importantes e qualitativamente satisfatórios do ponto de vista de auxílio à tomada de decisões.

Outro software constantemente utilizado para a modelagem de corpos hídricos é o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA), o qual é um programa computacional desenvolvido em conjunto pela Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica do Programa de Engenharia de Oceânica e pela Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas & Computação, ambos da Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sob os auspícios da Fundação COPPETEC. Este programa é gratuito, empregado em modelagem hidrodinâmica, de transporte de sedimentos e de qualidade da água, entretanto, necessita que sejam adquiridos independentemente dois outros programas comerciais (Surfer e Grapher) para o seu funcionamento.

Andrade (2018) utilizou o SisBaHiA para realizar simulações hidrodinâmicas, modelos de taxa de renovação e idade do volume de água, e modelos de qualidade da água para ampliar o conhecimento sobre o sistema estuarino da Baía de Guanabara, situado no município de Rio de Janeiro, ao passo que, Carvalho (2018), com o auxílio do SisBaHiA, analisou o comportamento hipersalino da lagoa de Araruama, no estado do Rio de Janeiro, frente a interferências naturais e antrópicas utilizando modelagem hidrodinâmica e de transporte de sal.

Pode-se citar, ainda, o software Flownex®, utilizado para sistemas de fluidos complexos, dando aos usuários a capacidade de simular sistemas com precisão e rapidez. Pode-se analisar a variação da pressão no escoamento, bem como a transferência de calor para os componentes conectados de um sistema completo em estado estacionário e transiente, como bombas ou compressores, tubulações, válvulas, tanques e trocadores de calor.

Muksin e Syaiful (2019) simularam os componentes de um Reator de Energia Experimental (do inglês *Experimental Energy Reactor* EER) com 10 megawatts, usando os softwares Flownex e LabVIEW para otimizar os resultados. O software Flownex foi usado para realizar o processo de simulação e o software LabVIEW foi usado para exibir o resultado da

simulação feita pelo Flownex com o intuito de facilitar o seu uso pelo usuário. Esse reator servirá como piloto para os próximos reatores de energia que serão construídos na Indonésia.

Jims e Chauhan (2019), por sua vez, usaram o software Flownex para correspondência de componentes e investigação de um motor. Os resultados da simulação mostraram que o software em questão pode ser efetivamente usado para projetar e simular o funcionamento de um motor de turbina a gás. Tais resultados serão usados para investigar a integração bemsucedida de compressores modificados e estágios de turbina nos motores turbojato.

Por fim, pode-se mencionar o software IBER. Carmo et al. (2019) utilizaram o software IBER para a execução da modelagem hidráulica dos perímetros de inundação para dois eventos de cheia na foz do rio Sabor, em Portugal, e compararam os resultados com o método hidro histórico. Concluiu-se que ambas as metodologias são válidas, podendo mesmo ser complementares, de forma a melhorar a interpretação dos eventos.

Martins et al. (2019) adotaram o software IBER para a delimitação de áreas inundáveis no centro urbano de Amarante, no norte de Portugal, bem como a determinação de outros parâmetros descritivos da inundação: profundidade da água e velocidade do fluxo. A aplicação da modelagem hidráulica no estudo das cheias e inundações revelou-se uma mais-valia, pois é um processo que gera resultados fiáveis que permitem avaliar as áreas críticas à ocorrência destes eventos, através da elaboração de cartográfica que se assume como um importante instrumento de suporte a um adequado ordenamento do território. Contudo, verificou-se que a modelagem hidráulica está muito dependente dos dados de base, nomeadamente, de um modelo digital de superfície (MDS) pormenorizado.

Como descrito nos parágrafos anteriores, é possível perceber a diversidade de softwares voltados para distintas aplicações. Em particular, nesse trabalho, é utilizado o software IBER para a modelagem de eventos de inundações ocorridos no município de Santo Antônio de Pádua, situado na região Noroeste do estado do Rio de Janeiro, o qual passou por diversas cheias do rio Pomba causando inundações na referida municipalidade, em que as mais recentes ocorreram nos anos de 2012, 2018, 2020 e 2022, causando diversos prejuízos para a economia da cidade.

1.1 Justificativa

A produção de conhecimentos no meio acadêmico é de grande relevância, principalmente quando esta se encontra associada à busca de soluções de problemas de ordem pública e tem a possibilidade de contribuir com órgãos direcionados à gestão da administração

pública que atua diretamente no enfrentamento de desastres e fenômenos naturais, como as enchentes e inundações, as quais ocorrem em muitas cidades do país.

Cabe salientar, que o constante fenômeno de enchente e inundações ocorridas no município de Santo Antônio de Pádua, localizado no Estado do Rio de Janeiro, tem causado muitos prejuízos de diversas ordens, sendo eles econômicos, sociais, ambientais e de saúde pública, os quais vêm desestruturando a harmonia social devido ao medo constante da população, em períodos de chuvas, de se tornarem vítimas da natureza.

A incerteza de quando será a próxima cheia e a extensão da inundação por ela causada implica em uma tensão psicológica desnecessária, uma vez que o fenômeno pode ser compreendido e, possivelmente, controlado por meio de adoção de medidas pontuais e fundamentadas em um estudo técnico e científico específico do caso.

Dessa forma, a justificativa deste estudo tem como base uma da análise de eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ 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.

Por outro lado, a escolha do software IBER ser dá pelo fato do mesmo tratar-se de um software amplamente aplicado na hidrodinâmica fluvial, simulação de ruptura de barragem, avaliação de zonas de inundação, cálculo de transporte de sedimentos e fluxo de maré em estuários, possuindo, ainda, interface amigável e de distribuição gratuita.

1.2 Objetivos

Nessa 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, realizar uma análise de eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ utilizando o software IBER com o propósito de aplicação prática no que se refere à identificação dos principais vetores causadores de tais ocorrências, bem como a proposição de soluções com intuito de amenizar os danos gerados ao município e sua população.

1.2.2 Objetivos Específicos

No que se refere aos objetivos específicos deste trabalho, pode-se citar:

- Discorrer sobre os fenômenos naturais envolvendo o ciclo hidrológico, bacias hidrográficas e rede de drenagem.
- Descrever o problema de inundações sobre um contexto global.
- Caracterizar a região de estudo, ou seja, o município de Santo Antônio de Pádua e o rio Pomba.
- Analisar alguns eventos críticos envolvendo as cheias em Santo Antônio de Pádua utilizando software IBER.
- Elaborar e analisar mapas de inundações envolvendo a profundidade e elevação máximas dos eventos ocorridos e simulados no município de Santo Antônio de Pádua.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizado, como meio de investigação, uma pesquisa bibliográfica, sendo caracterizada pelo fato de que as fontes para sua realização irão abranger "[...] toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema estudado, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, materiais cartográficos, etc." (LAKATOS; MARCONI, 2001, p.183).

Nesse sentido, serão consultados materiais com informações obtidas em periódicos, Google Acadêmico, cartilhas e manuais do Ministério da Educação, livros, artigos, dissertações e teses disponíveis no portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), relacionados com o tema abordado neste estudo.

Ressalta-se que esta pesquisa ainda será de caráter descritivo, uma vez que a mesma "não têm o compromisso de explicar os fenômenos que descreve, embora sirva de base para tal explicação" (VERGARA, 2000, p.47) e qualitativa, tendo em vista que, nesta modalidade, conforme explica Silva (2014, p.20):

Não há uma preocupação com medidas, quantificações ou técnicas estatísticas de qualquer natureza. Busca-se compreender, com base em dados qualificáveis, a realidade de determinados fenômenos, a partir da percepção dos diversos atores sociais (SILVA, 2014, p.20).

Dessa forma, o caráter qualitativo pauta-se em uma análise bibliográfica, considerando que este tipo de ação "enquanto exercício de pesquisa, não se apresenta como uma proposta rigidamente estruturada" (GODOY, 1995, p.21), uma vez que, permite ao pesquisador dar continuidade às pesquisas e propor trabalhos que explorem novos enfoques.

O caráter qualitativo da pesquisa ainda se baseia no fato de que os dados coletados para realizar uma análise de eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ, utilizando o software IBER, foram obtidos por meio de pesquisas anteriores e de conhecimentos teóricos para a escolha de variáveis a serem observadas.

Dessa forma, a descrição das variáveis e dos fenômenos apresentados neste estudo, sem a ocorrência de interferência em sua manipulação ou resultados, se apresenta como uma característica de uma pesquisa descritiva tal como assinalado por Vergara (2000), ou seja, neste estudo apenas foi descrito como ocorre os eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ e os resultados da análise destes, utilizando-se o software IBER como ferramenta.

Insta salientar, ainda, que a pesquisa, além de seu caráter descritivo e qualitativo, tem a natureza de pesquisa aplicada, uma vez que, esta tem como escopo, a "geração de conhecimento para aplicação prática e imediata, dirigidos à solução de problemas específicos envolvendo os interesses locais, territoriais e regionais" (SILVA; MENEZES, 2001, p.16) e, esses interesses, estão ligados a soluções para o enfrentamento dos problemas decorrentes dos eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ.

1.4 Organização do Trabalho

Neste capítulo foi apresentada uma breve introdução sobre o problema de inundações, bem como foram descritos os objetivos geral e específicos, seguido de uma justificativa e metodologia para a realização da pesquisa.

Na sequência, no Capítulo 2, são trazidas informações sobre os fenômenos naturais relacionados ao ciclo hidrológico com o intuito de elucidar o que seriam as inundações e as enchentes além de uma caracterização do local e objeto de estudo, neste caso, o rio Pomba e o município de Santo Antônio de Pádua, incluindo o histórico das principais inundações e enchentes sofridas pelo município e a caracterização da bacia hidrográfica que forma rio Pomba.

Já no Capítulo 3, é exposto o modelo matemático regido pelas equações de Saint Venant, acoplado a um software de simulação hidrodinâmica, o IBER, direcionado a análise dos eventos

extremos que podem vir a ocorrer na bacia hidrográfica do rio Pomba para a prevenção de inundações no município de Santo Antônio de Pádua, ocasionadas pela elevação dos níveis d'água do rio Pomba. Também são apresentadas as informações e dados obtidos com a pesquisa.

Em relação ao Capítulo 4, foram analisados eventos de inundações e a influência do modelo digital da região de estudos com o propósito de expor os resultados finais encontrados nesta pesquisa para que, no final deste estudo, fossem apresentadas as conclusões finais e propostas de novos trabalhos nesta área de estudo, conforme exposto no Capítulo 5.

Encerra-se este trabalho apresentando-se as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do mesmo.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO

Este capítulo tem como um de seus propósitos trazer informações sobre os fenômenos naturais envolvendo o ciclo hidrológico com os quais possa-se elucidar o que seriam as inundações e as enchentes, a partir do ponto de vista da literatura especializada no tema em questão.

O capítulo também busca caracterizar o local e objeto de estudo, neste caso, o rio Pomba e o município de Santo Antônio de Pádua, trazendo informações históricas e geográficas, tais como as principais inundações e enchentes sofridas pelo município e a caracterização da bacia hidrográfica que forma rio Pomba.

2.1 Contexto Histórico e Preliminar

Antes de abordar sobre os fenômenos naturais envolvendo o ciclo hidrológico, bacias hidrográficas e rede de drenagem, é interessante que se tenha em mente que a humanidade historicamente procurou os vales e leitos dos rios para construir sua sociedade, e foi neste ambiente que surgiram grandes civilizações, como os egípcios no vale do rio Nilo e os hindus no vale do rio Indo (PONCE, 2015).

Partindo desse pressuposto, pode-se entender que durante o processo de desenvolvimento da humanidade, a ocupação antrópica sempre esteve presente, tendo em vista que o homem precisou se estabelecer em diversas áreas diferentes na procura de melhores condições de vida. Dessa forma, há de notar que as margens dos grandes rios sempre foram lugares mais comuns de assentamento humano, podendo ser observado, na própria história, o fato de que o berço da civilização humana ter se estabelecido as margens dos rios Tigre e Eufrates, conhecida como mesopotâmia, a qual, segundo Netto (2009), lugar em que hoje em dia não se considera:

[...] uma região muito especial a não ser pelo petróleo que possui. Na antiguidade era um lugar privilegiado para a sociedade humana. Na época das cheias os rios Tigre e Eufrates, transbordavam e provocavam enchentes em sua planície. Quando as águas retornavam ao leito normal, uma rica camada de "húmus" (matéria orgânica que se origina da decomposição de restos de animais e vegetais), ficava depositada sobre a terra tornando-a fértil e própria para o cultivo. Irrigado e fertilizado pelas enchentes, o solo mesopotâmico possibilitava a produção de grande parte dos legumes e grãos.

Além disso, os rios cheios de cardumes favoreciam a pesca. Havia ainda a caça abundante nas margens dos rios e condições para a criação de animais. O bom aproveitamento dessas vantagens naturais dependia, entretanto do trabalho e do planejamento dos homens, com o esforço coletivo dos membros da comunidade (NETTO, 2009, p.3).

O fato é que a relação entre o homem e a natureza se constituiu a milhares de anos, porém, a mesma passou por diversas transformações ao longo do tempo. De acordo com Mendonça (2005, p.48), "a espécie *Homo sapiens*, como nós, surgiu na Terra há cerca de 195 mil anos. Vivendo em um clima semelhante ao atual, nossa espécie se desenvolveu nos últimos 10 mil anos [...]".

Destaca-se que autores como Gonçalves (2008) defendem a ideia de que no princípio:

[...] as relações do homem com a natureza eram permeadas de mitos, rituais e magia, pois se tratava de relações divinas. Para cada fenômeno natural havia um deus, uma entidade responsável e organizadora da vida no planeta: o deus do sol, do mar, da Terra, dos ventos, das chuvas, dos rios, das pedras, das plantações, dos raios e trovões etc. O medo da vingança dos deuses era o moderador do comportamento dessas pessoas, impedindo uma intervenção desastrosa, ou, sem uma justificativa plausível ante a destruição natural (GONÇALVES, 2008, p.172).

Diante de tal comportamento humano, pode-se dizer que inicialmente a relação estabelecida entre o homem e a natureza era menos agressiva, pois o mesmo sobrevivia de seus elementos, aprendendo com a mesma a fabricar suas próprias ferramentas, uma vez que, sua inteligência ainda era primitiva, não exercendo o poder dominador sob o meio (GONÇALVES, 2008).

Nesse período, ainda segundo o autor supracitado, não havia a criação de animais e o cultivo de plantas, pois o homem se organizava em pequenas tribos, apresentando o hábito de caçar e coletar, sendo nômades, uma vez que se deslocavam de um lugar para o outro em busca de novos recursos para sua sobrevivência (GONÇALVES, 2008).

Conforme aponta Mendonça (2005), a relação entre o homem primitivo e a natureza era menos agressiva, devido:

[...] a chamada Pré-História, a experiência de inúmeros povos foi de harmonia, de equilíbrio, de respeito, de parceria. Há poucas evidências disso – mas as que existem são bastante convincentes –, pois esses povos, que não viviam sob a lógica da

dominação, não erigiram grandes monumentos, nem castelos, nem desejaram deixar marcas de sua 'grandiosidade' (MENDONÇA, 2005, p.50).

É importante ressaltar que na pré-história, o homem se sentia como membro da natureza, sendo ambos um só, porém, conforme o desenvolvimento da inteligência, assim como do aprimoramento de suas técnicas, essa relação começou a se modificar.

Tal mudança no estilo de vida dos seres humanos foi impulsionada principalmente pela descoberta da agricultura e da domesticação de alguns animais. De uma vida nômade, isto é, mudando de um lado para o outro em busca de comida e água na natureza, este pode pela primeira vez fixar-se em determinado local para cultivar seu próprio sustento, baseado em uma agricultura simples, na qual, podia ser realizada com o apoio de sua família e de seu grupo, formando assim, as primeiras sociedades (HUBERMAN, 2009).

Sendo assim, vivendo nas margens de grandes rios ou de seus afluentes, o homem conviveu com as enchentes e inundações e, por muito tempo, utilizando isso a seu favor, como é o caso dos egípcios, os quais enfrentavam constantemente as cheias do rio Nilo. No entanto, conforme explica Ponce (2015), em um determinado momento da história e das primeiras observações astronômicas, alguém aprendeu que as cheias eram cíclicas, surgiam no mesmo período do ano e, quando as águas baixavam, um solo fértil ficava a disposição para o plantio.

Ainda segundo o autor supracitado, mesmo sabendo qual era a época do ano, marcada pela estrela Sírios no céu, era preciso saber o momento exato em que as águas começariam a subir e voltar ao normal para que, dessa forma, a agricultura fosse mais eficiente e a terras marginais do rio fossem melhor aproveitadas. É nesse momento que a inventividade humana cria um aparelho até hoje utilizado, sendo este o nilômetro¹, assim descrito:

Havia no Egito antigo um dispositivo admirável para a época, chamado nilômetro, que permitia conhecer com boa exatidão o crescimento das águas do Nilo e prognosticar o volume da futura colheita. De acordo com essas informações, que eram mantidas em segredo, os sacerdotes aconselhavam os lavradores (PONCE, 2015, p.33).

Tal como observado nas palavras acima, o rio para a sociedade egípcia tinha uma enorme importância tal como suas cheias e o conhecimento exato de quando essas iriam ocorrer

¹O nilômetro consistia em tipo de um poço de grande largura, o qual, possuía uma escada que levava até ao nível do lençol freático e, dessa forma, fosse possível medir as flutuações do nível da água do rio Nilo e prever a intensidade das cheias.

para que, assim, fosse um evento controlado e a favor da população dependente da agricultura de subsistência, tornando praticamente obrigatório o conhecimento capaz de subsidiar, conforme explica Ponce (2015), a:

[...] necessidade de centralizar o controle dos canais de irrigação. A medida que a prática de represar as águas do Nilo foi-se estendendo, mais deve ter-se acentuado a necessidade de um organismo que tivesse a seu cargo a difícil missão de dirigir e controlar essas tarefas, pois a abertura extemporânea das comportas poderia fazer com que as águas baixassem antes da saturação adequada dos terrenos altos, e destruíssem, de passagem, as obras situadas em terrenos mais baixos (PONCE, 2015, p.23).

Segundo Ponce (2015), a sociedade egípcia, assim como muitas outras que se desenvolveram as margens de grandes rios, precisou aprender a dominar os fenômenos cíclicos de cheias desses rios em seu benefício, para que, assim, pudessem prever as cheias e aplicar técnicas que pudessem contê-las na medida em que se apresentassem além do esperado ou antecipassem, por algum motivo da força da natureza, a sua chegada antes do programado. Esses acontecimentos acima descritos são resultados dos chamados fenômenos naturais envolvendo o ciclo hidrológico, as bacias hidrográficas e rede de drenagem, os quais são abordados nos parágrafos seguintes.

Os fenômenos naturais são todas as manifestações da natureza que não necessitam da ação do homem para que ocorram e também não são provocadas por ela. Dessa forma, os fenômenos naturais podem ser classificados como qualquer evento tal como aqueles que envolvem o ciclo hidrológico (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

No que se refere ao ciclo hidrológico, os autores Miranda, Oliveira e Silva (2010) ao apresentarem sua posição conceitual sobre o tema em questão, se manifestam da seguinte forma:

[...] o Ciclo Hidrológico se constitui de uma sucessão de vários processos na natureza pelos quais a água inicia o seu caminho indo de um estágio inicial até retornar a posição primitiva. Este fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, é impulsionado fundamentalmente pela energia radiante e associado à gravidade e à rotação terrestre. Estima-se que cerca de 10% do total de vapor seja reciclado diariamente. A superfície terrestre abrange os continentes e os oceanos, participando do ciclo hidrológico a camada porosa que recobre os continentes (solos, rochas) e o reservatório formado pelos lagos, rios e oceanos. Parte do ciclo hidrológico é constituída pela circulação da água na própria superfície

terrestre, isto é; a circulação de água no interior e na superfície dos solos e rochas, nos lagos e demais superfícies líquidas e nos seres vivos (animais e vegetais) (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010, p.110).

Conforme observado nos apontamentos descritos anteriormente, o ciclo hidrológico seria aquele em que a água passa diariamente por diversos estágios em volta do globo terrestre, ou seja, a água em estado líquido evapora dos rios, oceanos e lagos passando para o estado gasoso por meio do qual sobe até determinado ponto da atmosfera, onde esta é condensada e volta novamente ao seu estado líquido (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

Ainda segundo os autores supracitados, devido à força gravitacional e a rotação da terra, a água condensada na atmosfera proveniente do vapor de água de determinada região, poderá vir a precipitar em forma de chuva em ponto diverso do planeta, contribuindo para a formação de lagos, rios e reservatórios subterrâneos a partir do momento que a mesma, ao precipitar, encontra o ambiente propício para tal como é a camada porosa da terra que recobre os continentes (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

Na Figura 2.1 é feita uma representação do que seria o ciclo hidrológico a partir da descrição apresentada acima.

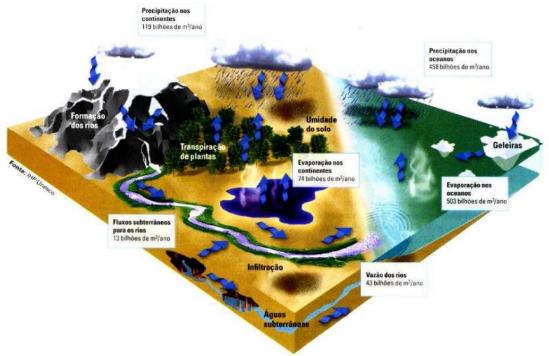


Figura 2.1 - Representação do ciclo hidrológico.

Fonte: Carvalho e Silva (2006).

Seguindo com os conceitos preliminares, destacam-se as bacias hidrográficas, sobre as quais os autores Shiavetti e Camargo (2002) em sua obra "Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações" em que aborda o assunto em questão, explicam que:

O conceito de Bacia Hidrográfica (BH) tem sido cada vez mais expandido e utilizado como unidade de gestão da paisagem na área de planejamento ambiental. Na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de BH envolve explicitamente o conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes. Embora tecnicamente o conceito implícito no termo seja preciso, podem existir variações no foco principal, conforme a percepção dos técnicos que o utilizam em seus estudos (SHIAVETTI; CAMARGO, 2002, p.17).

Dentro deste contexto, as bacias hidrográficas seriam, na verdade, a confluência de corpos d'água direcionados a formação de um rio principal, o qual é regado por pequenos rios que seguem em sua direção a partir de uma localidade que estaria servindo como uma espécie de receptora das águas das chuvas.

Após a recepção das águas das chuvas, estas são direcionadas a um curso específico por meio da rede de drenagem que constitui em um caminho natural ou artificial de escoamento das águas durante as cheias e que está intimamente ligada a bacia hidrográfica, uma vez que, segundo informam os autores Shiavetti e Camargo (2002) "ela compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de cursos d'água confluentes que formam uma rede de drenagem até o rio principal ou de base, até que o mesmo atinja o seu exutório".

2.2 Inundações

Assim como observado na Seção 2.1, os seres humanos buscaram nos leitos dos grandes rios abrigo para construírem suas civilizações a partir de fácil acesso a recurso hídrico, bem como para irrigação e terras férteis para a agricultura. No entanto, um problema também foi reportado, que é o caso dos períodos de cheias desses rios, os quais são responsáveis por causar inundações e enchentes.

De forma didática, os autores Amaral e Moni (2020) explicam que, apesar de serem utilizados frequentemente como sinônimos, os termos inundação e enchente possuem significados diferentes. Conforme explicam os autores, "a inundação é o processo que ocorre

quando as águas do rio transbordam em função das chuvas e ocupam a área ao lado do rio, que são chamadas de planícies fluviais ou várzeas" enquanto que a "enchente (ou cheia) é o fenômeno em que as águas chegam até o ponto mais alto do rio, mas não transbordam" (AMARAL; MONI, 2020, p.10).

Dentro deste contexto, na Figura 2.2 é apresentado um esquema no qual são ilustradas as diferenças entre os termos inundação e enchente.



Figura 2.2 - Esquema ilustrativo das diferenças entre os termos inundação e enchente. Fonte: Rosa (2011).

Ainda relacionado aos conceitos do que seriam as inundações, os autores Goerl e Kobiyama (2021), ao se manifestarem sobre o assunto, advertem que as inundações podem ser denominadas como sendo inundações graduais devido ao modo como ocorrem e que também são definidas como *flood* ou *flooding* em língua inglesa. Para mais esclarecimentos, os autores trazem uma tabela em que apresentam um *rol* de definições desta, a partir do ponto de vista de diversos outros pesquisadores, conforme pode ser observado na Tabela 2.1.

Percebe-se que nas conceituações apresentadas na Tabela 2.1, as inundações graduais são aquelas que ocorrem em decorrência do aumento contínuo ou gradual das águas dos rios no momento em que este passa a receber maior fluxo hídrico de chuvas sazonais ou mesmo, a depender da geografia e clima do local, bem como do derretimento do gelo vindo das montanhas (GOERL; KOBIYAMA, 2021).

Tabela 2.1 - Relação dos principais conceitos sobre inundação gradual.

TERMO	AUTOR	DEFINIÇÃO
Flood	NFIP (2005)	Uma condição geral ou temporária de parcial ou completa inundação de dois ou mais acres de uma terra normalmente ou duas ou mais propriedades (uma das quais é a sua propriedade), proveniente da inundação de águas continentais ou oceânicas.
Flood	National Disaster Education Coalition (2004)	Inundações ocorrem nas chamadas planícies de inundação, quando prolongada precipitação por vários dias, intensa chuva em um curto período de tempo ou um entulhamento de gelo ou de restos, faz com que um rio ou um córrego transbordem e inundem a área circunvizinha.
Flood	NWS/NOAA (2005)	A inundação de uma área normalmente seca causado pelo aumento do nível das águas em um curso d'água estabelecido, como um rio, um córrego, ou um canal de drenagem ou um dique, perto ou no local onde as chuvas precipitaram.
Flood	FEMA (1981)	Inundação resulta quando um fluxo de água é maior do que a capacidade normal de escoamento do canal, ou quando as águas costeiras excedem a altura normal da maré alta. Inundações de rios ocorrem devido ao excessivo escoamento superficial ou devido ao bloqueio do canal.
Inundações Graduais ou Enchentes	Castro (1996)	As águas elevam-se de forma paulatina e previsível, mantém em situação de cheia durante algum tempo e, a seguir, escoam-se gradualmente. Normalmente, as inundações graduais são cíclicas e nitidamente sazonais.
River Flood	Choudhury et al. (2004)	Inundações de rios ocorrem devido às pesadas chuvas das monções e ao derretimento de gelo nas áreas a montante dos maiores rios de Bangladesh. O escoamento superficial resultante causa a elevação do rio sobre as suas margens e propagando água sobre planície de inundação.
Inundações Ribeirinhas	Tucci e Bertoni (2003)	Quando a precipitação é imensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, grande parte do volume escoa para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento. O excesso de volume que não consegue ser drenado ocupa a várzea, inundando, de acordo com a topografia, áreas próximas aos rios.
Flood	Office of Thecnology Assessment (1980)	Uma inundação de terra normalmente não coberta pela água e que são usadas ou utilizáveis pelo homem.
River Flood	Kron (2022)	É o resultado de intensa e/ou persistente chuva por alguns dias ou semanas sobre grandes áreas algumas vezes combinadas com neve derretida. Inundações de rios elevam-se gradualmente, ainda assim, algumas vezes dentro de um curto período.

Fonte: Goerl e Kobiyama (2021).

Outra definição de inundação apresentada pelos autores supracitados trata-se das inundações que ocorrem de maneira repentina, e assim, propiciam um tempo muito curto para que seja dado, de forma hábil, um alarme ou mesmo um alerta direcionado a prevenção ao local previsto de sua ocorrência, haja vista que:

[...] as inundações bruscas possuem características muito diferentes das inundações graduais. Como o próprio nome diz, elas são bruscas, ou seja, devem ocorrer no tempo próximo ao momento da ocorrência do evento que as causam. Outra característica particular deste tipo de inundação é o pouco ou nenhum tempo de alerta. Por elas se desenvolverem bruscamente, geralmente atingem as áreas susceptíveis a ela de surpresa, não tendo tempo hábil para os moradores tomarem os devidos procedimentos para se protegerem ou salvar os seus bens (GOERL; KOBIYAMA, 2021, p.6).

Sobre as inundações bruscas, Bacelar (2017), em seu estudo sobre o tema, apresenta alguns apontamentos conceituais, dentre eles, aquele apresentado pelo Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos o qual, segundo o autor:

[...] define as inundações bruscas como um fluxo rápido de água já extravasada para uma área normalmente seca, ou uma rápida elevação do nível de água em um córrego ou riacho, acima do nível de inundação predeterminado, no prazo de seis horas a partir do evento causal (por exemplo, chuvas intensas, falha de represa, compotas de gelo). No entanto, o limite de tempo real pode variar em diferentes partes (bacias) do país. Uma inundação em curso pode intensificar as inundações bruscas nos casos em que chuvas intensas resultem em um aumento rápido dos níveis de água (BACELAR, 2017, p.7).

Bacelar (2017) busca, nesta exposição conceitual, introduzir uma ideia de como seria uma inundação brusca e quais seriam as suas possíveis causas de ocorrência e seu prazo de duração, uma vez que seria um tipo de inundação, ao se comparar com as demais, de curto prazo.

A percepção de inundações bruscas mencionada no parágrafo anterior, é coerente com aquelas apresentadas no *rol* de conceitos realizados por Goerl e Kobiyama (2021) em que estes sintetizam o ponto de vista de diversos autores em uma tabela conceitual sobre o tema, conforme descrito na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Relação dos principais conceitos sobre inundações bruscas.

TERMO AUTOR DEFINIÇÃO			
Flash Flood	National Disaster Education Coalitation (2004)	Inundações bruscas ocorrem dentro de 6 horas após uma chuva ou após a quebra de barreira ou reservatório, ou após uma súbita libertação de água armazenada pelo atolamento de restos ou gelo.	
Flash Flood	NWS/NOAA (2005)	Uma inundação é causada pela pesada ou excessiva chuva em um curto período de tempo, geralmente menos de 6 horas. Também, às vezes, uma quebra de barragem pode causar inundação brusca, dependendo do tipo de barragem e o período de tempo que ocorre com a quebra.	
Flash Flood FEMA (1981)		Inundações bruscas usualmente consistem de um rápido aumento na elevação da superfície da água com uma anormal alta velocidade das águas, frequentemente criando uma parede de águas movendo-se canal abaixo ou pela planície de inundação. As inundações bruscas geralmente resultam da combinação de intensa precipitação, "inclinações íngremes", uma pequena bacia de drenagem, e uma alta proporção de superfícies impermeáveis.	
Flash Flood	Choudhury et al. (2004)	Inundações bruscas são inundações de curta vida e que duram de algumas horas a poucos dias originam-se de pesadas chuvas.	
Flash Flood	IAHS- UNESCO- WMO (1974)	Súbitas inundações com picos de descarga elevados, produzidos por severas tempestades que são geralmente de limitada área de extensão.	
Flash Flood	Georgakakos (1986)	Operacionalmente, inundações bruscas são inundações que são de fusão curta, e requerem a emissão de alertas pelos centros locais de previsão e aviso, preferencialmente, do que pelos Centros Regionais de Previsão de Rios.	
Flash Flood	Kõmusçu et al. (1998)	Inundações bruscas são normalmente produzidas por intensas tempestades convectivas, a qual causa muito rápido escoamento, e o dano da inundação geralmente ocorre dentro de horas da chuva que causa e afeta uma área muito limitada.	
Inundação Brusca ou Enxurada	Castro (2003)	São provocadas por chuvas intensas e concentradas em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por súbitas e violentas elevações dos caudais, os quais escoam-se de forma rápida e intensa.	
Flash Flood	l leycessivas chiivas quehra de harragens) dentro de		
Flash Flood	Kron (2002)	Inundações bruscas geralmente ocorrem em pequenas áreas, passado apenas algumas horas (às vezes minutos), e elas tem um inacreditável potencial de destruição. Elas são produzidas por intensas chuvas sobre uma pequena área.	

Fonte: Goerl e Kobiyama (2021).

O que se observa nestas definições de inundações bruscas apresentadas na Tabela 2.2 é que as causas de sua ocorrência estariam mais ligadas a fenômenos meteorológicos de grande intensidade, como muitas chuvas concentradas em um único ponto, do que a questão acidental de quebra e rompimento de barragens, apesar de também ser este um fator de ocorrência deste tipo de inundação (GOERL; KOBIYAMA, 2021).

A ocorrência deste tipo de inundação é uma problemática não apenas para as populações que vivem as margens dos rios, mas para toda a sociedade estruturada em sua volta devido às grandes perdas humanas e materiais que estas podem acarretar em um curto espaço de tempo que se manifestam e o grau de intensidade que estas podem apresentar.

É interessante destacar que as inundações podem ocorrer em diversos locais em que sejam cortados por cursos de rios, no entanto, no caso deste estudo, são as inundações urbanas que merecem destaque haja vista que, segundo Souza e Romualdo (2009):

A inundação urbana é uma ocorrência tão antiga quanto os primeiros aglomeramentos urbanos. Este fenômeno natural é causado normalmente pela dinâmica da natureza, sendo intensificados pela intervenção antrópica no ambiente. Os efeitos socioambientais são agravados à medida que o processo de uso e ocupação do solo urbano for feito de maneira inadequada, onde a população de baixa renda que ocupa locais inadequados à moradia, expõe-se a riscos ambientais e patológicos presentes geralmente em locais de habitação de risco (SOUZA; ROMUALDO, 2009, p.2).

Dessa forma, a ocupação antrópica, quando realizada de forma não planejada, contribui com o desequilíbrio social e, principalmente, com o desequilíbrio ambiental, desencadeando uma série de problemas que irão refletir a curto e longo prazo em toda a sociedade, como é o caso das inundações.

A ocupação antrópica desordenada nas margens dos rios, aliada a impermeabilização do solo decorrente das construções e obstrução das áreas de escoamento naturais que formam as redes de drenagens dos rios, são elementos que propiciam o acontecimento cíclico dos fenômenos de inundações urbanas.

Além disso, grandes áreas planas e baixas, de maior interesse histórico para a ocupação, frequentemente correspondem a planícies de inundação de rios que por elas meandram. Rios, meandrantes em especial, passaram a ser vistos como um problema, pois diminuem a área útil a ser ocupada. Nessa visão, a canalização e a retificação, principalmente, aumentam a velocidade das águas e diminuem o espaço físico

ocupado pelos rios, "permitindo" a ocupação de suas margens. [...] (GUERRA; CUNHA, 2011, p.72).

O que se observa nas palavras do autor supracitado é que o homem ao ocupar as margens dos rios, construindo seus empreendimentos de assentamentos impulsionados pela construção civil, fez com que as áreas de escoamento naturais dos rios durante as suas cheias fossem diminuindo. No entanto, as águas dos rios ainda precisariam de local de saída, percorrendo seu caminho natural e ocasionando, com isso, as inundações urbanas (GERRA; CUNHA, 2011).

2.3 Estudo de Caso: Santo Antônio de Pádua

Antes de se caracterizar o local e objeto de estudo, neste caso, o rio Pomba e o município de Santo Antônio de Pádua, mostra-se relevante um breve apontamento sobre o que seria o estudo de caso a partir do ponto de vista de alguns autores, tal como apresentado por Yacuzzi (2005 apud MEIRINHOS; OSÓRIO, 2010, p.54), onde este argumenta que "o seu valor reside em que não apenas se estudar um fenômeno, mas também o seu contexto. Isto implica a presença de tantas variáveis que o número de casos necessários para tratá-las estatisticamente seria impossível de estudar".

Ainda sobre o estudo de caso, Dooley (2002 apud MEIRINHOS; OSÓRIO, 2010) ao se manifestar sobre o assunto informa que:

Investigadores de várias disciplinas usam o método de investigação do estudo de caso para desenvolver teoria, para produzir nova teoria, para contestar ou desafiar teoria, para explicar uma situação, para estabelecer uma base de aplicação de soluções para situações, para explorar, ou para descrever um objeto ou fenômeno (DOOLEY, 2002 apud MEIRINHOS; OSÓRIO, 2010, p.54).

Baseado nessas premissas, nas próximas seções deste capítulo, é feita uma explanação sobre as características da bacia hidrográfica do rio Pomba, bem como do município de Santo Antônio de Pádua. Primeiramente, é feita uma abordagem referente aos aspectos gerais que envolvem o rio Pomba e sua bacia hidrográfica, sendo esta mais uma forma para que se possa estar complementando as informações que são pertinentes aos objetivos propostos para este estudo. E, posteriormente, é descrita uma breve caracterização histórica e geográfica relacionada a clima, relevo, localização e demografia do município de Santo Antônio de Pádua, o qual é o foco do estudo de caso.

2.3.1 Bacia Hidrográfica do Rio Pomba

Esta seção apresenta uma descrição do rio Pomba e sua respectiva bacia, como forma de elucidar os aspectos gerais deste acidente geográfico, o qual também compõe a hidrografia da bacia do rio Paraíba do Sul.

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico (BRASIL, 2019), a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul:

[...] possui área de drenagem com cerca de 55.500 km², compreendida entre os paralelos 20° 26' e 23° 00' e os meridianos 41° 00'e 46° 30' oeste de Greenwich. A bacia estende-se pelos estados de São Paulo (13.900 km²), do Rio de Janeiro (20.900 km²) e Minas Gerais (20.700 km²). É limitada ao Norte pelas bacias dos rios Grande e Doce e pelas serras da Mantiqueira, Caparaó e Santo Eduardo. A Nordeste, a bacia do rio Itabapoana estabelece o limite da bacia. Ao Sul, o limite é formado pela Serra dos Órgãos e pelos trechos paulista e fluminense da Serra do Mar (BRASIL, 2019, p.42).

Apesar da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul ser de grande importância na Região Sudeste do país, como já exposto anteriormente, este trabalho tem como enfoque a bacia do rio Pomba. Sendo assim, conforme exposto no Plano Municipal de Saneamento Básico (BRASIL, 2019, p.43) a bacia do rio Pomba:

[...] nasce na Serra Conceição, pertencente à cadeia da Mantiqueira, em Barbacena, a 1.100m de altitude, apresentando uma declividade relevante, uma vez que a cerca de 90 km da nascente atinge a altitude de 200 m. Em Cataguases está na altitude de 165 m e em Santo Antônio de Pádua a 90 m. Depois de percorrer 265 km, atinge a foz no rio Paraíba do Sul. Os principais afluentes são os rios Novo, Piau, Xopotó, Formoso e Pardo. A bacia do rio Pomba apresenta uma área de drenagem de 8.616 km², com o uso e ocupação do solo relativamente uniforme, abrangendo cerca de 35 municípios mineiros e 3 municípios fluminenses, onde vive uma população de aproximadamente 450 mil habitantes. Os municípios mais representativos dessa bacia do ponto de vista populacional, ou seja, aqueles com mais de 20.000 habitantes são: Cataguases, Leopoldina, Santos Dumont, São João Nepomuceno, Ubá, Visconde do Rio Branco, em território mineiro, e Santo Antônio de Pádua e Miracema em território fluminense (BRASIL, 2019, p.43).

Nas Figuras 2.3 e 2.4, são mostrados, respectivamente, o mapa hidrográfico do rio Pomba e o local onde nasce o referido rio, na cidade de Barbacena, em Minas Gerais.

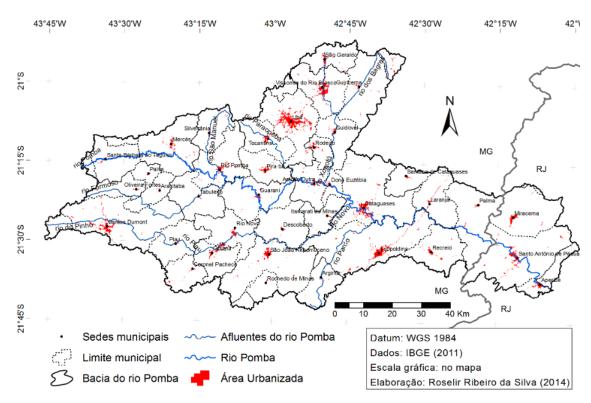


Figura 2.3 - Mapa hidrográfico do rio Pomba e seus municípios.

Fonte: Silva (2014).



Figura 2.4 - Nascente do rio Pomba localizada no município de Barbacena-MG.

Fonte: Mapio.net² (2022).

2.

²Disponível em: <<u>https://mapio.net/images-p/71089059.jpg</u>>. Acesso em: 24 de abr. de 2022.

Com um volume considerável de água, o rio Pomba, além de fornecer recursos hídricos e pesqueiros para os municípios situados em sua bacia, também traz um ambiente propício a prática de esportes, como canoagem, e serve, ainda, como um perfeito atrativo para a realização da pesca-sem-rede, uma vez que acomoda em seu interior, uma grande diversidade de espécies de peixes (COSEAC, 2021).

2.3.2 Caracterização Histórica e Geográfica de Santo Antônio de Pádua

No que se refere ao município de Santo Antônio de Pádua, trata-se de um ente da federação do estado do Rio de Janeiro situado em região denominada de Noroeste Fluminense, a qual foi criada no ano de 1987 depois de décadas de reivindicações direcionadas a este objetivo, uma vez que, segundo Piraciba e Lemos (2017, p.154):

[...] a busca pela "independência" da região Norte Fluminense, mais especificamente em relação a Campos dos Goytacazes, resulta, entre outros fatores, do fato de esse município monopolizar a atenção e os recursos da iniciativa privada e dos governos estadual e federal na escala da outrora região Norte-Noroeste Fluminense (PIRACIBA; LEMOS, 2017, p.154).

A criação desta região englobou em seu contexto 13 municípios, sendo eles Aperibé, Bom Jesus do Itabapoana, Cambuci, Italva, Itaocara, Itaperuna, Laje do Muriaé, Miracema, Natividade, Porciúncula, Santo Antônio de Pádua, São José de Ubá e Varre-Sai (PIRACIBA; LEMOS, 2017).

Cada um destes municípios possui histórias, arquitetura, organização social, econômica e geográfica, no geral, diferente, mas com algumas semelhanças devido à proximidade entre eles, além das similaridades culturais do povo brasileiro e do estado do Rio de Janeiro. Apesar disso, cada um desses municípios possui sua identidade própria tal como é o caso de Santo Antônio de Pádua, o qual, segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) (BRASIL, 2021):

[...] foi fundada por Frei Florido de Città di Castelli (da Cidade de Castelos) no dia 26 de julho de 1833. Acrescentando, ainda, que o consolidador de sua fundação foi Frei Bento Giovanni Benedetta Libilla, Bento de Gênova como assinava e era conhecido. Considerando que o documento mais antigo de que se tem notícia que consta na história de Santo Antônio de Pádua é a escritura, passada em cartório, da

doação das terras a Frei Florido de Città di Castelli feita por João Francisco Pinheiro e sua mulher, Maria Luiza, ampliada por João Luíz Marinho, para fazer a divisa "de valão a valão", entre o valão que corre da Rua Nilo Peçanha, antiga Rua da Chácara e outro, o valão do Botelho que havia na saída para Miracema (BRASIL, 2021, s/p.).

Com o passar das décadas, o município foi adquirindo suas características relacionadas as suas configurações geográficas no que diz respeitos as divisões e limites territoriais, assim como sua demografia, a saber:

O município se estende por 603,4 km² e contava com 42.479 habitantes no último censo. A densidade demográfica é de 70,4 habitantes por km² no território do município. Vizinho dos municípios de Miracema, Aperibé e São José de Ubá, Santo Antônio de Pádua se situa a 48 km a Sul-Oeste de Itaperuna a maior cidade nos arredores. Situado a 87 metros de altitude, Santo Antônio de Pádua tem as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 21° 32′ 23″ Sul, Longitude: 42° 10′ 52″ Oeste (BRASIL, 2021, s/p.).

A economia da cidade é bem diversificada, com a oferta do setor de serviços e comércio, pequenos empreendimentos agropecuários, um parque industrial direcionado em grande parte para a indústria de celulose e papel, mas também apresenta outras diretrizes de produção, como o concreto para construção civil, além da extração e manufatura de pedras ornamentais que talvez seja uma das atividades econômicas mais dinâmicas e expressivas do município, haja vista que, segundo as informações os autores Peiter, Carrisso e Pires (2021):

Atualmente Santo Antônio de Pádua é o maior polo de extração mineral de rochas ornamentais do estado do Rio de Janeiro. A atividade, que teve início da década de 1980, tem gerado cerca de 6.000 postos de trabalho diretos e indiretos. A maioria das empresas (91%) de micro, pequeno e médio (MPEs) porte do município empregava cerca de dezenove pessoas cada uma em 2001. Segundo IBGE (2010), o total de pessoal ocupado em unidades produtivas locais era de 9.483 e o número total de empresas com CNPJ era de 1.261, sendo 1.212 (96%) atuantes. Pode-se dizer que as MPEs são as maiores responsáveis pelo emprego do município. Atualmente, existem mais de 200 pedreiras e mais de 100 serrarias em operação, com parte delas ainda trabalhando em situação irregular (PEITER; CARRISSO; PIRES 2021, p.179).

Outro ponto importante sobre a característica do município de Santo Antônio de Pádua que interessa a este estudo é que este é atravessado de ponta a ponta pelo rio Pomba, separando

a cidade em dois blocos, assim como observado na Figura 2.5, onde é mostrada a região central da cidade, bem como o referido rio.

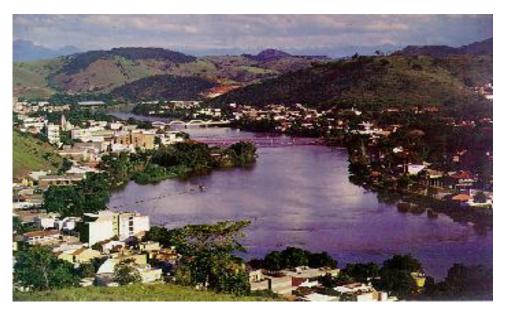


Figura 2.5 - Imagem do rio Pomba em sua travessia pela cidade de Santo Antônio de Pádua. Fonte: COSEAC (2021).

Pode-se dizer, que o rio Pomba possui, ao longo dos anos, uma relação cultural tão íntima com a cidade que se tornou objeto de estudo no Projeto Político Pedagógico do Instituto Federal Fluminense (IFF-Pádua) por meio do "Projeto Rio de Saberes", o qual foi desenvolvido no ano de 2015 pela instituição.

Essa identidade cultural com o rio Pomba acima mencionada também traz alguns problemas para o município, principalmente no que diz respeito à ocupação de suas margens com edificações, assim como elucidado por Fontenelle e Barandier (2008), da seguinte forma:

O problema da ocupação das margens do rio Pomba é reconhecido pelos gestores locais e pela população como relevante, porém há uma série de fatores envolvidos nessa questão que resultam em conflitos de interesse. Como já explicitado anteriormente, a cidade se formou em torno do rio, o que significa dizer que justamente nas suas margens estão localizados as edificações e os conjuntos de valor histórico e cultural mais relevantes, as áreas de concentração comercial, muitas residências e é também onde o preço da terra é mais elevado. A questão central aqui é que está se tratando de uma situação existente, de uma cidade construída ao longo de anos, e isso não pode deixar de ser considerado pelos instrumentos de planejamento, sob pena de se tornarem peças inviáveis diante da realidade (FONTENELLE; BARANDIER, 2008, p. 1570).

Essa realidade apontada pelos autores supracitados trata-se dos eventos críticos envolvendo as cheias em Santo Antônio de Pádua, as quais, ao longo da história do município, foram responsáveis pelo transbordamento do rio, causando inundações que culminaram em diversos prejuízos com perdas materiais e humanas, tema a ser abordado na próxima seção.

2.3.3 Eventos Críticos Envolvendo as Cheias em Santo Antônio de Pádua

Assim como observado anteriormente, os rios foram historicamente povoados em suas margens, sendo estas povoações sujeitas aos eventos climáticos que desencadearam cheias e inundações dos mesmos, as quais afetaram as construções e outras estruturas tais como as plantações ao alcance das águas em sua região de vazante. No caso de Santo Antônio de Pádua, sua localização as margens do rio Pomba a deixou vulnerável a esses eventos climáticos que resultaram nas cheias e inundações sofridas pela referida municipalidade ao longo de décadas.

As enchentes e inundações sofridas pelo município de Santo Antônio de Pádua foram de diversas proporções e classificações ao longo do tempo, indo de graduais a bruscas, tendo destaque aquelas que ocorreram na última década, podendo ser citados os casos de 2004, 2007, 2008, 2010, 2012 (VIEIRA, 2013) e, mais recentemente, 2018, 2020 e 2022.

Segundo as informações de Viera (2013), entre os anos de 2004 a 2012 o município de Santo Antônio de Pádua conviveu com eventos climáticos que culminaram em uma alternância de inundações e enchentes que causaram algumas avarias dentro das áreas atingidas pelas águas nos limites urbanos. A autora ainda traz a alternância das inundações e suas classificações em cada ano, conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Alternância das inundações e suas classificações em cada ano em Santo Antônio de Pádua.

Ano	2004	2007	2008	2010
Inundação Brusca	X	X		
Inundação Gradual	X		X	X

Fonte: Viera (2013).

Ainda, segundo Viera (2013), no ano de conclusão de seu estudo não estava disponibilizada a classificação da inundação do ano de 2012, mas destaca que esta teve grandes proporções e fortes impactos sociais e econômicos no município de Santo Antônio de Pádua.

No ano de 2004 as fortes chuvas ocorridas no município de Santo Antônio de Pádua, além de ter provocado inundações bruscas e graduais, também foram responsáveis por perdas

humanas, sendo um total de 4 (quatro pessoas), conforme noticiado pela Agência Brasil (2004), a qual ainda relatou mortes decorrentes por inundações em outros municípios do estado do Rio de Janeiro naquele ano.

Já, no que se refere ao ano de 2008, o evento climático do período ocasionou inundações que também foi amplamente noticiado pelos meios de comunicação daquele período, uma vez que, o "transbordamento do rio Pomba e de seus afluentes, foi na ordem de 3 metros acima da cota de transbordo, inundando cerca de 90% do perímetro urbano" (VIEIRA, 2013).

Segundo informações veiculadas pelo portal de notícias do G1 (2008), a proporção das chuvas e das cheias do rio Pomba, fez com que as águas do mesmo invadissem as ruas da cidade e, dessa forma, fez com que a prefeitura auxiliasse "os moradores das regiões mais afetadas a retirarem móveis e outros pertences, levando para regiões seguras" (G1, 2008), pois havia previsão de que o volume de água pudesse aumentar, ficando assim, as ruas da cidade alagadas, tal como ilustrado na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Ruas alagadas no município de Santo Antônio de Pádua nas inundações de 2008. Fonte: G1 (2008).

É interessante destacar que o ano de 2008 foi marcado como aquele em que ocorreu a maior enchente da história do município de Santo Antônio de Pádua e, segundo Maia (2021), a fortes chuvas fizeram as águas do rio Pomba:

[...] subir 4,5 metros acima do leito normal. A força da água derrubou uma pequena ponte do bairro Cidade Nova e também parte da "Ponte de Ferro", a passarela de pedestres. Em alguns pontos, o nível da água atingiu até o segundo andar de casas. A

maioria dos bairros e o Centro ficaram submersos. Até mesmo o corpo de bombeiros precisou deixar sua sede, pois a mesma foi completamente invadida pelas águas. A tragédia deixou mais de 20.000 desalojados e 400 desabrigados [...]. Centenas de moradores perderam tudo, casas, pertences, veículos, assim como comerciantes, que tiveram lojas, supermercados, entre outros estabelecimentos, invadidos pela água. Os estragos chegaram a R\$30 milhões (MAIA, 2021, s/p).

Mal o município havia se recuperado dos impactos dos eventos climáticos de 2008 e já se via dentro de outro no ano de 2010. Sobre o evento climático do ano de 2010, o "transbordamento do rio Pomba e de seus afluentes, na ordem de 0,70 metros acima da cota de transbordo na cidade de Santo Antônio de Pádua, inundou várias ruas que compõem o perímetro urbano" (VIEIRA, 2013), sendo uma proporção menor que a anterior, mas que também foi capaz de impactar negativamente no cotidiano do município.

Por outro lado, no ano de 2012, o "transbordamento do rio Pomba e de seus afluentes, na ordem de 1,90 metros acima da cota de transbordo na cidade de Santo Antônio de Pádua, inundou vários bairros" (VIEIRA, 2013).

Conforme informações noticiadas na época, pela Revista Veja, enquanto o estado do Rio de Janeiro concentrava seus esforços na Região Serrana do estado, em que cidades como Nova Friburgo enfrentava problemas com chuvas, o município de Santo Antônio de Pádua encontrava-se ilhado em 2012, com suas ruas alagadas devido às cheias do rio Pomba (RITTO, 2012), assim como observado na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Ruas alagadas no município de Santo Antônio de Pádua nas inundações de 2012. Fonte: Ritto (2012).

Sobre os eventos anteriormente mencionados, Viera (2013), traz em sua pesquisa, um resumo dos eventos climáticos das enchentes e inundações do município de Santo Antônio de Pádua e suas consequências, como áreas afetadas e danos causados, podendo ser observado na Tabela 2.4 que se segue.

Tabela 2.4 - Resumo dos eventos climáticos das enchentes e inundações no município de Santo Antônio de Pádua.

Data da Ocorrência	Área Urbana (Bairros Afetados)	Descrição do Evento e suas Características		
17/12/2008	Cidade Nova, Dezessete, Cehab, Aeroporto, Farol, São Luiz, São José, Hotel das Águas, São Félix, Monte Líbano, Gabry, Carvalho, Mirante, Gerador, Caixa D'Água, Ferreira, Centro, Fonseca, Tavares e Alequicis	Houve grande incremento de precipitação hídrica em quase toda bacia do rio Paraíba do Sul, havendo transbordamento do rio Pomba e de seus afluentes, na ordem de 03 (três) metros acima da cota de transbordo, inundando cerca de 90% do perímetro urbano da Sede do 1º Distrito.		
27/12/2010	Tavares, Centro, Gerador, Mirante, Carvalho, Divinéia, Beira-Rio, Trajano e Farol	Houve grande incremento de precipitação hídrica em quase toda bacia do rio Paraíba do Sul, havendo transbordamento do rio Pomba e de seus afluentes, na ordem de 0,70 metros acima da cota de transbordo na cidade de Santo Antônio de Pádua, inundando várias ruas que compõem o perímetro urbano da Sede do 1º Distrito.		
02/01/2012	Centro, Cidade Nova, Dezessete, Farol, Cehab, Beira Rio, São Luiz, Parque das Águas, Gabry, Ferreira, Gerador, Mirante, Carvalho, Tavares, Alequicis, Divinéia	Houve grande incremento de precipitação hídrica em toda bacia do rio Paraíba do Sul, havendo transbordamento do rio Pomba e de seus afluentes, na ordem de 1,90 metros, acima da cota de transbordo na cidade de Santo Antônio de Pádua, inundando vários bairros e o Centro da Sede do 1º Distrito, bem como os distritos de Baltazar e Paraoquena.		

Fonte: Viera (2013).

No ano de 2018, outro evento climático fez com que as águas do rio Pomba se elevassem, fazendo com que novos incidentes com enchentes e alagamentos de ruas ocorressem no município de Santo Antônio de Pádua, o qual teve bairros seriamente prejudicados, principalmente aqueles de áreas mais baixas e nas proximidades das margens do rio, deixando a Defesa Civil em alerta durante todo o período de chuvas, conforme informações noticiadas pelo portal de notícias G1 e ilustrado na Figura 2.8.



Figura 2.8 - Ruas alagadas no município de Santo Antônio de Pádua nas inundações de 2018. Fonte: G1 (2018).

Por fim, no ano de 2020 o município de Santo Antônio de Pádua voltou a sofrer com fortes chuvas e enchentes do rio Pomba, deixando um total de cerca de 3.500 desalojados, conforme informado pelo portal de notícias Serra News (2022). Mais recentemente, no ano de 2022, mais uma vez o município de Santo Antônio de Pádua passou por fortes chuvas e teve suas ruas alagadas pelas águas do rio Pomba, causando prejuízos aos munícipes e para a administração pública.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E SOLUÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO

Eventos que ocasionam a elevação dos níveis d'água nos canais de drenagem e, consequentemente, geram ondas de cheias que afetam e proporcionam riscos à população, podem ser modelados matematicamente (MONTEIRO, 2017).

Com intuito de prever a ocorrência das inundações ocasionadas pela elevação dos níveis d'água do rio Pomba em Santo Antônio de Pádua, são utilizados modelos matemáticos, já consolidados, acoplados a softwares computacionais, com a finalidade de analisar tais eventos de precipitações que podem vir a ocorrer na bacia hidrográfica do referido rio.

3.1 Modelagem Matemática do Problema Proposto

As equações que descrevem o fenômeno de escoamento em canais abertos são conhecidas como equações de Saint Venant. Deduzidas pela primeira vez por Barre de Saint Venant em 1871, elas descrevem o fluxo não permanente e não uniforme em canal aberto unidirecional. Estas equações são referências base deste trabalho, sendo estendida para escoamento superficial com superfície livre em duas dimensões. Nas suas formas diferenciais, possibilitam o conhecimento ponto a ponto do campo de escoamento formulando um modelo hidrográfico distribuído.

Tais equações são deduzidas a partir das equações da continuidade e conservação da quantidade de movimento, aplicadas a um volume de controle dentro do fluido em movimento (Steinstrasser, 2005), conforme mostrado nas Equações (3.1)-(3.3).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_xU_y\right)$$

$$= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_th\frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_th\frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (hU_y) + \frac{\partial}{\partial x} (hU_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} (hU_y^2 + g\frac{h^2}{2})$$

$$= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \tag{3.3}$$

onde h é a profundidade em metros [m]; U_x , U_y são as velocidades horizontais média, na profundidade, em metros por segundo [m/s]; g é a aceleração da gravidade, em metros por segundo ao quadrado $[m/s^2]$; ρ é a densidade da água em quilograma por metro cúbico $[kg/m^3]$; Z_b é a elevação inferior em metros [m]; τ_s é o atrito na superfície livre devido ao atrito produzido pelo vento; τ_b é o atrito devido ao atrito do fundo, que são adimensionais; e v_t é a viscosidade turbulenta em Pascal segundo 10P [mPa.s] e variação da quantidade de movimento nas direções x e y, que são variáveis especial e temporal, cujas unidades são dadas em metros [m] e segundos [s].

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

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \tag{3.4}$$

$$\tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}} \tag{3.5}$$

onde, a tensão de cisalhamento no fundo do elemento, nas dimensões x e y, é dada pelo produto da densidade da água (ρ) , da aceleração da gravidade (g) e profundidade (h), pela razão entre a variação das tensões cisalhantes das bordas desprezíveis, em que, n é o coeficiente de rugosidade (ou de Manning) $[sm^{-1/3}]$.

Já a força de atrito produzida pelo vento na superfície livre, relativa às direções x e y, respectivamente, é calculada a partir da velocidade do vento a 10 m de altura, usando a equação de Van Dorn:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \tag{3.6}$$

$$\tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10} \tag{3.7}$$

onde, $V_{x,10}$ e $V_{y,10}$ são os dois componentes da velocidade do vento a uma altura de 10 m; $|V_{10}|$ é o módulo da velocidade do vento em 10 m de altura; e C_{VD} é um coeficiente de arrasto de superfície que é calculado com base na velocidade do vento a partir da seguinte expressão:

$$|V_{10}| < 5.6 \, m/s \to C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6}$$
 (3.8)

$$|V_{10}| \ge 5.6 \, m/s \to C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} + 2.25 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - \frac{5.6}{|V_{10}|}\right)^2$$
 (3.9)

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

Por outro lado, a viscosidade turbulenta é calculada usando modelos de turbulência específica para equações de águas rasas com média de profundidade. Dentre os referidos modelos, podem ser citados: modelo parabólico, modelo de comprimento de mistura e modelo k- ε de Rastogi e Rodi (1978).

No modelo parabólico, a viscosidade turbulenta é calculada como:

$$v_t = 0.068 \, u_f h \tag{3.10}$$

onde u_f é a velocidade de atrito com o solo dada por $u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$.

Usando a fórmula de Manning para calcular o atrito do fundo na Equação (3.10), a seguinte expressão é obtida para viscosidade turbulenta, utilizando o modelo parabólico:

$$v_t = 0.068\sqrt{gn^2} |U|h^{5/6} \tag{3.11}$$

Já no modelo de comprimento de mistura em águas rasas, a viscosidade turbulenta é calculada usando a seguinte expressão:

$$v_t = \left[\min(0,267kh, kd_{wall})\right]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2,34\frac{u_f}{kh}\right)^2}$$
 (3.12)

onde, k=0.41 é a constante de von Karman; d_{wall} é considerada a distância do ponto sub análise até a parede mais próxima; e

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \tag{3.13}$$

Por fim, o modelo k- ε de Rastogi e Rodi (1978) resolve uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta k e para a taxa de dissipação de energia turbulenta ε , conforme Equações (3.14) e (3.15), respectivamente:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + C_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon$$
 (3.14)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_{x}\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_{y}\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\left(v + \frac{v_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{i}} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2 v_{t} S_{ij} S_{ij} + C_{\varepsilon} \frac{u_{f}^{4}}{h^{2}} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^{2}}{k}$$
(3.15)

onde:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$
; $C_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2}$; $C_k = C_f^{-\frac{1}{2}}$; $C_\varepsilon = 3.6 C_k^{\frac{3}{2}} C_{\varepsilon 2} C_\mu^{\frac{1}{2}}$

e

$$C_{\mu}=0.09;~C_{\varepsilon 1}=1.44;~C_{\varepsilon 2}=1.92;~\sigma_{k}=1.0;~\sigma_{\varepsilon}=1.31$$

os quais são coeficientes empíricos, determinados por comparação com dados experimentais de escoamentos turbulentos simples (HANJALIC, 1994; DESCHAMPS, 1998).

A solução do problema proposto neste trabalho, o qual é modelado matematicamente pelas equações de Saint Venant, descritas nesta seção, se dá numericamente por meio do Método dos Volumes Finitos (MVF), utilizando o software de simulação hidrodinâmica IBER para a modelagem de eventos de inundações em Santo Antônio de Pádua, o qual é descrito na próxima seção.

3.2 O Software IBER

O IBER é um software gratuito, sendo um modelo numérico de simulações que atualmente disponibiliza três tipos principais de cálculo de análise das grandezas hidrodinâmicas, são eles: um hidrodinâmico, um de turbulência e um de transporte de sedimentos. Utiliza o Método de Volumes Finitos (MVF) para resolver as equações de Saint Venant em duas direções, descritas na Seção 3.1, as quais representam o fenômeno de escoamento em canais abertos. Todos os módulos funcionam em uma malha não estruturada de volumes finitos formados por elementos triangulares e/ou quadriláteros. Na Figura 3.1 é apresentada a tela inicial do software IBER.

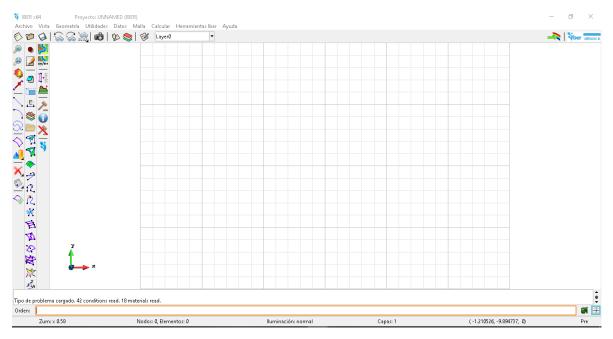


Figura 3.1 - Tela inicial do software IBER.

Fonte: A Autora (2022).

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 contornos.
- Atribuir uma série de parâmetros de entrada (rugosidade do fundo, modelo de turbulência, etc.).
- Construir uma malha de cálculo.

- Atribuir opções gerais para a simulação a ser realizada (tempo de cálculo, parâmetros de esquema numérico, ativação de módulos adicionais).
- Executar a simulação.

As condições iniciais e de contornos, bem como a maioria dos parâmetros de entrada, podem ser atribuídos tanto na geometria quanto na malha. No entanto, cabe ressaltar, que as condições atribuídas na geometria são transferidas também para a malha ao criá-la e, para gerar uma malha, deve ter uma geometria formada por superfícies.

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, estas devem ser atribuídas a todo o domínio. É 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. Os tipos de condições internas consideradas são: 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.

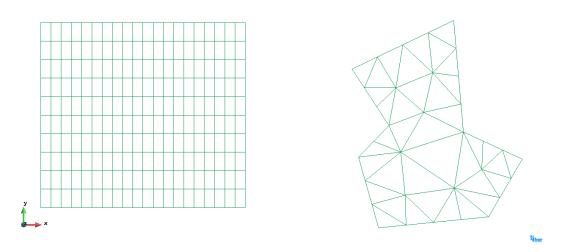


Figura 3.2 - Representação de malha estruturada composta por elementos quadrangulares (esquerda) e malha não estruturada composta por elementos triangulares (direita).

Fonte: A Autora (2022).

Após a construção da malha referente à região de estudos, faz-se a associação dos elementos da malha com os dados de topografia, por meio da opção de editar malhas localizada no menu "*Iber_Ferramientas*" do IBER. Cabe ressaltar que a associação dos dados de topografia pode ser feita através de um arquivo (formato ASCII, por exemplo), ou ainda, definindo uma altura ou elevação constante. Na Figura 3.3 é mostrada uma malha antes e após a inclusão dos dados de topografia.

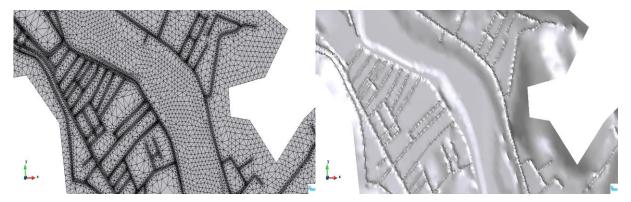


Figura 3.3 - Representação de malha sem dados de topografia (esquerda) e a mesma malha após a inclusão das informações topográficas (direita).

Fonte: A Autora (2022).

Além das etapas descritas anteriores, o usuário também pode inserir mais informações na simulação, de acordo com a necessidade do problema a ser investigado. Por exemplo, no menu "Dados => Processos hidrológicos", pode-se atribuir um hietograma mostrando a intensidade da precipitação ao longo de sua duração, bem como diferentes funções de perdas por infiltração nas superfícies da geometria ou nos elementos da malha, tendo como base três modelos diferentes: o modelo de Horton, o modelo Linear e o modelo de Green-Ampt.

Há, também, a possibilidade de atribuir condições à geometria ou à malha para o cálculo do transporte de sedimentos através do menu "*Dados* => *Transporte de sedimentos*", bem como atribuir componentes da velocidade do vento (menu "*Dados* => *Vento*") e analisar diferentes modelos para o cálculo do regime turbulento no escoamento ("*Dados* => *Turbulência*").

Outras opções referem-se à construção de estruturas hidráulicas ao longo do curso d'água, tais como pontes e *culverts*, além de barragens e a formação de brechas quando a mesmas e rompe. Tal opção permite inserir as coordenadas onde ocorrerá a ruptura, bem como as características da brecha.

Inseridas todas as informações preliminares referentes ao problema a ser modelado, para iniciar um cálculo (ou uma simulação), é preciso definir os parâmetros relacionados ao mesmo, tais como período de início e término da simulação, esquema numérico (de primeira ordem ou um de segunda ordem), tipos de resultados a serem gerados, dentre outros, através das diferentes abas do menu "*Dados =>Dados do problema*".

O cálculo é iniciado com o menu "Calcular". Através deste menu é possível iniciar diretamente o cálculo ("Calcular => Calcular") ou acessando a janela de cálculo ("Calcular => Janela de cálculo"). Esta segunda opção permite ter um melhor controle do processo de cálculo, além de acessar o arquivo que mostra o status do processo (botão View Output),

enquanto o cálculo está sendo executado. É possível acessar as informações durante o processo de cálculo com o menu "Calcular => Verinformações do processo".

Uma vez finalizado o cálculo, ou durante o mesmo, é possível visualizar os resultados já obtidos até o instante atual da simulação, através da interface de pós-processamento. A alternância entre as interfaces de pré-processamento e pós-processamento é feita usando o menu "Arquivo => pós-processamento" e "Arquivo => pré-processamento", ou através dos botões correspondentes na barra de ferramentas.

O IBER tem várias opções para visualizar e analisar os resultados, personalizar cores, legendas, exibir rótulos de valor, etc. Uma opção para visualizar os resultados é através do menu "Janela => ver resultados". A janela que se abre permite o acesso aos diferentes grupos de resultados (ou Análises) que podem ser exibidos a cada instante de tempo, como áreas coloridas, áreas coloridas suaves, ou vetores, conforme pode ser visualizado na Figura 3.4. Dentro do mesmo menu, com "Janela => animar" é possível fazer as animações dos resultados.

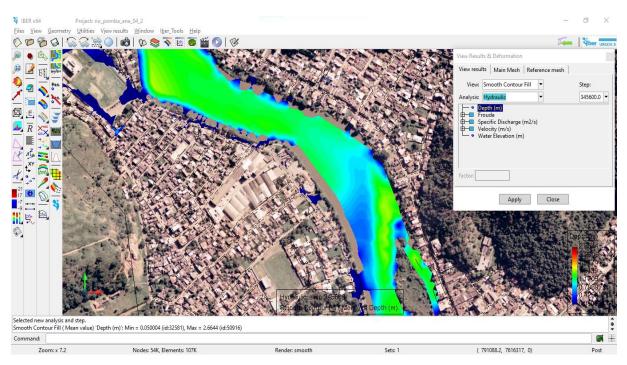


Figura 3.4 - Janela de pós-processamento do software IBER.

Fonte: A Autora (2022).

É possível criar gráficos úteis para a análise dos resultados para diferentes formatos e características (evolução de uma grandeza ao longo do tempo em um ponto, fluxo através de uma linha, perfil da seção transversal, mapas de máximos, topografia, etc.). A maioria desses

resultados podem ser exportados em formato de arquivos "ASCII ArcInfo" através do menu "Iber_Tools => Resultado sem Grid".

3.3 Obtenção de Dados da Região de Interesse

O processo de obtenção dos dados de topografiada bacia hidrográfica do rio Pomba no trecho de interesse foi realizado junto ao projeto TOPODATA e, para a caracterização da zona urbanizada e suas edificações, foram utilizados dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Ainda no site da ANA, Portal HidroWeb, foram adquiridos dados de níveis d'água, o qual proporciona uma visão geral da pluviometria e fluviometria por meio de estações de tratamento localizadas em todo o território nacional.

3.3.1 Aquisição de Dados de Topografia e Área Urbanizada

Os dados de topografia foram obtidos através do projeto TOPODATA, elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esse projeto contém as informações geográficas de qualquer região brasileira, podendo serem acessadas por meio do endereço eletrônico: www.dsr.inpe.br/topodata, tal como observado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Página inicial do projeto TOPODATA.

Fonte: TOPODATA (2021).

No projeto TOPODATA, é possível obter informações sobre modelos digitais do terreno, os quais tem como base a missão espacial norte-americana intitulada Missão Topográfica Radar Shuttle (do inglês *Shuttle Radar Tophography Mission* - SRTM), gerenciada pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (do inglês *National Aeronautics and Space Administration* - NASA). Além disso, há relatos sobre como foi feito o processo de aquisição desses dados, documentos, publicações relacionadas, os órgãos e a equipe responsável pelo desenvolvimento e implementação do projeto.

Na aba "Acesso", é possível visualizar a representação do mapa do território nacional dividido em estados, bem como suas subdivisões em células retangulares que representam uma porção de terra da superfície terrestre com suas respectivas coordenadas geográficas, tal como observado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Coordenadas de topografia de cada região do território nacional.

Fonte: TOPODATA (2021).

Para auxiliar no processo de aquisição dos dados de topografia, há um *link*, no qual é possível visualizar um mapa interativo, tal como observado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Mapa interativo do território nacional.

Fonte: TOPODATA (2021).

Para fazer o *download* dos aquivos disponíveis no site, basta clicar sobre a região de interesse e baixar os arquivos sobre altitude, declividade, relevo, curvas de nível e outros, no formato de imagens *raster* ou acessar o link *www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php* para obtêlos em colunas *xyz* (formato ASCII), tal como mostrado na Figura 3.8.

A obtenção dos dados deverá ser feita a partir da seleção da folha de interesse, na lista de arquivos disponíveis para a mesma, através do acesso respectivo ao conjunto de arquivos desejado (ASCII, GRD, GeoTiff ou BMP). As diferentes variáveis topográficas estão identificadas por sufixos de duas letras que complementam o prefixo da folha. A seguir estão especificados os arquivos respectivos a uma folha de prefixo "_____".

1. Arquivos em colunas xyz (ASCII, extensão .txt)

Variável	Arquivos		
Altitude	txt.zip		

Observação: os arquivos XYZ têm margens de 30 linhas/colunas (equivalente a 0,025° ou 1,5') além dos limites nominais correspondentes às folhas da articulação 1:250.000.

2. Grades (binário, extensão .grd)

Variável	Arquivos		
Altitude	zip		

Observação: os arquivos de grade têm margens de 90 linhas/colunas (equivalente a 0,025° ou 1,5') além dos limites nominais correspondentes às folhas da articulação 1:250.000.

3. Planos de Informação em GeoTiff (32 bits, extensão .tif)

Variável	Arquivos (zip):		
Altitude - numérica	ZN		
Declividade - numérica	SN		
Orientação - numérica	ON		
Curv. Vertical - numérica	VN		
Curv. Horizontal - numérica	HN		
Declividade - classes	SA		
Declividade - classes	SB		
Declividade - classes	SC		
Orientação - octantes	oc		

Figura 3.8 - Ambiente para download de arquivos no formato desejado pelo usuário.

Fonte: TOPODATA (2021).

Como mencionado anteriormente, a bacia hidrográfica do rio Pomba tem a nascente de seu principal curso d'água em Barbacena-MG, passa pela cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ e sua foz é no rio Paraíba do Sul, próximo da cidade de Itaocara-RJ. Sendo assim, para adquirir os dados de topografia da região de estudo, foi realizado o *download* dos arquivo intitulado"21_435.txt" (a maior parte da bacia do rio e a região de Santo Antônio de Pádua). Ao abrir o arquivo, o mesmo possui mais de dois milhões de pontos represendados em três colunas, correspondendo, respectivamente a longitude, latitude e altura em relação ao nível do mar, conforme mostrado na Figura 3.9.

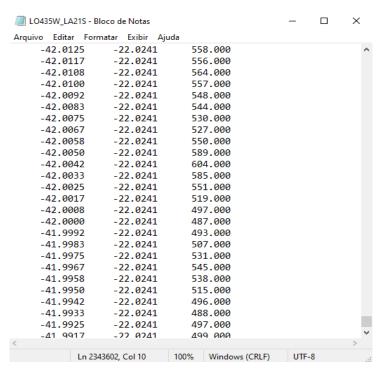


Figura 3.9 - Arquivos do projeto TOPODATA com as informações de altude da região de interesse.

Fonte: TOPODATA (2021).

Além dos dados de topografia para a região de interesse, os quais foram obtidos junto ao projeto TOPODATA, também foi utilizado um arquivo com a localização da área urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua, em particular, das áreas onde estão localizadas as edificações do perímetro urbano. Tais dados são oriundos do site da ANA, através de um estudo realizado com o intuito de desenvolver um sistema de previsão de eventos críticos na bacia do rio Paraíba do Sul (SISPREC) e de um sistema de intervenções estruturais destinados à

mitigação do efeito das cheias nas bacias dos rios Muriaé e Pomba (SIEMEC)³. Na Figura 3.10 é mostrada a região urbanizada de Santo Antônio de Pádua e a representação das edificações consideradas neste trabalho.

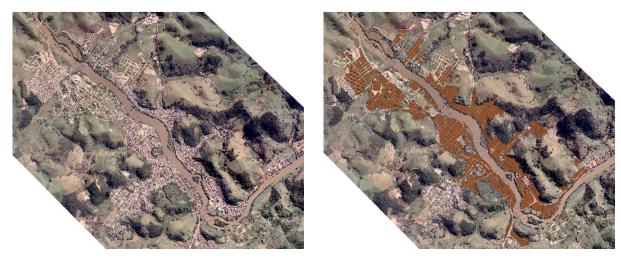


Figura 3.10 - Região urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua sem a demarcação das edificações (esquerda) e após a demarcação das edificações (direita).

Fonte: Adaptado de ANA (2021).

3.3.2 Aquisição de Dados de Níveis D'Água

Para a aquisição de dados referentes à níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos no que diz aos recursos hídricos situados no território nacional, é possível utilizar o Portal HidroWeb, sendo este uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

É possível adquirir esses dados acessando o sistema HidroWeb dentro do site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), portal SNIRH, por meio do endereço eletrônico https://www.snirh.gov.br/, tal como mostrado na Figura 3.11, ou diretamente no portal HidroWeb, acessando http://www.snirh.gov.br/hidroweb, como apresentado na Figura 3.12.

³Disponível em: http://gripbsul.ana.gov.br/Default.html. Acesso em: 10 de jan. de 2021.



Figura 3.11 - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.

Fonte: ANA (2021).

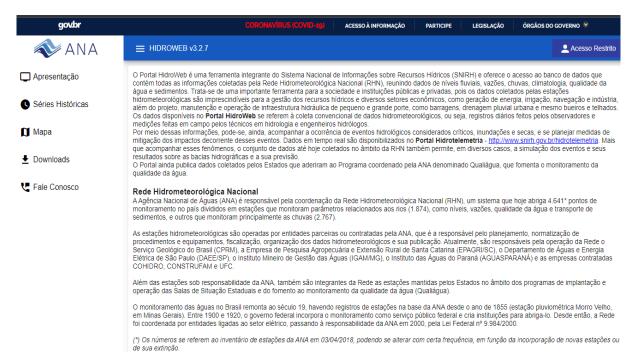


Figura 3.12 - Portal HidroWeb.

Fonte: ANA (2021).

Em particular, um dos caminhos para a obtenção dos dados de precipitação e de níveis d'água de uma bacia hidrográfica, como a do rio Pomba, por exemplo, se dá por meio do acesso ao mapa interativo do território nacional, no qual constam as estações hidrometeorológicas da

ANA, conforme mostrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Mapa iterativo referente a Rede Hidrometeorológica Nacional.

Fonte: ANA (2021).

Em Rede Hidrometeorológica Nacional, há um "campo" que direciona o mapa interativo para a região de interesse, conforme mostrado na Figura 3.14. Nessa região, é possível visualizar a área ao redor de Santo Antônio de Pádua-RJ, bem como o trecho do rio Pomba passando pelo referido município, até seu desague no rio Paraíba do Sul, localizado entre os municípios de Aperibé-RJ e Itaocara-RJ, denominado exultório da bacia rio Pomba.

Clicando sobre o ícone de localização da estação de interesse, uma nova janela abrirá e serão apresentadas sobre o nome da estação, 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 3.15, e dados telemétricos, tal como na Figura 3.16, já disponíveis para *download* no formato de interesse.

Vale ressaltar que, para baixar dados telemétricos, conforme mostrado na Figura 3.16, é preciso preencher o período a ser investigado, o qual não pode ser superior a 90 dias.

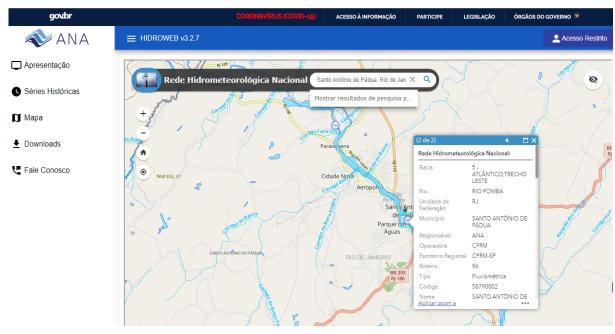


Figura 3.14 - Região ao redor de Santo Antônio de Pádua e estações da Rede Hidrometeorológica Nacional nas proximidades.

Fonte: ANA (2021).

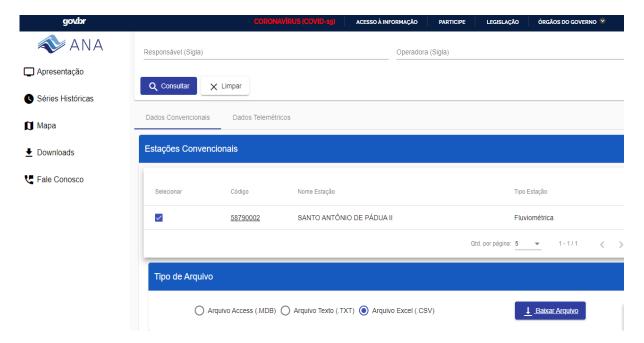


Figura 3.15 - Download de dados convencionais.

Fonte: ANA (2021).

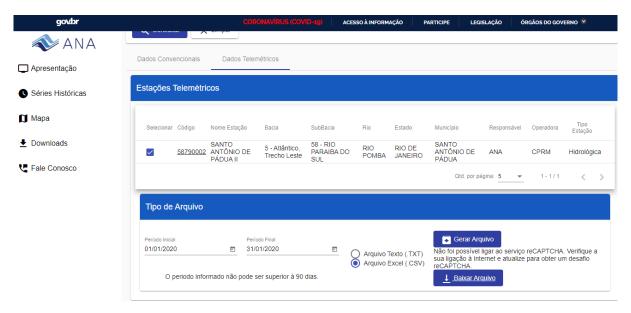


Figura 3.16 - *Download* de dados telemétricos.

Fonte: ANA (2021).

Cada arquivo convencional, contém os dados como vazão, sessão transversal e código da estação. Já, os arquivos telemétricos, apresentam dados periódicos sobre a quantidade de chuvas, bem como o nível e a vazão do rio na estação de monitoramento, conforme mostrado na Figura 3.17.

4	Α	В	С	D	E	F
1	Data	Hora	Chuva (mr	Nível (cm)	Vazão (m3	s/s)
2	01/01/2020	00:00:00	0	125.37	117.6	
3	01/01/2020	00:15:00	0	125.37	117.6	
4	01/01/2020	00:30:00	0	125.37	117.6	
5	01/01/2020	00:45:00	0	125.37	117.6	
6	01/01/2020	01:00:00	0	125.37	117.6	
7	01/01/2020	01:15:00	0	125.37	117.6	
8	01/01/2020	01:30:00	0	125.37	117.6	
9	01/01/2020	01:45:00	0	125.37	117.6	
10	01/01/2020	02:00:00	0	125.38	117.6	
11	01/01/2020	02:15:00	0	125.38	117.6	
12	01/01/2020	02:30:00	0	125.38	117.6	
13	01/01/2020	02:45:00	0	125.38	117.6	
14	01/01/2020	03:00:00	0	125.38	117.6	
15	01/01/2020	03:15:00	0	125.38	117.6	
16	01/01/2020	03:30:00	0	125.38	117.6	
17	01/01/2020	03:45:00	0	125.38	117.6	
18	01/01/2020	04:00:00	0	125.38	117.6	
19	01/01/2020	04:15:00	0	125.38	117.6	
20	01/01/2020	04:30:00	0	125.38	117.6	
21	01/01/2020	04:45:00	0	124.38	115.9	
	◆ ► 58790002-SANTO ANTONIO DE PADUA ⊕				•	
Pro	nto					

Figura 3.17 - Dados telemétricos da estação de monitoramento localizada no centro de Santo Antônio de Pádua.

Fonte: ANA (2022).

Em particular, para este trabalho, foram adotados dois conjuntos de dados obitdos com base nas informações da ANA, no período de 00:00 *h* de 24/01/2020 a 00:00 *h* de 28/01/2020, o qual compreende um evento de inundação que ocasionou severos danos à cidade de Santo Antônio de Pádua. O primeiro conjunto contendo informações dos níveis d'água do rio Pomba em uma estação a montante da área mais urbanizada da cidade, operada pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), o qual foi considerado como condição de contorno de entrada para o modelo e, o segundo conjunto, também retirado de uma estação da ANA localizada no centro da cidade, utilizado para calibração do modelo, conforme mostrado nas Figuras 3.18 e 3.19.

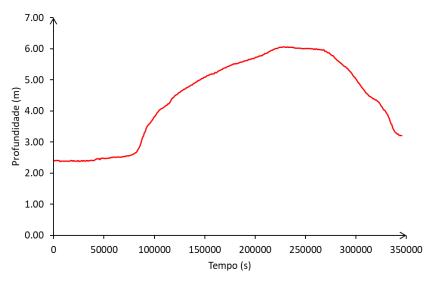


Figura 3.18 - Dados de níveis d'água no rio Pomba utilizado como entrada no modelo. Fonte: A Autora (2022).

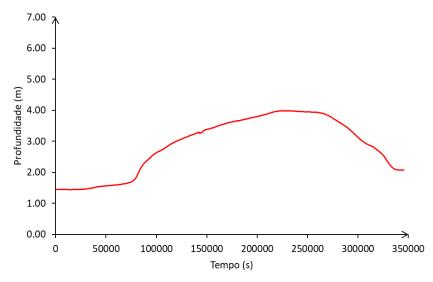


Figura 3.19 - Dados de níveis d'água no rio Pomba utilizado para a calibração do modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, as informações e dados obtidos com a pesquisa realizada são analisados e utilizados para a construção do modelo digital da região de estudos com o propósito de expor os resultados envolvendo a simulação de cenários de inundação em de Santo Antônio de Pádua.

Os resultados apresentados neste trabalho foram gerados em um computador Intel Core i3 com 4 GB de memória RAM, com tempo necessário para a realização das simulações variando, aproximadamente, entre 1 a 5 horas, o qual foi proporcional ao aumento no número de volumes adotado na malha espacial. Ressalta-se, ainda, que essa variação no tempo computacional está intimamente relacionada às limitações do hardware utilizado.

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

No IBER, software utilizado para a realização das simulações, primeiro deve-se abrir a foto georreferenciada da região de interesse. Em seguida, através do menu "Geometria", foram construídas as superfícies para determinar as características da área estudada, a qual, nesse primeiro momento, foi composta por duas superfícies que englobam a área urbanizada de Pádua e uma superfície representando o trecho do rio Pomba sob análise, conforme Figura 4.1.

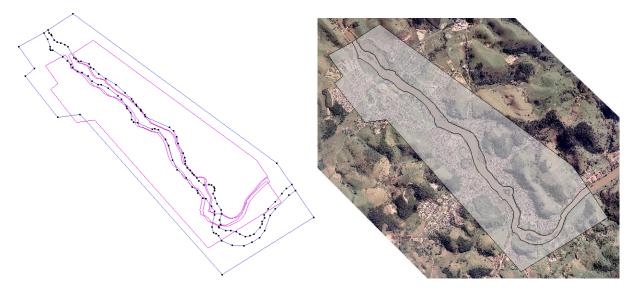


Figura 4.1 - Superfícies representando as planícies e o curso d'água do rio Pomba na área de interesse.

Em seguida, em "dados => hidroninâmica => condições de contorno", foram inseridas as condições de contorno de entrada e de saída. No que se refere às condições de entrada, foi adotada a elevação da água, com base nas informações obtidas no site da ANA para o período compreendido entre 00:00 h de 24/01/2022 a 00:00 h de 28/01/2022. Já, para as condições contorno de saída, foi definido um fluxo supercrítico/crítico. Na Figura 4.2 é mostrado o perfil da elevação da lâmina d'água usado para a entrada, enquanto nas Figuras 4.3 e 4.4 são apresentadas as posições tomadas para a entrada e saída no modelo, respectivamente.

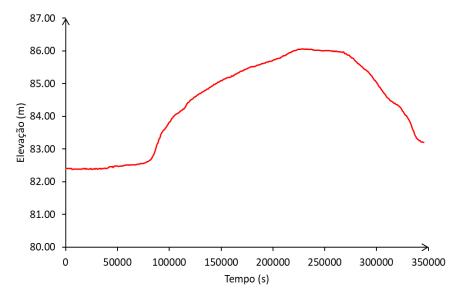


Figura 4.2 - Perfil da elevação da lâmina d'água no contorno de entrada do modelo obtidos no site da ANA.

Fonte: A Autora (2022).



Figura 4.3 - Condições de contorno de entrada do modelo.



Figura 4.4 - Condições de contorno de saída do modelo.

Fonte: A Autora (2022).

Para a atribuição das condições iniciais do problema, em "dados => hidrodinâmica => condições iniciais", foi estabelecida profundidade igual zero em todas as superfícies analisadas, como mostrado na Figura 4.5.

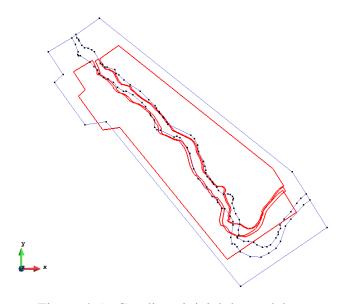


Figura 4.5 - Condição inicial do modelo.

Fonte: A Autora (2022).

Definidas as características hidrodinâmicas do modelo, deve-se inserir as informações referentes ao uso do solo. Para isso, é necessário informar 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 superfície do rio com 0,025

 $sm^{-1/3}$ e para a planície com 0,05 $sm^{-1/3}$, conforme apresentado na Figura 4.6, os quais são tomados como *default* no software IBER para os referidos usos do solo.

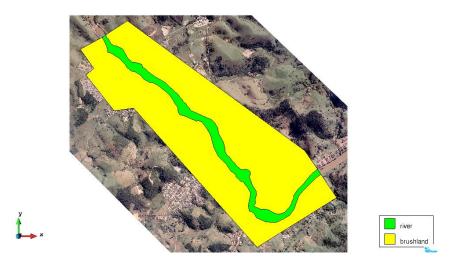


Figura 4.6 - Coeficiente de rugosidade para as superfícies que caracterizam o rio e a planície. Fonte: A Autora (2022).

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 50 metros para os referidos elementos que compõem as superfícies do rio e da planície. Posteriormente, é gerada uma malha com base no tamanho desses elementos em cada superfície. Na Figura 4.7 é mostrada a malha obtida para a região de interesse contendo 7.368 elementos triangulares e 3.838 números de vértices.

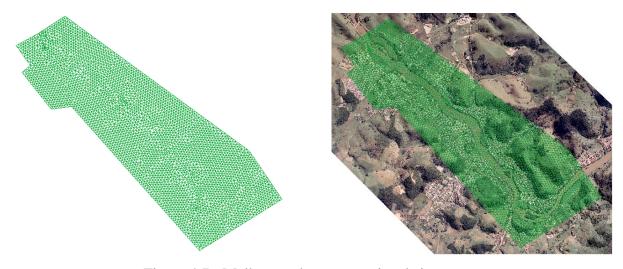


Figura 4.7 - Malha gerada para a região de interesse.

Por fim, é necessário fazer a atribuição dos dados de topografia obtidos no projeto TOPODATA 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". Na Figura 4.8 é mostrada a representação da malha computacional após a associação dos dados topográficos.

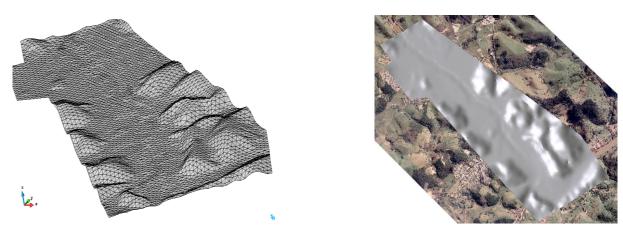


Figura 4.8 - Representação da malha de cálculo após a associação dos dados topográficos.

Fonte: A Autora (2022).

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", insere-se as informações sobre o período a ser simulado, o qual, para esta simulação, foi configurado com tempo inicial de 0s e tempo máximo de 345.600 s, o que totaliza 96 horas de simulação, ou seja, 4 dias, com passo de tempo de 900 s (15 minutos), como mostrado na Figura 4.9.

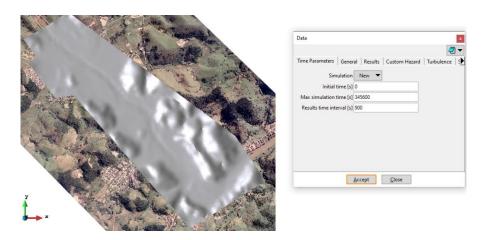


Figura 4.9 - Dados referente ao período de tempo da simulação.

Para essa simulação base, o tempo de execução ficou em torno de 1 hora, aproximadamente, cujos resultados do comportamento hidráulico do rio Pomba podem ser visualizados no ambiente de pós-processamento.

Na Figura 4.10 é mostrado o perfil no nível d'água ao longo do tempo, tomando como referência um ponto localizado no rio Pomba próximo ao centro da cidade, mais precisamente, na ponte Raul Veiga.

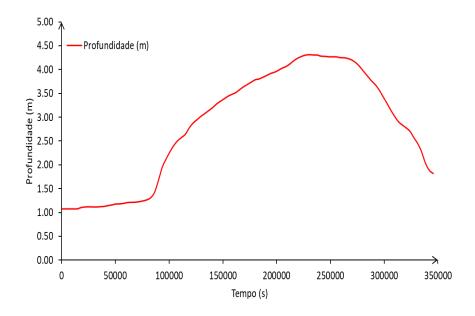


Figura 4.10 - Perfil da profundidade ao longo do tempo na ponte Raul Veiga.

Fonte: A Autora (2022).

Cabe ressaltar, porém, que o perfil da profundidade do rio depende significativamente da localização do ponto escolhido ao longo de sua seção transversal, uma vez que o fundo do mesmo possui geometria irregular. Sendo assim, na Figura 4.11 é apresentada elevação da água no ponto escolhido, uma vez que esta independe da posição ao longo da seção transversal.

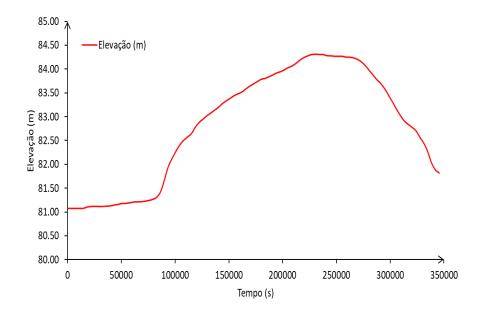


Figura 4.11 - Perfil da elevação ao longo do tempo na ponte Raul Veiga.

Fonte: A Autora (2022).

Em seguida, nas Figuras 4.12 e 4.13, são mostrados os mapas de inundação para a profundidade e elevação da lâmina d'água, respectivamente, no momento em que a onda de cheia atinge seu pico, de acordo com as Figuras 4.10 e 4.11, ou seja, próximo de 235.000 s.

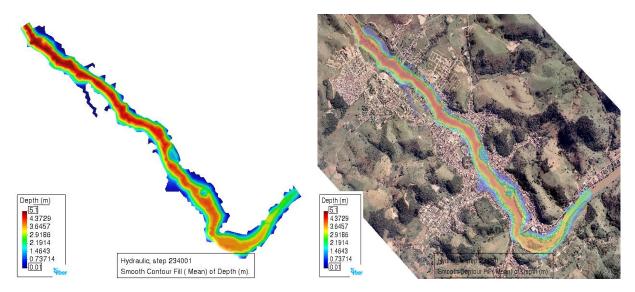


Figura 4.12 - Mapa de profundidade no instante em que a onda de cheia atinge seu pico em 235.000 s, aproximadamente.

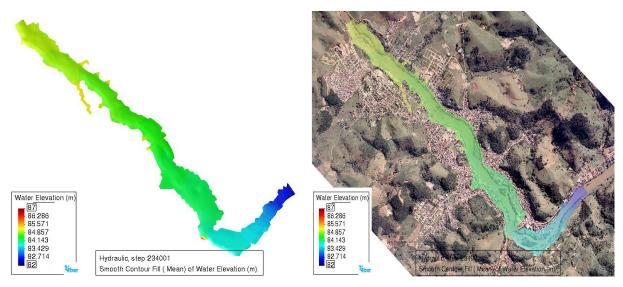


Figura 4.13 - Mapa de elevação no instante em que a onda de cheia atinge seu pico em 235.000 s, aproximadamente.

Por fim, nas Figuras 4.14 e 4.15, têm-se os mapas de máximos para a profundidade e elevação da lâmina d'água ao longo de toda a região estudada.

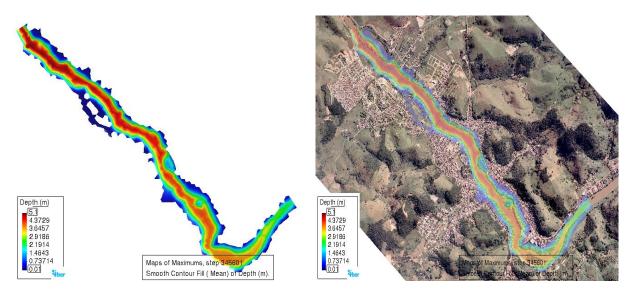


Figura 4.14 - Mapa de máximo referente à profundidade do rio na região de interesse.

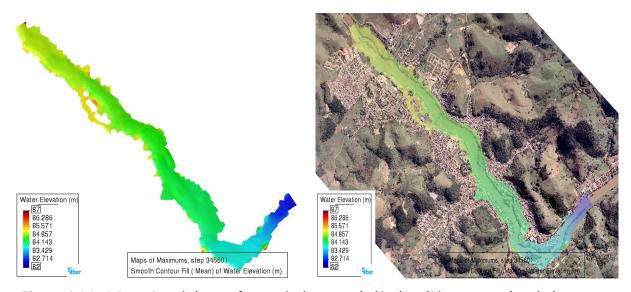


Figura 4.15 - Mapa de máximo referente à elevação da lâmina d'água na região de interesse.

4.2 Análise da Variação das Malhas Especiais

Com o intuito de validar e calibrar o modelo matemático resolvido pelo Método dos Volumes Finitos, foram realizadas simulações com a variação da malha computacional, além de ser comparados os resultados numéricos obtidos com o mesmo, com os dados da ANA.

Para as simulações constantes nessa seção, foram utilizadas as mesmas informações adotadas na seção anterior, ou seja, coeficiente de rugosidade para a superfície do rio com 0.025 $sm^{-1/3}$ e para a planície com 0.05 $sm^{-1/3}$. Já, o tempo inicial foi de 0s e tempo máximo de 345.600 s, totalizando 96 horas de simulação.

Inicialmente, foi feita a variação da malha espacial buscando uma configuração que implicasse em uma maior estabilidade do modelo junto a solução numérica. Deste modo, primeiramente foi realizada a variação da malha da planície, considerando os elementos triangulares de tamanho iguais a 50, 25 e 10 metros, respectivamente, mantendo a malha do rio com elementos de tamanho 50 metros.

Nas Figuras 4.16 e 4.17, nas quais são mostradas a evolução da profundidade e da lâmina da água ao longo do tempo, no ponto de coleta ponte Raul Veiga, no centro da cidade de Santo Antônio de Pádua.

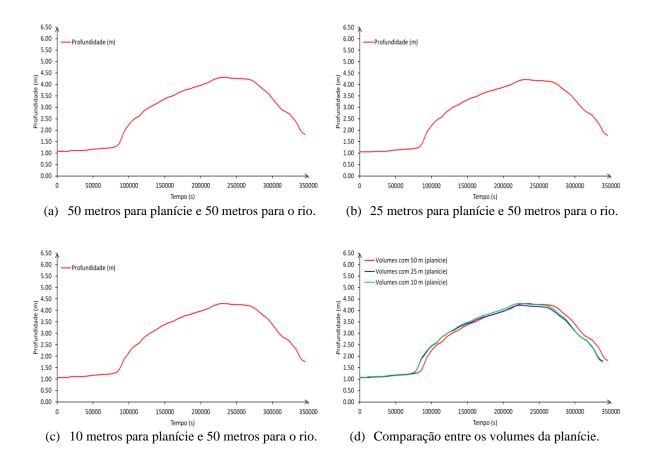


Figura 4.16 - Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos elementos da malha da planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a malha do rio constante.

Foi possível constatar que, quando reduzido o tamanho dos elementos da malha da planície pela metade (25 *m*), a quantidade de elementos, quase que quadruplicou, e o tempo de simulação triplicou. E, ao reduzir o tamanho dos elementos para 1/5 (10 *m*), o número de elementos aumentou 22 vezes e o tempo necessário para a simulação foi 44 vezes maior. Além disso, nesse ponto tomado como referência, não houve variações bruscas no pico da onda de inundação entre uma malha e outra, ao longo do tempo.

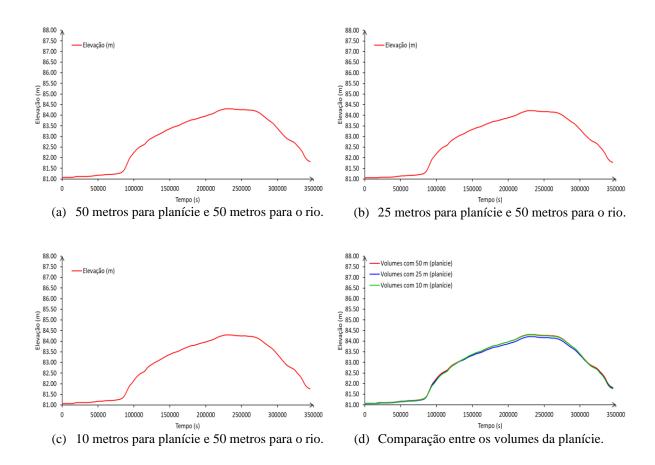


Figura 4.17 - Perfil da elevação d'água na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos elementos da malha da planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a malha do rio constante.

Fonte: A Autora (2022).

Adiante, foi realizada a análise dos mapas de máximo tanto para a profundidade quanto para a elevação da lâmina d'água ao longo do período simulado, conforme Figuras 4.18 e 4.19.

Na comparação dos mapas de máximo obtidos ao longo da simulação, tanto para a profundidade quanto para a elevação, foi possível constatar uma redução no tamanho dos elementos da malha da planície implica em uma variação menos significativa entre as malhas com volumes de tamanho 25 e 10 para a planície, assim que a cota de transbordo é atingida.

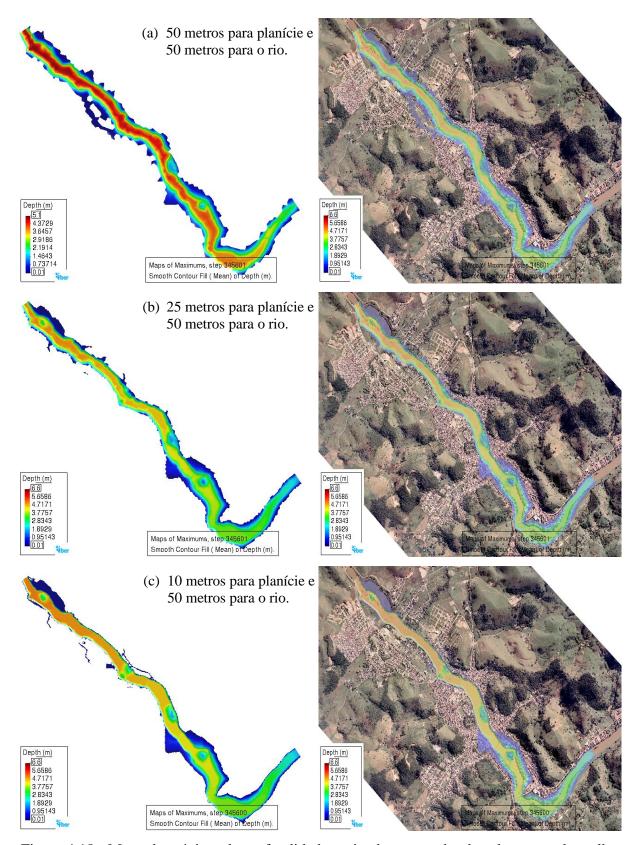


Figura 4.18 - Mapa de máximo da profundidade variando o tamanho dos elementos da malha da planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a malha do rio constante.

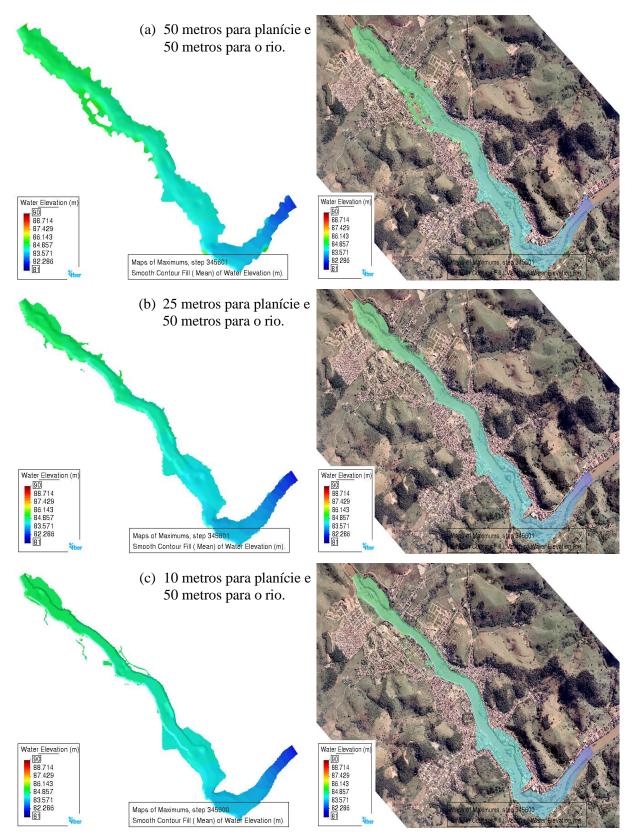


Figura 4.19 - Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água variando o tamanho dos elementos da malha da planície em 50, 25 e 10 metros, mantendo a malha do rio constante.

Em seguida, foi realizada a variação do tamanho dos elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície em 50 metros. Nas Figuras 4.20 e 4.21, são mostradas a evolução da profundidade e da elevação da lâmina d'água ao longo do tempo, na ponte Raul Veiga, no centro da cidade de Santo Antônio de Pádua.

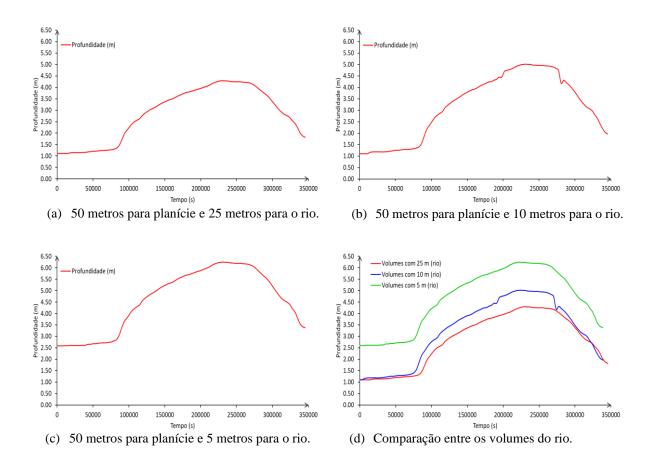


Figura 4.20 - Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície constante.

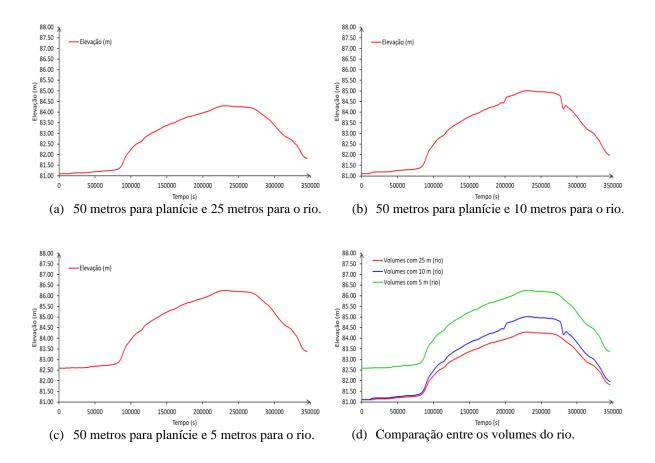


Figura 4.21 - Perfil da elevação d'água na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície constante.

Fonte: A Autora (2022).

Foi possível constatar que, assim como ocorrido com a variação da malha na planície, quando o tamanho dos elementos da malha do rio é reduzido, eleva-se o tempo de simulação, bem como, espera-se haver, uma maior estabilidade do modelo. Por outro lado, diferentemente do que ocorreu anteriormente, para as variações realizadas na malha do rio, houve significativa alteração nos níveis d'água no ponto de interesse, ocorrendo, inclusive, oscilações entre os níveis do rio para distintas malhas adotadas, fato que carece de uma maior investigação futura.

Adiante, foi realizada a análise dos mapas de máximo ao longo do tempo para a profundidade e elevação da lâmina d'água, conforme Figuras 4.22 e 4.23.

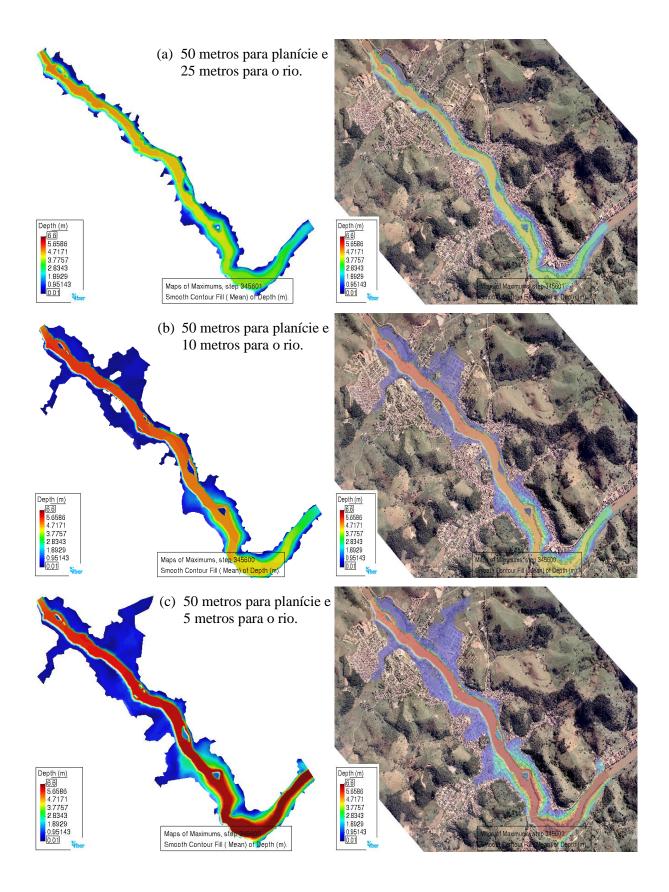


Figura 4.22 - Mapa de máximo da profundidade variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície constante.

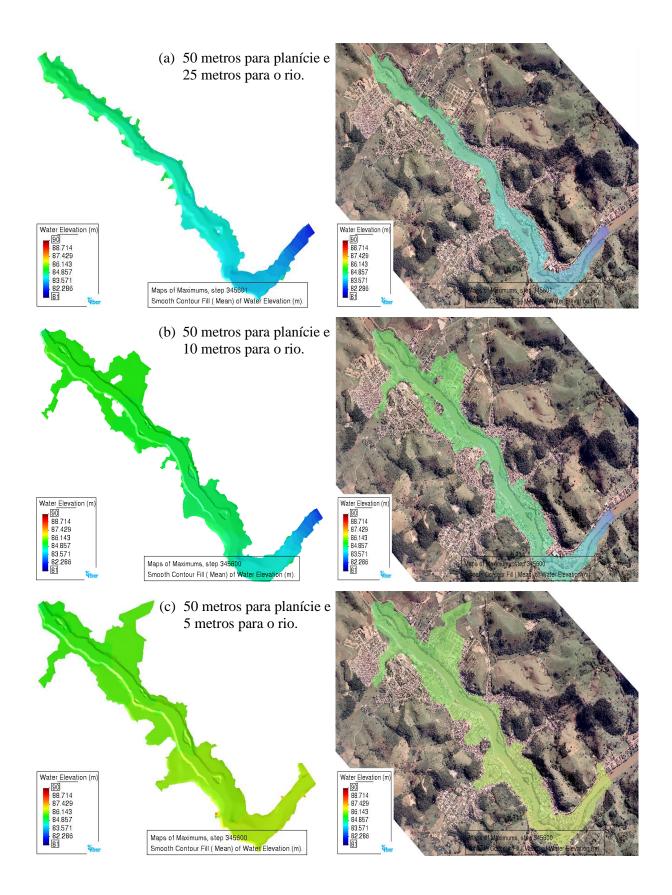
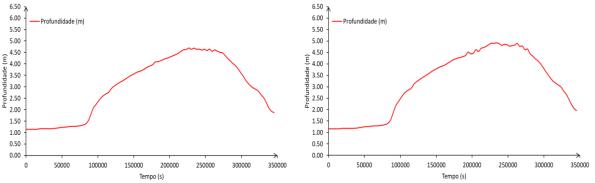


Figura 4.23 - Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 25, 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície constante.

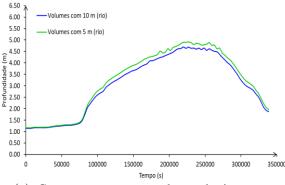
Na comparação dos mapas de máximo de profundidade e elevação da lâmina d'água, foi possível constatar que a variação do tamanho dos elementos da malha do rio impacta significativamente na altura da onda de cheia, como visualizado nos gráficos para a variação da profundidade e elevação ao longo do tempo, uma vez que uma malha mais refinada representa melhor as características topográficas da região.

Em resumo, nessas primeiras variações do tamanho dos elementos da malha, verificouse que, apesar dos valores do pico de cheia alternarem de acordo com a malha, a utilização de elementos de tamanhos menores, proporciona uma melhor caracterização das superfícies.

Sendo assim, em seguida, foi feita uma nova variação do tamanho dos elementos da malha, adotando-se elementos de 10 e 5 metros para o rio, mantendo a malha da planície em 10 metros. Nas Figuras 4.24 e 4.25 são mostradas a evolução da profundidade e elevação da lâmina d'água ao longo do tempo, na ponte Raul Veiga, no centro da cidade de Santo Antônio de Pádua.

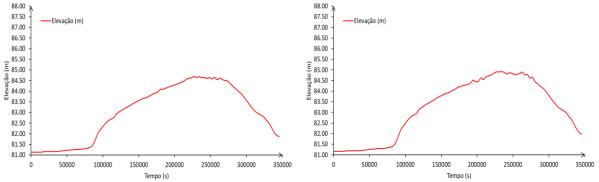


(a) 10 metros para planície e 10 metros para o rio. (b) 10 metros para planície e 5 metros para o rio.

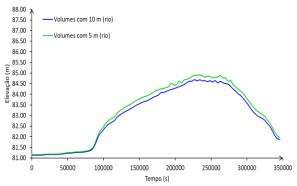


(c) Comparação entre os volumes do rio.

Figura 4.24 - Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície em 10 metros.



(a) 10 metros para planície e 10 metros para o rio. (b) 10 metros para planície e 5 metros para o rio.



(c) Comparação entre os volumes do rio.

Figura 4.25 - Perfil da elevação d'água na ponte Raul Veiga, variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície em 10 metros.

Fonte: A Autora (2022).

Foi possível constatar que, quando reduzido o tamanho da malha do rio para $10 \, m$, a quantidade de elementos aumentou em 8.602, e o tempo de simulação dobrou. E, ao reduzir a medida para $5 \, m$, o número de elementos aumentou em $41.030 \, e$ o tempo foi, aproximadamente, $9 \, vezes \, maior$.

Adiante, foi realizada a análise dos mapas de máximo para a profundidade e para a elevação da superfície livre (lâmina d'água) para o período simulado, conforme mostrado nas Figuras 4.26 e 4.27.

Na análise e comparação dos mapas de máximo ao longo do tempo para o perfil da profundidade e lâmina d'água, foi possível constatar que as manchas de inundação foram mais similares para as duas malhas adotadas. Logo, entende-se que a variação das malhas, nesse caso, não ocasionou impactos significativos na onda de cheia ocorrida. Por outro lado, para esses casos com um maior refinamento das malhas, foram necessárias 24 horas, aproximadamente, para o término da simulação.

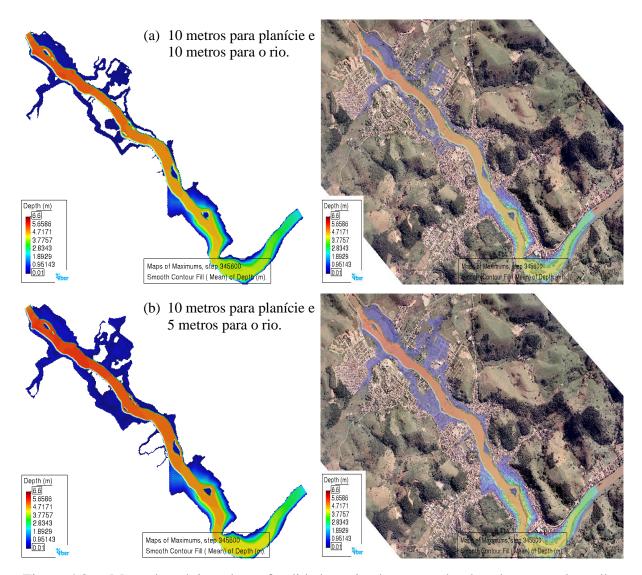


Figura 4.26 - Mapa de máximo da profundidade variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície em 10 metros.

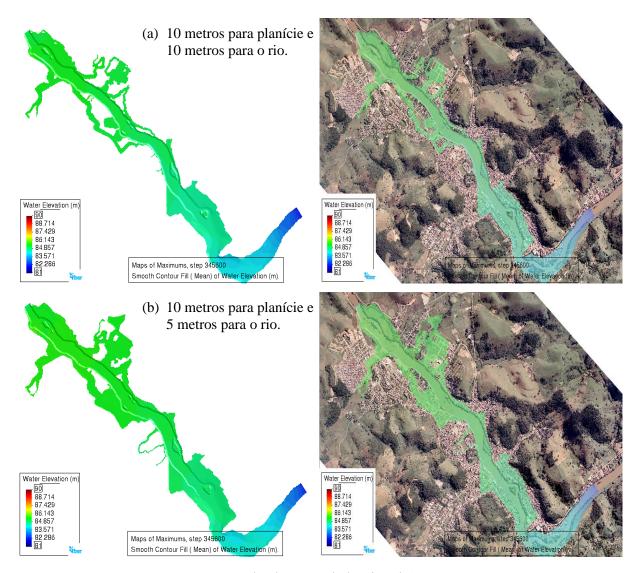


Figura 4.27 - Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água variando o tamanho dos elementos da malha do rio em 10 e 5 metros, mantendo a malha da planície em 10 metros.

4.3 Análise da Influência da Zona Urbanizada

Nessa seção, é feita uma análise da influência da área urbanizada na onda de cheia ocasionada pela elevação dos níveis d'água no rio Pomba no trecho em que o mesmo "corta" a cidade de Santo Antônio de Pádua. Os dados utilizados nas simulações para a região de interesse, os quais envolvem as condições de contorno, concentração inicial, coeficientes de rugosidade e tempo de simulação são os mesmos das simulações anteriores.

Para isso, além das superfícies relacionadas a planície e ao rio, também foram incluídas as regiões que representam as edificações e vias da área urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua. Nesse sentido, foram considerados três cenários:

- Cenário A: Construção das superfícies da planície, rio, edificações e vias da área urbanizada utilizando a topografia original.
- Cenário B: Construção das superfícies da planície, rio, edificações e vias da área urbanizada com elevação da topografia nos locais onde se encontram as construções.
- Cenário C: Construção das superfícies da planície, rio e vias da área urbanizada, desconsiderando os locais onde se encontram as construções.

Na Figura 4.28 são mostradas as superfícies considerando os Cenários A e B, enquanto na Figura 4.29 e apresentada a caracterização do terceiro cenário.

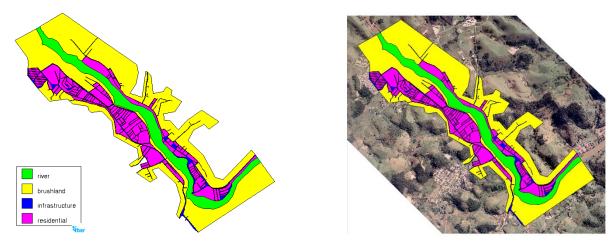


Figura 4.28 - Superfícies representando as planícies, rio, edificações e vias da área urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua.

Fonte: A Autora (2022).

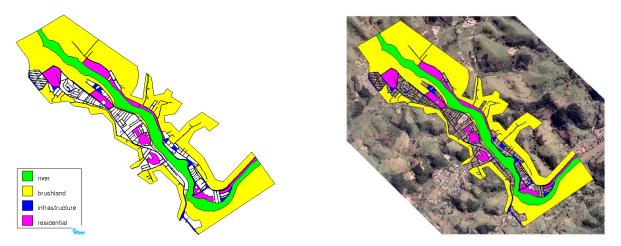


Figura 4.29 - Superfícies representando as planícies, rio e vias da área urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua, com a área das construções/edificações desconsideradas.

Para a realização das simulações envolvendo os três cenários descritos anteriormente, de acordo com os resultados sobre a variação da malha computacional na sessão anterior, nessa sessão, foi adotada uma malha com elementos de tamanho 20 metros para as superfícies que representam a planície, 10 metros para os elementos da malha do rio e 5 metros para as vias presentes na área urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua. No que se refere às edificações, nos Cenários A e B, utilizou-se elementos de 50 metros, uma vez que as mesmas tiveram sua topografia elevada. No caso do Cenário C, não foram construídas malhas nessas regiões edificadas. Nas Figuras 4.30-4.32, são mostrados os tamanhos dos elementos das malhas, bem como a representação das respectivas malhas na perspectiva 3D.

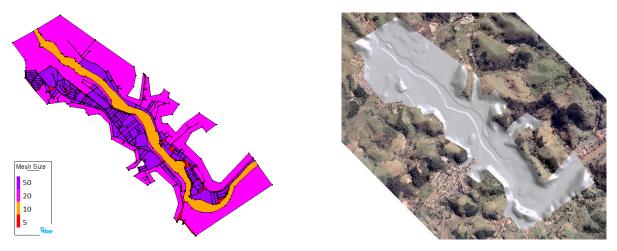


Figura 4.30 - Representação do tamanho dos elementos da malha e vista tridimensional da mesma para o Cenário A.

Fonte: A Autora (2022).

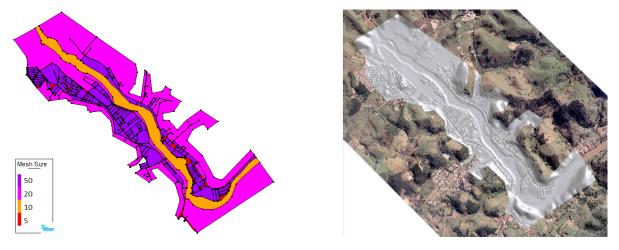


Figura 4.31 - Representação do tamanho dos elementos da malha e vista tridimensional da mesma para o Cenário B.



Figura 4.32 - Representação do tamanho dos elementos da malha e vista tridimensional da mesma para o Cenário C.

Nas Figuras 4.33 e 4.34, são mostradas, respectivamente, a evolução da profundidade e da elevação da lâmina d'água ao longo do tempo, na ponte Raul Veiga, no centro da cidade de Santo Antônio de Pádua.

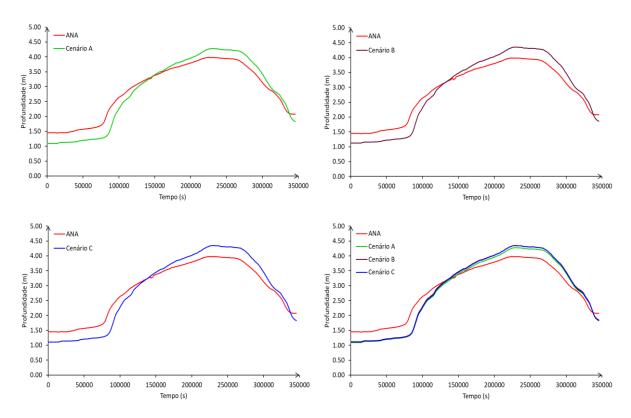


Figura 4.33 - Perfil da profundidade na ponte Raul Veiga para os Cenários A, B e C simulados.

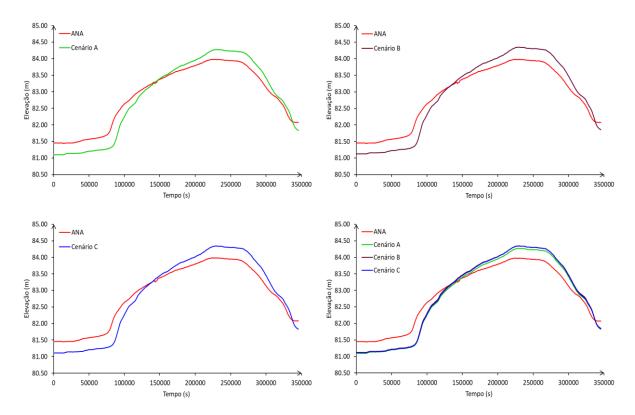


Figura 4.34 - Perfil da elevação d'água na ponte Raul Veiga para os Cenários A, B e C simulados.

Foi possível constatar que a onda de cheia atingiu o pico a partir de 211.000s nos Cenários A e B, enquanto no Cenário C, isso ocorreu a partir de 213.000 s, mas logo em seguida começou a baixar. Além disso, para o ponto tomado como referência para avaliar a evolução dos níveis d'água ao longo do tempo, onde encontra-se a estação da ANA, verifica-se uma sutil diferença entre o perfil traçado no Cenário A em relação os outros dois cenários (Cenário B e Cenário C).

Adiante, foi realizada a análise dos mapas de máximo ao longo do tempo para a profundidade e elevação da lâmina d'água, conforme Figuras 4.35 e 4.36.

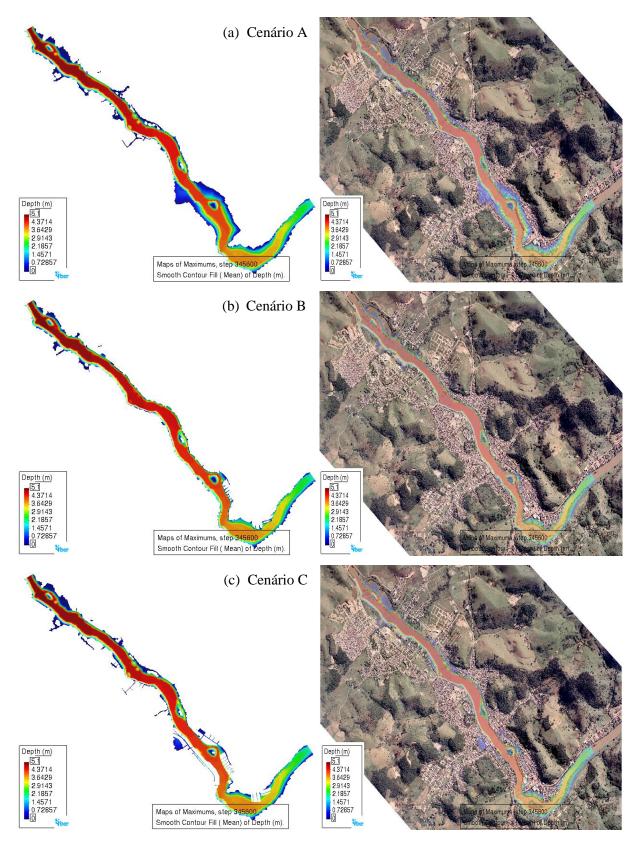


Figura 4.35 - Mapa de máximo da profundidade para os Cenários A, B e C simulados. Fonte: A Autora (2022).

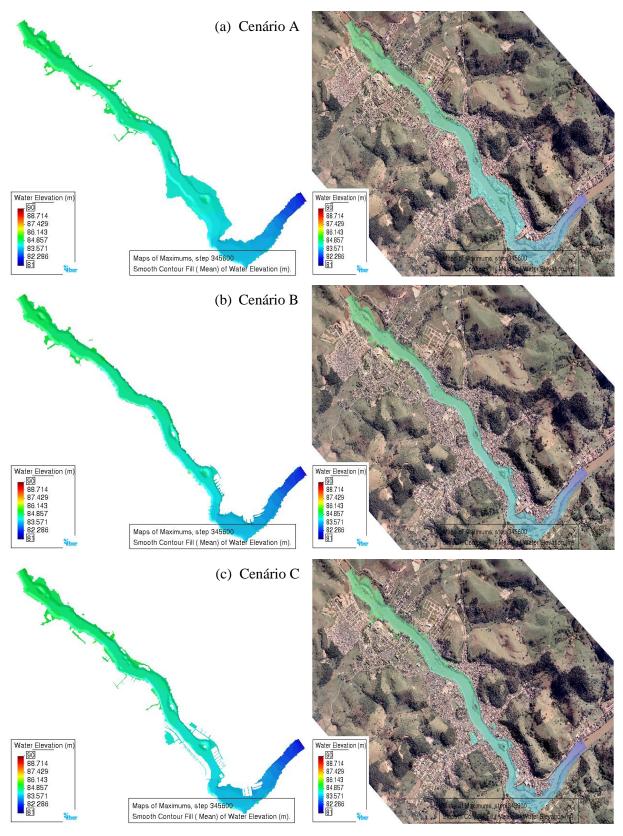


Figura 4.36 - Mapa de máximo da elevação da lâmina d'água para os Cenários A, B e C simulados.

Constata-se, que a região que não representa as infraestruturas alagou primeiro, pois está exatamente no mesmo nível da cota de transbordo do rio Pomba em Santo Antônio de Pádua. Após, começou a alagar na planície.

No que se refere à área residencial, por estar representada com uma malha mais refinada, é possível perceber que, em pouco tempo, essa água atingiu toda a planície ao longo do percurso do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua. Além disso, no Cenário C, as ruas foram mais afetadas, quando comparado com a simulação envolvendo o Cenário B.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento desta pesquisa, bem como possíveis desdobramentos que a mesma possa vir a proporcionar com sua continuidade.

5.1 Conclusões

O presente estudo buscou realizar uma análise de eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ 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. Para esse propósito, a pesquisa apresentou modelos matemáticos, já consolidados, acoplados a softwares computacionais, direcionados a análise dos eventos de inundações.

É importante destacar que, a partir das pesquisas realizadas neste estudo, pode-se obter informações esclarecedoras sobre os fenômenos naturais relacionados ao ciclo hidrológico para a compreensão do que seriam as inundações e as enchentes, além de se ter uma ideia de como é a geografia e história do local e objeto de estudo, neste caso, o rio Pomba e o município de Santo Antônio de Pádua, o qual vem sofrendo com constantes inundações e enchentes ao longo dos anos devido as cheias do referido curso d'água.

Com base nestas informações e outros dados que foram obtidos na consolidação deste estudo, iniciou-se a construção de um modelo digital da região de estudos com a finalidade de simular eventos de inundações. Nesse sentido, nas primeiras simulações, foi possível constatar que, assim como o ocorrido com a variação da malha na planície, quando o tamanho dos elementos da malha do rio é reduzido, eleva-se o tempo de simulação, bem como há uma maior estabilidade do modelo.

Na comparação dos mapas de máximo de profundidade e elevação da lâmina d'água, foi possível verificar que a variação do tamanho dos elementos da malha do rio impacta significativamente na altura da onda da cheia.

Nessas primeiras variações do tamanho da malha, verificou-se que, apesar dos valores de pico de cheia alternarem de acordo com a malha, a utilização de elementos de tamanhos menores, proporciona uma melhor caracterização das superfícies.

No entanto, no que se refere a essa variação da malha, é pertinente ressaltar que, nesse trabalho, foi realizada uma verificação simples sobre a mesma, uma vez que o processo de análise ocorreu apenas de forma gráfica, onde comparou-se o perfil da profundidade do rio em um ponto de seu leito, ao longo do tempo, mediante à variação/refinamento no tamanho dos elementos em cada uma das superfícies. Nesse sentido, torna-se importante uma análise mais detalhada no que se refere à determinação de um critério mais robusto para investigar os impactos da malha nos resultados obtidos, algo não explorado nesse trabalho devido, dentre outros fatores, às limitações de hardware.

Além disso, a análise das simulações permitiu constar que a região que não apresenta as infraestruturas alagou primeiro, pois está exatamente no mesmo nível da cota de transbordo do rio Pomba em Santo Antônio de Pádua-RJ. Após, começou a alagar a planície e as vias entre as áreas residenciais situadas ao longo do percurso do rio.

Por fim, verificou-se que os resultados numéricos obtidos por meio das simulações no software IBER, tiveram ajuste satisfatório tomando como referência os dados de níveis d'água reais da estação da ANA no centro da cidade de Santo Antônio de Pádua. No entanto, é importante investigar outros pontos da cidade para analisar se os mesmos estão coerentes, uma vez que possíveis diferenças podem ocorrer devido ao MDE utilizado.

Diante do exposto, a conclusão que se chega neste estudo é que a implementação deste sistema utilizando o software IBER para análise de eventos de cheias do rio Pomba na cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ possui uma aplicabilidade de grande relevância, uma vez que, pode contribuir com os órgãos direcionados a gestão da administração pública municipal que atuam diretamente no enfrentamento desses problemas com propostas de soluções.

5.2 Trabalhos Futuros

A partir dos resultados desse estudo, deseja-se ajustar o modelo de forma a apresentar os resultados para os três eventos de inundação entre janeiro e março de 2022 e analisar o período de retorno das chuvas ocorridas em Santo Antônio de Pádua. O uso prático das informações e conhecimentos adquiridos neste estudo configura-se como sendo uma das principais metas a serem alcançadas para que sua relevância seja posta em evidência.

Dessa forma, a ideia é projetar esse conhecimento para fora do meio acadêmico e leválo a prática, dando-lhe, neste caso, uma função social capaz de contribuir com o bem-estar e a segurança dos munícipes de Santo Antônio de Pádua-RJ no caso de enfrentamento de fortes chuvas capazes de provocar inundações e enchentes. Existe, ainda, a proposta de um estudo para a implantação desse sistema em outras localidades, as quais também estejam passando por uma situação semelhante, em que eventos climáticos como chuvas ocasionam enchentes e inundações e, consequentemente, prejuízos a sociedade e administração pública com perdas materiais e humanas.

Não menos importante, deseja-se, também, aperfeiçoar o modelo, incluindo mais informações sobre a região investigada, para o uso prático e que possa gerar benefícios sociais e econômicos para a mesma.

Além disso, como aperfeiçoamentos a serem realizados no modelo, tem-se, ainda, a intensão de utilizar um computador com uma configuração mais robusta (mais memória RAM, por exemplo) de forma que possa serem feitas análises investigativas mais aprofundadas quanto à variação/refinamento da malha espacial adotada e sua influência nos resultados obtidos.

Como dito na seção anterior, há a necessidade de se criar o um critério mais robusto quanto à variação da malha computacional. Uma vez que a solução exata do problema não é conhecida, torna-se difícil estabelecer um erro. Porém, como desdobramento dessa pesquisa, pode-se criar uma sequência de malhas refinadas e calcular o erro relativo dado pela integral da diferença entre as mesmas, estabelecendo-se um erro mínimo, *a priori*, de forma a se ter mais confiança que o impacto da malha na solução do problema seja menor.

Por consequência, uma análise mais aprofundada sobre o coeficiente de rugosidade utilizando dados sobre o uso e ocupação do solo, também pode ser realizada, fazendo com que o modelo caracterize a região de interesse de maneira mais realística.

Visando a estruturação de um modelo mais representativo para a região, pretende-se, também, realizar uma análise sobre a ocorrência de precipitações locais e seus impactos nos níveis d'água do rio Pomba na zona urbanizada da cidade no que se refere às cheias e inundações. Nesse sentido, uma análise sobre a relação entre volume de chuva ocorrida na região e elevação do nível do rio torna-se relevante.

REFERÊNCIAS

AGENCIA BRASIL. **Dez pessoas já morreram por causa das chuvas que assolam o Rio.** Empresa Brasil de Comunicação. Jan, 2004.

AMARAL, R.; MONI, S. Você sabe o que é inundação? São Paulo, SP: Instituto Geológico, 2020.

ANA. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br. Acesso em: 10 de set. de 2021.

ANDRADE, V. S. Análise de hidrodinâmica ambiental e de qualidade de água na Baía de Guanabara via modelagem computacional. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro- RJ, 2018.

BACELAR, L. C. S. D. **Prognóstico de inundações bruscas utilizando conjuntos de previsões em curto prazo de radar meteorológico.** 121f. Dissertação (Metrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – São José dos Campos: INPE, 2017.

BLADÉ, E.; CEA, L.; CORESTEIN, G.; ESCOLANO, E.; PUERTAS, J.; VÁZQUEZ-CENDÓN, E.; DOLZ, J.; COLL, A. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo em ríos. En: Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. 2014.

BRASIL. Cidades-Brasil. **Município de Santo Antônio De Pádua.** Disponível em: https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-santo-antonio-de-padua.html>. Acesso em: 12 de out. de 2021.

______. Instituto Brasileiro de Geografias e Estatística – IBGE. **Santo Antônio de Pádua.**Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/santo-antonio-de-padua/panorama>.

Acesso em out. de 2021.

_____. Prefeitura Municipal de Santo Antônio de Pádua - RJ. **Plano Municipal de Saneamento Básico.** Volume 2: Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental. – 2019

CARMO, B.; MARTINS, M.; GOMES, A.; SANTOS, P. P. Cheias na Foz do Rio Sabor: comparação dos perímetros de inundação definidos pelo método hidro-histórico e pela modelação hidráulica (software Iber). **Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos,** Vol. XI, 2019.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D.B. **Hidrologia**. Apostila da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2006.

COSEAC. **Santo Antônio de Pádua: estância hidro-mineral**. Disponível em: http://www.coseac.uff.br/cidades/padua_old.htm>. Acesso em: 10 de out. de 2021.

COSTA, F. P. D. Dispersão da Pluma de Rejeitos de Minério de Ferro na Região Costeira Adjacente do rio Doce-ES após o Rompimento da Barragem de Fundão — Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Ambiental, 2018.

DESCHAMPS, J. C. Modelos algébricos e diferenciais. **Primeira escola de turbulência**, RJ, Brasil, pp. 99-155, 1998,

FONTENELLE, M.; BARANDIER, H. O plano diretor de Santo Antônio de Pádua-RJ: a relação da cidade com o Rio Pomba. **Revista de direitos difusos**, v. 9, n. 46, p. 7-27, maio/ago. 2008.

- G1. **Rio Pomba transborda e alaga ruas em Santo Antônio de Pádua, no RJ**. Dez. 2018. Disponível em: https://g1.globo.com/rj/norte-fluminense/noticia/rio-pomba-transborda-e-alaga-ruas-em-santo-antonio-de-padua-no-rj.ghtml. Acesso em: 15 de out. de 2021.
- G1. **Santo Antônio de Pádua enfrenta o drama das enchentes.** Dez. 2008. Disponível em: http://g1.globo.com/VCnoG1/0,,MUL928023-8491,00-

SANTO+ANTONIO+DE+PADUA+ENFRENTA+O+DRAMA+DAS+ENCHENTES.html>. Acesso em: 17 de out. de 2021.

GODOY, A. S. Pesquisa Qualitativa: Tipos Fundamentais. **Revista de Administração de Empresas São Paulo**, v. 35, n.3, p, 20-29 Mai./Jun. 1995.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. Disponível em: https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf>. Acesso em: 19 de set. de 2021.

GONÇALVES, J. C. Homem-Natureza: Uma Relação Conflitante Ao Longo Da História. **Revista Multidisciplinar da UNIESP Saber Acadêmico,** nº 06, Dez. 2008.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. 8 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

HANJALIC, K. Advanced turbulence closure models: a view of current status and future prospects. **International J. Heat and Fluid Flow**, vol.15, n 3, pp. 178-203, 1994.

HUBERMAN, L. **História da riqueza do homem.** Tradução de Waltensir Dutra, 29 Ed., Rio de Janeiro, Zahar editores, 2009.

IBER. Modelización Bidimensional del Flujo em Lámina Libre em Aguas Poco Profundas. Manual Básico de Usuário. Gobierno de España. 23.05.2012.

JULIANO, M. M. F.; NEVES, R.; RODRIGUES, P. P. G.; LUGON JUNIOR, J.; FERNANDES, R. Aplicação da Plataforma MOHID para simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos – RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Campos dos Goytacazes/RJ, v.6, n1, jan/jun, 2021.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos metodologia científica**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

MAGRO, G. R. Modelagem numérica e computacional da hidrodinâmica de reservatórios utilizando as equações bidimensionais de Saint-Venant [recurso eletrônico]/.2018.

MAIA, K. Maior enchente de Santo Antônio de Pádua Completa dez Anos. Disponível em: https://sfnoticias.com.br/maior-enchente-da-historia-de-padua-completa-10-anos-veja-fotos>. Acesso em: 19 de out. de 2021.

MAPIO.NET. **Nascente Rio Pomba.** Disponível em: https://mapio.net/pic/p-71089059/>. Acesso em: 20 de out. de 2021.

MARTINS, M. M. C.; GOMES, A. A. T.; SANTOS, P. P. Delimitação de Áreas Inundáveis no Centro Urbano de Amarante, Norte de Portugal, Utilizando o Software Iber. **Rev. Bras. Geomorfol.** (Online), São Paulo, v.20, n.1, (Jan-Mar) p.185-200, 2019.

MEIRINHOS, M.; OSÓRIO, A. O estudo de caso como estratégia de investigação em educação. **EDUSER: revista de educação**, Vol 2 (2), 2010.

MENDONÇA, R. Conservar e criar: natureza, cultura e complexidade. Editora Senac, São Paulo. São Paulo, 2005.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. Ciclo Hidrológico Planetário: abordagens e Conceitos. **Geo UERJ** - Ano 12, v.1, nº 21, 1º semestre de 2010.

NETTO, J. L. S. **A Mesopotâmia e seus Povos.** Museu de Topografia Prof. Laureano Ibrahim Chaffe – Porto Alegre-RS. Janeiro/2009.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada.** Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Texto Básico. Graduação em Engenharia de Bioprocesso e Biotecnologia. Caxias do Sul RS, 2004.

PEITER, C. C.; CARRISSO, R. C. C.; PIRES, D. C. B. **O** Arranjo Produtivo Local de Santo Antônio de Pádua. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1181/1/O%20Arranjo%20Produtivo%20Local%20de%20Santo%20Ant%C3%B4nio.pdf. Acesso em: 21 de set. de 2021.

PIRACIABA, B.; LEMOS, L. **Dinâmicas territoriais no estado do Rio de Janeiro:** reflexões em torno da região Noroeste Fluminense. In: MARAFON, G.J., and RIBEIRO, M.A. orgs. Revisitando o território fluminense, VI [online]. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2017.

PONCE, A. Educação e luta de classe. 24 ed. São Paulo: Cortez: Autores Associados, 2015.

RITTO, C. Chuva deixa moradores ilhados em Santo Antônio de Pádua, no noroeste fluminense. **Revista Veja**. Ed. Abril, Janeiro de 2012.

ROSA, M. M. A Ocupação Urbana Próxima Às Margens De Rios: Um Estudo De Caso Da Localidade Vila Francesa Do Município De Criciúma – SC. 61f. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharel em Geografia) Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC. Criciúma – SC, 2011.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (Editores). **Conceitos de bacias hidrográficas:** teorias e aplicações. Ilhéus - BA: Editoria Editus, 2002.

SERRANEWS. **Pádua tem cerca de 3.500 desalojados por causa das chuvas.** Disponível em: https://www.serranewsrj.com.br/2020/02/padua-tem-desabrigados-e-desalojados-porcausa-das-chuvas.html>. Acesso em: 15 de fev. de 2022.

SILVA, A. J. H. Metodologia de pesquisa: conceitos gerais. UNICENTRO, Paraná, 2014.

SILVA, R. R. Bacia do Rio Pomba (MG): Uso e ocupação do solo e impactos ambientais nos recursos hídricos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Goiás. 2014.

SOUZA, G. M.; ROMUALDO, S. S. Inundações Urbanas: A percepção sobre a problemática socioambiental pela comunidade do bairro Jardim Natal — Juiz de Fora (MG). **XIII SBGFA Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Rio Claro (SP). 2009.

STUDART, T; CAMPOS, N. **Apostila da Disciplina de Hidrologia Aplicada**, Universidade Federal do Ceará. 2001.

TELLES, W. R. Simulação do transporte horizontal bidimensional de substância conservativa. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2009.

TOPODATA. **Banco de Dados Geomoformétricos do Brasil.** Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/topodata. Acesso em 12 de jul. de 2021.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 3.ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2000.

VIEIRA, S. D. Logística Humanitária para Amenizar as Consequências Das Inundações em Santo Antônio De Pádua. 123p. Dissertação (Mestrado Departamento de Engenharia Industrial) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de janeiro-RJ, 2013.

XAVIER, F. R. L. Análise da Hidrodinâmica do Rio Jaguaribe Utilizando o Modelo Numérico DELFT 3D Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2019.