

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Bibiana Peruzzo Bulé

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANHADO DO TAIM

Santa Maria, RS

2020

Bibiana Peruzzo Bulé

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANHADO DO TAIM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rutineia Tassi

Santa Maria, RS

2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Bulé, Bibiana
SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANHADO DO
TAIM / Bibiana Bulé.- 2020.
145 p.; 30 cm

Orientadora: Rutineia Tassi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, RS, 2020

1. Banhados 2. Modelagem Hidrológica 3. MDE 4.
Nível de água I. Tassi, Rutineia II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, BIBIANA BULÉ, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Bibiana Peruzzo Bulé

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANHADO DO TAIM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Aprovado em 27 de fevereiro de 2020:

Rutineia Tassi, Dra. (UFSM)

(Presidente/Orientador)



Adriano Rolim da Paz, Dr. (UFPB) - videoconferência

Daniel Gustavo Allasia Picilli, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2020

RESUMO

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANHADO DO TAIM

AUTORA: Bibiana Peruzzo Bulé

ORIENTADORA: Rutineia Tassi

Áreas úmidas são ecossistemas alagadiços de grande biodiversidade, reconhecidos como um dos mais valiosos recursos naturais do mundo. O ecossistema de área úmida objeto de estudo deste trabalho é o Banhado do Taim (BT). Localizado na porção sul do estado do Rio Grande do Sul (Brasil), o local onde está inserido o BT possui exploração de áreas para cultivo de arroz, o que torna uma necessidade a retirada de massivos volumes de água de sua tributária, a Lagoa Mangueira. Sendo assim, este sofre de constantes conflitos pelo uso da água, já que por um lado tem-se a dependência econômica local relacionada a agricultura e, por outro lado, necessita-se de condições relacionadas à disponibilidade hídrica para a manutenção das espécies e dos habitats do BT. Além da agricultura, a dinâmica do BT é influenciada diretamente pelos sistemas vizinhos, pelas estruturas inseridas na região e pelos fatores climáticos, ou seja, alterações em componentes climáticas ou regionais podem ser capazes de promover alterações no BT. Sendo um ecossistema complexo, de grande importância para a sociedade e que vem sofrendo com problemas de gestão, surge a necessidade de se ajustar um modelo hidrológico-hidrodinâmico atual que represente os fenômenos que ocorrem na região, para que se possa entender os impactos das mudanças externas nos níveis de água do BT e mapear as condições de inundação e seca, servindo como ferramentas de gestão e planejamento para estas áreas. Para isso, primeiramente foi aprimorado o modelo digital de elevação local para contemplar as características relevantes na propagação do escoamento. Através das imagens de satélite, medições em campo e informações obtidas de estudos anteriores foi possível melhorar a caracterização geral do relevo através da inserção de feições como estradas, canais de drenagem e executar as intervenções de terreno necessárias para a inserção de estruturas hidráulicas. Utilizando essa informação de terreno completa como base, combinando com dados hidrológicos e informações relevantes da área de estudo, o modelo para representar a dinâmica do BT foi ajustado através do HEC-RAS 5.0.7, um software livre, que recebe constantes atualizações. Com isso, o modelo calibrado fornece, dentre outras informações, o nível do BT em função da variabilidade dos níveis da Lagoa Mangueira e dos demais dados de entrada, como por exemplo a precipitação e evaporação locais. Além disso, o modelo leva em consideração as características físicas do BT, como o relevo e a existência de macrófitas emergentes que influenciam no escoamento para que o resultado seja fiel aos processos que influenciam em sua dinâmica. Os resultados de calibração e validação deste modelo apresentam NSE de 0,90 e 0,79, PBIAS de -1,7% e 5,4% e RSR de 0,32 e 0,46 e foram classificados como “muito bons” e “bons” de acordo com a metodologia de avaliação adotada. Através do resultado, tem-se uma lâmina de água espacializada para todos os períodos da simulação, hidrogramas nas estruturas hidráulicas, informações de velocidade em todos os pontos da simulação, demonstração da direção de fluxo em todo o sistema além da possibilidade de criar cenários de simulação.

Palavras-chave: Área úmida. Gestão. Modelo hidrológico-hidrodinâmico. Nível de água.

ABSTRACT

2D HYDRODYNAMIC MODELING OF THE TAIM WETLAND

AUTHOR: Bibiana Peruzzo Bulé

ADVISOR: Rutineia Tassi

Wetlands are swampy ecosystems of great biodiversity, recognized as one of the most valuable natural resources in the world. The ecosystem focus of this study is the Taim Wetland (TW). Located in the southern portion of Rio Grande do Sul (Brazil) the place where TW is situated has large exploitation of areas for rice cultivation, which makes it necessary to withdraw massive volumes of water from its tributary, the Mangueira Lake. As a consequence, TW suffers from constant conflicts over the use of water in the region, since on one side there is local economic dependence on rice cultivation by the population and, on the other hand, conditions related to water availability are vital for maintaining the TW species and habitats. In addition to agriculture, the dynamics of TW are influenced directly by the neighboring systems, by structures inserted in the region and also by the climatic factors, which means that changes in climatic or regional components may be able to promote changes in TW. Since TW is a complex ecosystem of great importance to society which is suffering from management problems, there is a need to adjust a modern hydrological-hydrodynamic model that represents the phenomena that occur in the region, so that can be a better understanding of how external changes are able to lead to impacts in the water levels of TW and map floods and droughts conditions, serving as management and planning tools for these areas. In order to achieve the purpose of the study, the digital elevation model of the terrain was improved to include the relevant characteristics for flow propagation. Through satellite images, measurements in the field and information obtained from previous studies, it was possible to improve the general characterization of the terrain by inserting features such as roads, drainage channels and performing interventions for modeling the hydraulic structures. Based on the terrain information, hydrological data and important information of the study area, the model was set up to represent the dynamics of the TW using HEC-RAS 5.0.7, a free software, constantly updated. Thus, the calibrated model provides, among other information, the TW water level as a function of the variability in the water levels of Mangueira Lake and other input data, such as local precipitation and evaporation. In addition, the model represents physical characteristics of TW, such as the topographic information and the presence of macrophytes that influence the dynamics, so the result is faithful to the processes that influence its dynamics. The results of calibration and validation of this model were classified as “very good” and “good” according to the evaluation methodology adopted (NSE 0.90 and 0.79, PBIAS of -1.7% and 5.4% and RSR of 0.32 and 0.46). Through the result, there is a spatialized water layer for all periods of the simulation, hydrographs in the hydraulic structures, speed information at all points of the simulation, demonstration of the flow direction in the entire system and the possibility to create different simulation scenarios.

Keywords: Wetland. Management. Hydrological-hydrodynamic model. Water Level.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área de estudo.	41
Figura 2 - Presença de lagoas internas, canal preferencial e BR-471.....	42
Figura 3 - Pontos cotados na Lagoa Mangueira distribuídos ao longo dos perfis.....	45
Figura 4 - MDE do Banhado do Taim desenvolvido em estudos anteriores com detalhamento das lagoas internas.	46
Figura 5 - Imagens de satélite utilizadas para determinação das características da região de entorno.....	48
Figura 6 - Imagem de satélite (a), imagem SRTM (b) e MDE disponível (c).	50
Figura 7 - Fotografias aéreas da região das comportas.	51
Figura 8 - Túnel para passagem de animais.	51
Figura 9 - Representação esquemática dos dados utilizados na geração de um MDE integrado.	52
Figura 10 – Resultado obtido através da união e recorte de imagem SRTM (a); Imagem SRTM com adição do relevo de fundo do BT e Batimetria da Lagoa Mangueira (b); MDE resultante (c).....	56
Figura 11 - Localização dos perfis longitudinais do Banhado do Taim e da interface com a Lagoa Mangueira.....	57
Figura 12 - Perfis topográficos dos cortes A-A', B-B', C-C' e D-D'.....	58
Figura 13 - Áreas alagadas para diferentes permanências no Banhado do Taim.....	60
Figura 14 - Curva cota-área do Banhado do Taim.	61
Figura 15- Curva cota-volume do Banhado do Taim.....	61
Figura 16 - Curva cota-área-volume da Lagoa Mangueira.....	62
Figura 17 - O Sistema Hidrológico do Taim e seus componentes.	80
Figura 18 - Sazonalidade da (a) precipitação, (b) irrigação, (c) evaporação e (d) níveis de água no Banhado do Taim.	81
Figura 19 - Representação esquemática das informações do modelo.	85
Figura 20 - MDE da região de estudo.	88
Figura 21 - Padrão de vegetação para condições hidrológicas médias.....	92
Figura 22 - Representação do módulo Taim e estruturas hidráulicas no HEC-RAS.	93
Figura 23 - Localização das estruturas hidráulicas inseridas no modelo.	94
Figura 24 - Localização dos túneis para passagem de animais.	95
Figura 25 - Fotos aéreas das comportas ao Norte do BT (a - Lagoa Mirim; b- Estrada; c - BT).	95
Figura 26 - Representação dos túneis e das comportas dentro do modelo.....	96
Figura 27 - Representação esquemática dos vertedores da interface Banhado - Lagoa.....	97
Figura 28 - Série utilizada como referência na calibração.	100
Figura 29 - Observações das réguas Cachorro e Negreiros juntamente com o resultado da simulação utilizada como referência.	107
Figura 30 - Hidrogramas laterais para diferentes valores de Coeficiente de escoamento.....	109
Figura 31 - Nível de água simulada para diferentes condições de níveis iniciais.	111
Figura 32 - Resultado da simulação obtido para o período de 1960 - 2019.....	114
Figura 33 – Resultado da simulação obtido para o período de 1980 a 2019.....	114

Figura 34 - Lâmina de água e velocidade espacializadas para três condições hidrológicas..	116
Figura 35 - Detalhe da inversão de fluxo na região das comportas.	117
Figura 36 - Vazão simulada nas comportas e níveis de água no BT e L. Mirim.	118
Figura 37 - Dados observados e simulados para dois pontos do Banhado do Taim.	119
Figura 38 - Cenário I: Comportas fechadas.	120
Figura 39 - Cenário II: Redução nas taxas de irrigação.	122
Figura 40 - Cenário III: Extinção da irrigação.	123
Figura 41 - Curva de permanência de níveis de água para os diferentes cenários.	124
Figura 42 - Hidroperíodo para os cenários analisados.	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de valores testados para os coeficientes de cada estrutura.	102
Tabela 2 - Coeficientes de Manning utilizados como referência para calibração nas diferentes feições da área interna do Banhado do Taim.....	104
Tabela 3 – Funções objetivo para análise de C_e	110
Tabela 4 - Parâmetros atribuídos para as estruturas hidráulicas.....	112
Tabela 5 - Valores de referência e valores atribuídos de rugosidade para as feições na região interna do Banhado do Taim.	113
Tabela 6 – Coeficientes estatísticos para os dois períodos considerados na calibração.....	115
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos da validação.	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese das informações disponíveis para a realização do estudo.....	44
Quadro 2 - Resumo dos dados disponíveis para a realização do estudo.	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C_e	Coefficiente de escoamento
Vol_{irr}	Volume de água retirado para irrigação (hm^3)
Δt	Passo de tempo (s)
Δx	Tamanho da célula (m)
Acc	Área de contribuição da Lagoa Mangueira (m^2)
Am	Área média da Lagoa Mangueira (m^2)
BT	Banhado do Taim
C	Celeridade da onda ($m.s^{-1}$),
Cr	Número de Courant
DEM	Digital Elevation Model
DHM	Digital Height Model
DSF	Digital Surface Model
E	Evaporação (mm)
ESEC-Taim	Estação Ecológica do Taim
g	Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$)
h	Altura da lâmina de água (m).
MDE	Modelo Digital de elevação
MNT	Modelo numérico do terreno
NSE	Coefficiente Nash-Sutcliffe efficiency
P	Precipitação (mm)
PBIAS	Percent bias
Q	Vazão mensal recebida ou retirada da Lagoa Mangueira (m^3s^{-1})
RSR	RMSE-observations standard deviation ratio
SGE	Sistema Geográfico do Exército
SHT	Sistema Hidrológico do Taim
SPF	Sistema de Proteção à Fauna
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	21
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	22
1.2.	OBJETIVOS.....	23
1.2.1.	Objetivo geral.....	23
1.2.2.	Objetivos específicos.....	23
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1.	ÁREAS ÚMIDAS.....	25
2.2.	O HIDROPERÍODO EM ÁREAS ÚMIDAS.....	26
2.3.	GESTÃO EM ECOSSISTEMAS DE ÁREAS ÚMIDAS.....	27
2.4.	MODELAGEM DE ÁREAS ÚMIDAS.....	28
CAPÍTULO I – APRIMORAMENTO DE UM MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO PARA REGIÃO DE ÁREA ÚMIDA COM BASE NA FUSÃO DE IMAGENS SRTM COM DADOS TOPOGRÁFICOS.....		33
1.	INTRODUÇÃO.....	37
2.	MATERIAIS E MÉTODOS	41
2.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	41
2.2.	DADOS LOCAIS DISPONÍVEIS.....	43
2.2.1.	SRTM.....	43
2.2.2.	Batimetria Lagoa Mangueira.....	44
2.2.3.	Topografia interna do Banhado do Taim.....	45
2.2.4.	Dados de projetos, cartas do exército e demais informações.....	46
2.3.	PROCESSAMENTO DOS DADOS E COMPOSIÇÃO DO MDE.....	47
2.3.1.	Imagens do SRTM.....	47
2.3.2.	Batimetria da Lagoa Mangueira.....	49
2.3.3.	Feições que interferem na hidrodinâmica local.....	49
2.3.4.	Representação de intervenções estruturais com alteração do relevo.....	50
2.3.5.	Correção de erros e composição do MDE da região do Banhado do Taim.....	51
2.4.	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS.....	53
3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
3.1.	MDE INTEGRADO.....	55
3.2.	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS.....	56
3.2.1.	Incorporação das informações disponíveis para a bacia de contribuição.....	56
4.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	65
REFERÊNCIAS		67
CAPÍTULO II – MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANhado DO TAIM UTILIZANDO HEC-RAS.....		73
1.	INTRODUÇÃO.....	77
2.	MATERIAIS E MÉTODOS	79
2.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	79
2.2.	MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO BANhado DO TAIM USANDO O HEC-RAS 2D.....	83
2.2.1.	Dados necessários.....	85
2.2.2.	Modelo digital de elevação (MDE).....	86
2.2.3.	Módulo Mangueira.....	88
2.2.3.1.	Representação geométrica.....	88
2.2.3.2.	Determinação da condição de contorno – Modelagem hidrológica off-line.....	89

2.2.4.	Módulo Taim	91
2.2.4.1.	<i>Dados geométricos</i>	91
2.2.5.	Estruturas hidráulicas	93
2.2.6.	Condições de contorno	97
2.3.	CALIBRAÇÃO	99
2.3.1.	Calibração dos parâmetros e condições iniciais no HEC-RAS	99
2.3.1.1.	<i>Calibração do modelo hidrológico off-line da Lagoa Mangueira</i>	100
2.3.1.2.	<i>Dimensões do grid</i>	101
2.3.1.3.	<i>Condição inicial da Lagoa Mangueira e Banhado do Taim</i>	101
2.3.1.4.	<i>Ajuste dos parâmetros das estruturas hidráulicas</i>	102
2.3.1.5.	<i>Coefficiente de rugosidade de Manning</i>	103
2.3.1.6.	<i>Medidas de desempenho</i>	104
2.3.2.	Definições para a modelagem em regime não permanente	105
2.4.	VALIDAÇÃO	106
2.5.	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	107
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
3.1.	CALIBRAÇÃO	109
3.1.1.	Condição de contorno	109
3.1.2.	Dimensões da malha	110
3.1.3.	Condição inicial da Lagoa Mangueira e do Banhado do Taim	111
3.1.4.	Ajuste dos parâmetros das estruturas hidráulicas	112
3.1.5.	Coefficiente de rugosidade de Manning	113
3.1.6.	Performance do modelo na calibração	113
3.2.	VALIDAÇÃO	118
3.3.	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	120
3.3.1.	Cenário I: Influência da regra de operação das comportas na hidrodinâmica do Banhado do Taim	120
3.3.2.	Cenário II: Influência da redução da irrigação na hidrodinâmica do Banhado do Taim	121
3.3.3.	Cenário III: Influência da eliminação das retiradas de água para irrigação na hidrodinâmica do Banhado do Taim	123
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
5.	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	129
6.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	131
	REFERÊNCIAS	133
3.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS	139
	REFERÊNCIAS GERAIS	141
	APÊNDICES	145
	APÊNDICE A	145

1. INTRODUÇÃO

Áreas úmidas ou ambientes úmidos são ecossistemas de transição entre meios terrestres e aquáticos que se salientam na natureza por sua importância social e ambiental. Especialmente encontrados em áreas costeiras, essas regiões incluem ambientes úmidos naturais e artificiais, banhados, pântanos e turfeiras que oferecem serviços ecossistêmicos importantes (JUNK, BAYLEY e SPARKS, 1989). Elas promovem a regularização do fluxo de água, a manutenção de ecossistemas, recarga de aquíferos, retenção de sedimentos e nutrientes, além de contribuírem para a distribuição de água para fins diversos, como por exemplo, irrigação e abastecimento humano (LES LANDES et al., 2014; NERI-FLORES et al., 2019).

Um exemplo de área úmida e objeto de estudo deste trabalho é o Banhado do Taim, localizado na região costeira sul do Brasil. Este ecossistema tem sua dinâmica movida por diferentes forçantes e é alvo de conflitos relacionados ao uso da água, uma vez que a mesma é necessária à conservação de sua funcionalidade e biodiversidade e, ao mesmo tempo, é essencial para orizicultura desenvolvida na região (BRAVO et al., 2011). Ressalta-se que algumas espécies raras ou ameaçadas são encontradas no Banhado do Taim, especialmente espécies de aves aquáticas que no Brasil ocorrem exclusivamente no Sul, pois encontram nessa região suas principais unidades de reprodução, alimentação e refúgio para suas trocas de plumagem (TASSI, 2008). As regiões adjacentes ao Banhado possuem ligações com o mesmo, fazendo com que ele responda não somente a fatores climáticos sobre ele, mas também a alterações em toda a sua bacia de contribuição, implicando em modificações no ecossistema local (BURGER, 2000).

Sendo a Lagoa Mangueira a principal conexão e fonte de água para o Banhado do Taim, o regime hidrológico desse sistema é particularmente influenciado pelas variações da mesma, juntamente com o regime de chuvas, as características da vegetação e, também, pelas forças antrópicas relacionadas ao cultivo de arroz na região (PAZ, 2003). As grandes retiradas de água da Lagoa Mangueira para a irrigação do arroz acontecem em épocas de temperaturas elevadas, o que, aliadas à alta taxa de evapotranspiração no mesmo período podem fazer com que ocorra redução significativa do volume de água necessário para a manutenção do ecossistema do Banhado do Taim (VILLANUEVA, 1997).

A captação de água para estas atividades contribui fortemente para a modificação do regime hidrológico local, porém, quando esta água é utilizada na própria bacia hidrográfica

contribuinte, ela retorna ao sistema, reduzindo problemas em curto prazo. Já no caso da transposição da água por canais para outra bacia, não há retorno ao sistema que engloba o Banhado do Taim, acarretando mudanças mais definitivas (MOTTA-MARQUES et al., 2002). O impacto acontece também em âmbito de qualidade, não somente na quantidade de água disponível, já que há grande transporte de produtos químicos e defensivos agrícolas utilizados na agricultura que causam deterioração da qualidade da água na região (PAZ, 2003; QUINTELA et al., 2019).

1.1. JUSTIFICATIVA

As condições hidrológicas do Banhado do Taim têm a capacidade de modificar propriedades físicas e químicas do local como, por exemplo, a disponibilidade de nutrientes, as condições do substrato, salinidade do solo, propriedades e características dos sedimentos (MOTTA-MARQUES et al., 2002). Portanto, quando há mudanças hidrológicas, mesmo que não acentuadas, a biota responde com alterações na diversidade de espécies, produtividade, estabilidade e equilíbrio do ecossistema como um todo.

Tendo em vista que o arroz é monocultura na região, e de extrema importância econômica, a substituição desta economia padrão por outra que melhor se adapte às questões de preservação do local não surge como uma alternativa viável em um futuro próximo. Por este motivo, seguem as pressões que ameaçam a biodiversidade local, devido à necessidade de manutenção de um regime hidrológico adequado à conservação do ecossistema, sem prejudicar a disponibilidade de água para a irrigação (VILLANUEVA, MOTTA-MARQUES e TUCCI, 2000).

As pressões para expansão das lavouras de arroz irrigado são tão expressivas que na década de 60 foi contratado um estudo de viabilidade técnica e econômica para a região (DNOS, 1968). Tal estudo tinha como objetivo aproveitar a área para atividades agrícolas, incluindo a implantação de sistemas de irrigação de arroz por inundação e a criação, de fato executada, de comportas para manejo da água da região que engloba o Banhado do Taim. Embora executadas, o sistema de bombeamento que faria parte do projeto não foi concluído e, assim, as comportas operam parcialmente abertas, emperradas e sem manutenção (TASSI, 2008) até o presente momento (conforme inspeção em campo realizada no ano de 2019).

Muito embora no ano de 1986 tenha sido criada a Estação Ecológica do Taim (ESEC-Taim) através do Decreto 92.963, de 21 de julho de 1986 para auxiliar na preservação do local,

os conflitos pelo uso da água ainda são observados. A ESEC-Taim possui uma área total de 32.797 ha e surgiu da tentativa de preservar o ecossistema buscando a harmonia entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental através do atendimento a conservação dos recursos naturais.

Devido a esse histórico de conflitos pelo uso da água na região do Banhado do Taim, estudos foram desenvolvidos para o local (PAZ, 2003; TASSI, 2008; VILLANUEVA, 1997) visando avaliar estratégias para o uso dos recursos hídricos locais. A maioria desses estudos é baseada na utilização de modelos matemáticos, os quais têm grande aplicabilidade, pois permitem avaliar as consequências de diferentes cenários, sendo uma potencial ferramenta de gerenciamento e tomada de decisões envolvendo recursos hídricos (CHUNG e SEONG, 2009; GUSWA et al., 2014; YU et al., 2015). Assim, o ajustamento de modelos que permitam um melhor entendimento da dinâmica dos recursos hídricos no Banhado do Taim, e seu comportamento frente a forçantes externos se constitui em importante aliado nas análises de gestão dos recursos hídricos na região.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Melhorar o entendimento hidrológico e hidrodinâmico do Banhado do Taim utilizando modelagem hidrológica-hidrodinâmica bidimensional de longo prazo.

1.2.2. Objetivos específicos

Para atingir ao objetivo geral, os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos.

- i. Determinar um modelo digital de elevação (MDE) compatível com as necessidades da modelagem hidrodinâmica bidimensional, a partir de informações da Lagoa Mangueira, Banhado do Taim, imagens de satélite e informações complementares considerando as áreas de contribuição e formações topográficas;
- ii. Calibrar e validar o modelo HEC-RAS 5.0.7 bidimensional (2D) para simulação de longo prazo no Banhado do Taim, incluindo o desenvolvimento de estratégias para a representação de estrutura hidráulicas e modelagem hidrológica.

- iii. Realizar cenários de simulação para avaliar os impactos de mudanças hidrológicas na Lagoa Mangueira ao Banhado do Taim, destacando a aplicabilidade do modelo desenvolvido no entendimento dos processos hidrodinâmicos locais.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta, a seguir, um capítulo de Revisão da Literatura e, na sequência, dois capítulos organizados na forma de artigos; por fim, um último capítulo que apresenta as Considerações Finais.

A Revisão da Literatura aborda temas relevantes para o entendimento da pesquisa de maneira geral. As principais informações trazidas na revisão da literatura incluem a caracterização de ecossistemas de áreas úmidas, gestão desses ecossistemas e, também, informações sobre modelagem de áreas úmidas.

Os dois itens seguintes possuem caráter de artigo e são considerados os produtos dessa pesquisa, sendo que o Capítulo I trata de assuntos relativos às estratégias utilizadas para a obtenção do modelo digital de elevação utilizado como base para a modelagem bidimensional, combinado diferentes fontes de informação, e o Capítulo II apresenta a modelagem hidrodinâmica 2D da área de estudo propriamente dita. Cada um dos capítulos tem sua estrutura própria, contendo Introdução, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão, Conclusão e Recomendações.

O último item do estudo abrange as considerações finais e recomendações gerais a respeito dos resultados dos capítulos I e II.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ÁREAS ÚMIDAS

Áreas úmidas, do termo em inglês *wetlands*, são ecossistemas alagadiços que possuem uma grande variedade de definições, já que não há um conceito universalmente aceito para definir tais ecossistemas. Algumas destas definições incluem tanto habitats de águas abertas permanente, ou periodicamente inundados, ou comunidades de plantas que vivem em meio saturado, enquanto outras não incluem em sua definição as áreas de inundação mais profunda, e focam somente em habitats mais rasos, periodicamente inundados ou permanentemente alagados. O que todas estas definições têm em comum, é o fato de que estes ecossistemas alagadiços permanecem úmidos por tempo e frequência suficientes para dar condições de que haja vegetação hidrófila e outras formas de vida aquática, de criar solos e substratos hídricos e ativar processos bioquímicos associados a ambientes úmidos, pelo menos temporariamente (JANSE et al., 2019; LES LANDES et al., 2014; NERI-FLORES et al., 2019; TINER, 2009).

Devido à grande quantidade de definições encontradas para o termo “áreas úmidas”, a Convenção sobre Zonas Úmidas de Importância Internacional, também conhecida como Convenção de Ramsar (veja <https://www.ramsar.org/>) - um tratado intergovernamental assinado em 1971 no Irã, que apoia as ações nacionais e a cooperação internacional para a conservação das áreas úmidas e seus recursos - adotou um conceito bem abrangente. Em vigor desde 1975, incorporado plenamente ao Brasil em 1996, este tratado estabelece que as áreas úmidas podem incluir os banhados, pântanos e turfeiras, caracterizados por regimes de água parada ou em fluxo, doce ou salgada Além de incluir os ambientes úmidos naturais, também engloba as áreas artificiais, como por exemplo, as represas, lagos e açudes, as quais foram o principal motivo de criação do tratado, o qual se destinava a proteger (TAMISNKAS et al., 2012).

Áreas úmidas usualmente ocorrem em regiões de transição entre a terra e corpo hídrico. Especialmente encontradas em áreas de relevo baixo, com inundação temporária ou permanente, estas áreas ocorrem devido às condições climáticas e variações sazonais que proporcionam períodos de maior e menor intensidade de chuva e diferentes temperaturas. Podem estar inclusas as planícies de inundação de rios, mangues, pântanos, margens de lagoas de água doce ou salobra, savanas e banhados. As áreas úmidas denotam um grupo de habitats diversos, que geralmente têm em comum o nível de água perto do solo, com plantas adaptadas a condições frequentemente anaeróbicas do solo. Considerando a zona costeira da região sul do Brasil, a

ocorrência de áreas úmidas está diretamente ligada à existência de algum tipo de ecossistema, como as restingas, as lagoas costeiras, os estuários e os deltas (BURGER, 2000; MITSCH e GOSSELINK, 2007; TINER, 2009).

Estes ecossistemas alagadiços são de grande importância para a sociedade e, ao longo da história, deram origem a muitas civilizações. As civilizações Egípcia e Mesopotâmica tiveram origem através das inundações dos rios Tigre, Eufrates e Nilo, que garantiam a qualidade dos solos pelo depósito de matéria orgânica na região do Crescente Fértil (MACKLIN e LEWIN, 2015).

Além disso, estas áreas, apesar de complexas e frágeis, contribuem para a biodiversidade ambiental, ajudam na regularização do fluxo de água, recarga de aquíferos, influenciam no ciclo do carbono, retêm sedimentos e nutrientes, purificam águas e fornecem ambientes vitais para subsistência e bem estar dos seres humanos (JUNK et al., 2013). O impacto que a conservação dessas áreas tem diretamente na qualidade da água se dá pelo fato de que estes solos funcionam como captadores, fontes e como agentes transformadores de nutrientes, garantindo qualidade de água e produtividade (LES LANDES et al., 2014).

2.2. O HIDROPERÍODO EM ÁREAS ÚMIDAS

O percentual de tempo, a frequência e a duração do nível da água são conhecidos como hidroperíodo, ou seja, a ocorrência periódica ou regular de inundação ou saturação do solo que age como sua assinatura hidrológica. Este hidroperíodo exerce forte controle na criação de nichos para diferentes espécies de plantas e animais nos ecossistemas úmidos (FOTI et al., 2012). Além disso, ele condiciona todos os processos associados ao ecossistema, incluindo a circulação geral de água, que é um fator essencial para a manutenção das áreas úmidas.

Devido à intensidade das ações antropogênicas em ecossistemas de área úmida, tais locais sofrem com a degradação de suas áreas, o que torna evidente a necessidade de um gerenciamento adequado. Por serem ecossistemas muito sensíveis a variações, qualquer pequena mudança em seu comportamento pode ocasionar um reflexo em sua dinâmica. O hidroperíodo natural do Banhado do Taim, por exemplo, fora impactado em decorrência da captação de água a partir da Lagoa Mangueira para orizicultura e da operação das comportas (ou falta de operação), o que influencia nas comunidades de vegetação e nos padrões de circulação de água locais (PAZ, 2003).

As mudanças no hidroperíodo destes ecossistemas influenciam diretamente no habitat do local, já que muitas espécies existem especificamente em determinadas regiões em razão da disponibilidade de água, da quantidade e origem do sedimento ali contido e do material de formação do local. Modificações no regime de água afetam o transporte de sedimentos e nutrientes, mudam os padrões de vegetação, causando mudanças nas propriedades do local, ocasionando perda de habitat para várias espécies e por consequência a perda de espécies no ecossistema (GALDINO, 2015; KEFELEGN, 2019). Com isso, surge a necessidade de uma boa gestão destes ecossistemas, a fim de preservar e manter a qualidade destes locais para que os habitats e as funções dos mesmos não sejam comprometidos no futuro.

2.3. GESTÃO EM ECOSSISTEMAS DE ÁREAS ÚMIDAS

Os banhados, aquíferos, lagos e quaisquer ecossistemas dependentes de água vêm enfrentando crescentes transformações devido ao exacerbado consumo desse recurso e também devido às mudanças climáticas globais. Estas transformações têm a capacidade de alterar os níveis médios de água e seus padrões temporais, sendo assim uma ameaça para serviços ecossistêmicos vitais (KLØVE et al., 2014).

O regime hidrológico de uma área úmida é o principal regulador de seu desempenho, juntamente com o hidroperíodo. As condições e funções destas áreas podem sofrer alterações devido às oscilações de nível, que são extremamente sensíveis aos padrões de precipitação e evapotranspiração e também as ações antropogênicas, o que acarreta em mudanças na produtividade e nos habitats das espécies que dele dependem, além de trocas no hidroperíodo (MOTTA-MARQUES et al., 2002; FOTI, 2012). Modificações das espécies vegetais dominantes, mudanças em ciclos reprodutivos de espécies, redução da diversidade e quantidade de indivíduos pertencentes à fauna e flora são outras consequências que podem surgir em decorrência de mudanças no regime hidrológico (BRAVO et al., 2012). A identificação do hidroperíodo ou da série de hidroperíodos tem sua importância ressaltada por Motta-Marques et al. (2002) para o gerenciamento de áreas úmidas com o objetivo de conservar as funções desempenhadas por estes ecossistemas.

As atividades humanas em suas mais variadas formas, como por exemplo, as mudanças no uso do solo, supressão de vegetação, remoção de florestas e o uso dos recursos naturais também são potenciais causadores de mudanças em ecossistemas de área úmida. A contínua interação das causas de mudanças locais resulta num sistema complexo, que hora possui

impactos que são adicionados e capazes de ressaltar os efeitos, enquanto em outros períodos eles podem “lutar” um contra o outro, causando o declínio regional do impacto (KLØVE et al., 2014).

O crescimento de problemas ambientais envolvendo a preservação de áreas úmidas, embora muitas vezes protegidas por lei, podem causar grandes impactos neste tipo de ecossistema. Isto indica que estes locais devem ser monitorados e ter suas funções protegidas (GUASSELLI, 2005). Por se tratar de ecossistemas extremamente sensíveis a mudanças em seu balanço hídrico, as consequências são as mais variadas e também resultam na modificação da produtividade das plantas, ciclagem de nutrientes e nas taxas de decomposição da matéria orgânica (MEYER, 1999).

As atividades humanas exercidas através da agricultura e do desenvolvimento urbano têm capacidade de interferir em grandes áreas. Estas atividades foram responsáveis por drenar metade da região pantanosa denominada *Everglades*, nos Estados Unidos. A região localizada no estado da Flórida é o habitat para diversos tipos de crocodilos, jacarés, pássaros e panteras e é conhecida como um lugar especial na terra. Então, em 1947, através da publicação de um livro sobre a região, as atenções foram voltadas para a preservação deste local, o que levou a criação de parque nacional chamado *Everglades National Park*. A criação de um parque nacional abrangendo cerca de 20% da região, faz com que a preservação e a divulgação da importância do mesmo sejam cada vez maiores, sendo assim um ótimo instrumento de gestão para os ecossistemas em impactados (DAVIS e OGDEN, 1994).

Não somente as ações humanas diretas tem potencial causador de problemas na preservação de áreas úmidas, mas também as mudanças climáticas globais, como o aumento da temperatura média no planeta e a modificação dos padrões de precipitação. Juntamente com o aumento da temperatura, surge o derretimento das geleiras e calotas polares que, por consequência, causam o aumento no nível médio do mar. De acordo com Ivajnsič e Kaligarič (2014), o aumento no nível das águas do mar pode afetar diretamente regiões costeiras, como a do Mar Mediterrâneo e do Mar Báltico, promovendo do desaparecimento de áreas úmidas da região até o ano de 2080.

2.4. MODELAGEM DE ÁREAS ÚMIDAS

Os distúrbios hidrológicos são fenômenos observados que têm potencial de causar diversos efeitos nas bacias hidrográficas. Em ecossistemas de área úmida, estes fenômenos

englobam as mudanças no regime de chuvas, no uso do solo, nas demandas de água deste ecossistema e podem causar alterações em seus níveis, variações no hidroperíodo e mudanças nas estruturas destes locais (GIRAUD et al., 1997). Dessa forma, conhecer o comportamento hidrológico e hidrodinâmico das áreas expostas a estes distúrbios serve como ferramenta para a gestão e proteção de tais ecossistemas.

Muitas vezes, o conhecimento do comportamento hidrológico das áreas úmidas não se dá por medições diretas das variáveis de interesse, devido à uma série de motivos. Por isso, modelos matemáticos surgem para auxiliar no conhecimento e estimativa de diferentes dados, adequando-se ao nível de detalhamento requerido, e desempenharem muitas funções no ramo das engenharias (SINGH, 1995). Geralmente, busca-se a predição de condições e variáveis de estado de interesse, sendo as mesmas de grande importância para a correta previsão das respostas de áreas estudadas (ÖZTÜRK, COPTY e SAYSEL, 2013).

Modelos que possibilitem a representação da complexidade dos ecossistemas de áreas úmidas têm um papel fundamental no desenvolvimento de planos de gerenciamento para estas áreas (THOMPSON et al., 2013). Apesar disto, a modelagem aplicada a estes ecossistemas ainda é um tema de pesquisa em desenvolvimento, porém, com interesse crescente por parte de pesquisadores. Grande parte dos modelos envolvem modelagem de qualidade de água, com enfoque biológico e ecológico, restando uma parcela menor de modelos dedicados a analisar e descrever o comportamento hidrológico e hidrodinâmico destas áreas. Os modelos para representar banhados artificiais também são muito comuns, porém, como englobam sistemas construídos com propósito de tratar águas residuárias, não sendo considerados assim, ecossistemas naturais.

O modelo denominado SIDRA-MAGE (GIRAUD et al., 1997) é um exemplo de modelo de simulação utilizado para uma área úmida na França. Este modelo baseia-se na utilização de dois modelos diferentes acoplados, o SIDRA (LESAFFRE e ZIMMER, 1988) e o MAGE (GIRAUD, 1992). A precipitação e a evaporação são as variáveis de entrada utilizadas pelo primeiro para gerar os padrões de taxas de fluxo em uma representação de canal. Já o segundo utiliza os fluxos gerados através do primeiro, bem como dados meteorológicos, para gerar uma saída que representa os níveis de água em dois drenos instalados em campo, a fim de criar uma superfície de água teórica. O modelo acoplado consegue representar as variações que ocorrem na bacia, com por exemplo, as diferenças nos tipos de solo, no sistema de drenagem e no uso do solo, bem as variações de dados meteorológicos para gerar as respostas.

Modelos mais simplificados, como o modelo chuva-vazão especificamente dedicado à uma área úmida localizada no Canadá, também são muito usuais. Este foi desenvolvido a partir de informações de eventos observados utilizando dados meteorológicos e hidrométricos a fim de prever como ocorre o escoamento no local. Através dele, os autores mostraram que o fluxo de água, além de difícil de ser simulado, é sensível as condições prévias ao evento considerado (MCKILLOP, KOUWEN e SOULIS, 1999).

Com o objetivo de avaliar como se dava a circulação de água em ecossistemas naturais de área úmida, fazendo as verificações com dados obtidos em campo, o estudo de Bolster e Saiers (2002) utiliza um modelo hidrológico para tal objetivo. O modelo de difusão em questão foi utilizado para a região dos *Everglades* nos Estados Unidos.

Um estudo realizado utilizou o MIKE SHE/MIKE 11 (sistema de modelagem hidráulica) para desenvolver um modelo hidrológico/hidráulico acoplado para uma área de pastagens em região de área úmida no Reino Unido. Tal modelo utilizou dados de monitoramento de longo prazo para simular os níveis da água em uma vala por dois períodos consecutivos de 18 meses. Através dos resultados da modelagem, foi possível reproduzir a dinâmica sazonal do local, associando as inundações com os níveis do lençol freático observados. Além disso, o estudo permitiu verificar que a modificação da localização das comportas inseridas na região, produziria efeito positivo dinâmica do local. Com isso, o estudo gera resultados importantes para a gestão de áreas pantanosas em Elmley (Reino Unido) e pode ser ajustado para ambientes semelhantes (THOMPSON, 2004).

Bem como o modelo desenvolvido para a gestão de áreas pantanosas no Reino Unido, outro modelo foi utilizado como instrumento de gestão para o Lago Ontário, na fronteira dos Estados Unidos com o Canadá (WILCOX e XIE, 2007). O ajuste deste modelo preditivo utiliza informações geográficas e perfis de água associados a eventos de inundação observados. Com ele, pode-se melhor entender e prever a resposta das comunidades aquáticas locais face às mudanças nos níveis de água ocasionados pelas mudanças nos planos de manejo de novas legislações propostos. Através deste instrumento, os governos federais podem avaliar se as mudanças nos planos podem ou não serem implementadas sem causar danos aos ecossistemas locais. Levantamentos batimétricos e alguns modelos semelhantes foram utilizados como base para os procedimentos de modelagem dentro da plataforma ArcGIS na criação deste modelo de predição e, através das saídas produzidas, é possível fornecer informações diretamente para a comissão internacional dos dois países, a fim de ajudar na deliberação e criação novas leis.

A utilização de água para agricultura tem potencial de impactar diretamente a biodiversidade local de ecossistemas de área úmida não somente no Banhado do Taim. Um estudo de caso em uma área costeira do Peru utilizou um modelo que integra a retirada e consumo de água subterrânea e superficial, com a finalidade de entender a dependência espacial dos impactos relacionados ao uso da água. Através deste estudo, foi possível identificar que a utilização de água superficial para a irrigação é benéfica para a zona úmida da região, a qual se favorece pela maior quantidade de água infiltrada para recarregar o aquífero que a alimenta. Já a retirada de água de aquíferos profundos promove danos ecológicos severos ao ecossistema. Este modelo também pode ser utilizado para planejamento na agricultura de desenvolvimento, incluindo melhora nas tecnologias de irrigação e escolha de plantações, promovendo a proteção destas áreas úmidas (VERONES et al., 2012).

O estudo de Lee et al. (2017), apresenta uma abordagem de integração entre bacia hidrográfica e área úmida que analisa mapas de inundação e dados geoespaciais para melhorar a previsão de áreas de inundação de terras úmidas e avaliar as incertezas. Como resultado, os autores puderam elucidar a necessidade de informação espacialmente distribuída, bem como relatar os problemas decorrentes da preparação dos dados utilizados para simular zonas úmidas em modelos de bacia hidrográfica. Além disso, também ressaltaram as funções hidrológicas em escala local da área estudada.

No contexto de modelagem como ferramenta de gestão e modelos com informações espacialmente distribuídos, um modelo foi desenvolvido especialmente para a região do Banhado do Taim (VILLANUEVA, 1997). O modelo hidrológico-hidrodinâmico pseudo-bidimensional baseia-se no balanço hídrico da região do BT, a fim de estimar os níveis de água na região para o período desejado, caracterizando o regime hidrológico do local. O modelo divide o BT em células irregulares e designa diferentes rugosidades para representar os padrões e as condições de escoamento da água. Este, abrange toda a dinâmica do BT, bem como representa as unidades hidrológicas vizinhas, Lagoa Mangueira e Lagoa Mirim, que influenciam na movimentação e no volume de água disponível no BT. O modelo foi desenvolvido através de programação computacional em linguagem Fortran 77 e produz como resposta o nível pontual em cada uma das 41 células utilizadas para representar o banhado, que pode ser, posteriormente, interpolado para que se obtenha uma lâmina de água espacializada para toda a área de estudo (VILLANUEVA, 1997).

Através da modelagem hidrológica e hidrodinâmica, tem-se ótimos instrumentos de predição utilizados em diversos ramos com diferentes finalidades. No presente trabalho, o

Banhado do Taim foi simulado hidrológica e hidrodinamicamente baseando-se no desenvolvimento de um modelo hidrológico *off-line* e utilização do *software* HEC-RAS 5.0.7. A metodologia utilizada para ajustar modelos para a região do Banhado do Taim utilizada dados de precipitação, evaporação, volumes de água retirados para irrigação e níveis de água da Lagoa Mirim e encontra-se descrita no capítulo II dessa dissertação. Durante o desenvolvimento da revisão bibliográfica, a pesquisa por trabalhos que utilizassem o *software* HEC-RAS 5.0.7 para modelagem de áreas úmidas foi realizada em diferentes fontes e não foram encontradas publicações utilizando esta versão do programa para modelagem de tal tipo de área. Algumas referências informais foram obtidas em fóruns disponíveis online, porém, trabalhos científicos ainda não são encontrados.

CAPÍTULO I – APRIMORAMENTO DE UM MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO PARA REGIÃO DE ÁREA ÚMIDA COM BASE NA FUSÃO DE IMAGENS SRTM COM DADOS TOPOGRÁFICOS.

RESUMO

AUTORA: Bibiana Peruzzo Bulé

ORIENTADORA: Rutineia Tassi

Um modelo digital de elevação (MDE) é a representação numérica computacional das características de relevo de uma determinada superfície terrestre. Essa representação numérica tem como características a sua resolução, precisão e acurácia. As aplicações de um MDE são variadas e incluem desde a geração de mapas topográficos até a utilização como base de propagação de escoamento em modelos matemáticos para mapeamento de manchas de inundação, o que requer informação fiel a fim de produzir bons resultados. A representação de características importantes dos locais de estudo nem sempre é possível através da utilização de apenas um MDE, por isso, combinar informações de diferentes fontes de dados para a região do Sistema Hidrológico do Taim - RS beneficia estudos hidrológicos e hidrodinâmicos, fornecendo melhores subsídios para a gestão dos recursos hídricos. A região é composta por áreas alagadas, região de dunas, área destinada a silvicultura, rodovias, canais de drenagem e estruturas hidráulicas, o que torna a representação numérica complexa e com necessidade de dados de diversas fontes. Por isso, neste estudo foram utilizadas imagens SRTM para definir a topografia de regiões não alagadas, batimetrias de áreas alagadas para determinar relevo de fundo, imagens de satélite para definição de pontos relevantes, cartas do exército para adição de pontos de controle, projetos construtivos da região para definição de cotas e informações pertinentes as estruturas hidráulicas, curva de permanência dos ambientes alagados, observações em campo além de levantamento topobatimétrico de um canal proveniente de um modelo matemático desenvolvido para a região. A união das imagens SRTM com os resultados das interpolações das batimetrias das áreas alagadas foi realizada com posterior definição e fusão de feições que representem a estrada, os canais de drenagem e as intervenções estruturais com alteração de relevo, utilizando o software ArcGIS 10.2. A avaliação da qualidade dos resultados foi realizada de forma qualitativa, de modo que a visualização da representação do terreno se aproximasse da realidade conhecida e através da avaliação de curvas cota-área-volume anterior e posterior as modificações de terreno, comparação de diferentes perfis transversais entre materiais brutos e subprodutos obtidos, bem como através do mapeamento de áreas alagadas para diferentes cotas. Como resultado, a incorporação das informações da bacia de contribuição da região de estudo promove ganhos no âmbito de questões hidrodinâmicas. Através da definição de perfis transversais, é possível observar que além da inserção das feições de interesse, a suavização de picos aparentes em imagens SRTM também foi realizada. As áreas alagadas para cotas de água de 2,1 metros e 2,5 metros sofreram alterações esperadas e, no produto, apresentam as características observadas em campo não representadas anteriormente. Os resultados sugerem que as melhorias obtidas na representação do terreno foram relevantes, considerando informações escassas e de difícil obtenção. Os aprimoramentos ficam evidenciados na inserção do canal de drenagem lateral que direciona o fluxo de água, na representação da rodovia no MDE final que, para estudos hidrológicos, influencia nos padrões de comportamento da água.

Palavras-chave: Batimetria. Fusão de Imagem. SRTM. Topografia.

CHAPTER I – ENHANCING A WETLAND-UPLAND DIGITAL ELEVATION MODEL BASED ON MERGING SRTM IMAGERY WITH TOPOGRAPHIC DATA

ABSTRACT

A digital elevation model (DEM) is the numerical representation of the topographic characteristics of any terrestrial surface. This representation is characterized by its resolution, precision and accuracy. The functions of a DEM are varied and include everything from the generation of topographic maps to its use as a base for the of runoff propagation in mathematical models for mapping flood areas, which requires accurate information in order to produce good results. The representation of important characteristics of the study sites is not always possible through the use of just a DEM, therefore, combining information from different data sources for the study area, the Hydrological System of Taim - Brazil, benefits hydrological and hydrodynamic studies, providing better aids for the management of water resources. The region is made up of wetlands, lakes, dunes, forestry areas, highways, drainage channels and hydraulic structures, which makes the numerical representation complex and requires data from different sources. For this reason, SRTM images were used in this study to define the topography of non-flooded regions, bathymetry of flooded areas to determine background terrain, satellite images to define relevant points, maps to add control points, construction projects of the region for defining elevation points and information related to hydraulic structures, permanence curve of flooded environments, field observations, as well as topobathymetric survey of a channel from a mathematical model developed for the region. The merger of the SRTM images with the results of the interpolations of the bathymetry of the flooded areas was performed with subsequent definition and fusion of features that represent the road, the drainage channels and structural interventions with alteration of terrain, using the software ArcGIS 10.2. The evaluation of the quality of the results was done in a qualitative way, so that the visualization of the representation of the terrain approached the reality and through the evaluation of elevation-area-volume-curves before and after the terrain modifications, comparison of different cross profiles between raw materials and results obtained, as well as through the mapping of flooded areas for different water levels. As a result, the incorporation of information from the drainage area of the study region produces gains in the context of hydrodynamic issues. Through the definition of transversal profiles, it is possible to observe that in addition to adding features of interest, smoothing peaks in SRTM images was also performed. The flooded areas for water levels of 2.1 meters and 2.5 meters have undergone expected changes and, in the product, present the characteristics observed in the field not previously represented. The results suggest that the improvements obtained in representing the terrain were relevant, considering scarce and difficult to obtain information. The improvements are evident in the insertion of the lateral drainage channel that directs the water flow, in the representation of the highway in the final DEM, which, for hydrological studies, influences the patterns of water behavior.

Keywords: Bathymetry. Image merge SRTM. Topography.

1. INTRODUÇÃO

A representação estatística de quaisquer fenômenos da superfície de um terreno é denominada modelo numérico de terreno (MNT) e foi primeiramente definida por Miller e Laflamme (1958). A principal aplicação dessa representação na época de definição conceitual era de armazenar as informações estatísticas de elevação da superfície, tornando-as disponíveis no computador para análises de uma variedade de problemas com terrenos, e uma avaliação de um número ilimitado de soluções independentes para cada tipo de problema a ser resolvido.

Atualmente, a definição foi complementada, passando a ser a representação numérica computacional da distribuição de fenômenos espaciais que ocorrem na superfície terrestre (FELGUEIRAS, 2011). Assim, a representação de uma determinada característica relacionada à superfície, por exemplo, dados de relevo, geológicos, meteorológicos, levantamentos de profundidades de rios e dados geofísicos são fenômenos usualmente representados por um MNT (PEÑA e NARDI, 2018).

A representação da elevação da superfície contínua do terreno por muitos pontos selecionados com coordenadas xyz conhecidas em um campo arbitrário de coordenadas é comumente conhecida como Modelo Digital de Elevação (MDE). Outras terminologias como DHM (*Digital Height Model*), DGM (*Digital Ground Model*) e DSF (*Digital Surface Model*) também são utilizadas na literatura para definir representação estatísticas de elevações de terreno, ou seja, valores que representem a topografia ou superfície local.

As principais características de um MDE são a sua resolução, precisão e acurácia, que refletem não somente o detalhamento das informações, mas também a precisão do posicionamento de cada valor de cota para a determinação de feições importantes no terreno (SAKSENA e MERWADE, 2015). Existem diversas fontes de obtenção de MDEs gratuitos (*Space Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*, *ASTER Global Digital Elevation Model – GDEM*, *JAXA’s Global ALOS World 3D*, *Light Detection and Ranging – LiDAR*, *Mars Orbiter Laser Altimeter – MOLA*) que fornecem ao público dados em escala global, mas normalmente não são precisos o suficiente para estudar processos que dependem de características topográficas de pequena escala (LANGHORST et al., 2019). Por outro lado, é possível adquirir MDEs pagos com melhores resoluções através de websites com preços variam de 35 dólares americanos até 115 dólares americanos por quilômetro quadrado.

Os usos e aplicações de um MDE são os mais variados. Destaca-se principalmente o armazenamento de dados de altimetria para geração de mapas topográficos, elaboração de

mapas de declividade para análise de geomorfologia e erodibilidade, análise de corte-aterro para projetos de barragens e estradas, classificação da paisagem e modelagem e mapeamento espaço temporal do ciclo hidrológico (WISE, 2007). Outras exemplos de aplicação incluem estimativas de umidade do solo baseado no relevo e declividade (SANDELLS, DAVENPORT e GURNEY, 2008), estimativas de volume de lava produzido por vulcões ativos (BAGNARDI, GONZÁLEZ e HOOPER, 2016), acompanhamento e classificação de falhas geológicas (KOUKOUVELAS et al., 2018), quantificação de volume em casos de fluxo de detritos (MIURA, 2019), aplicação em modelos hidrológicos ou hidrodinâmicos (LE COZ et al., 2009; NAGAVENI, KUMAR e RAVIBABU, 2019; SATTAR, GOSWAMI e KULKARNI, 2019; TAREKEGN et al., 2010; XIE, PEARLSTINE GAWLIK, 2012), além de servirem para o mapeamento da extensão das manchas de inundação das cheias (GETIRANA et al., 2009; GILLES et al., 2012; GRIMALDI et al., 2013; HUNTER et al., 2007; LI et al., 2019; SAMPSON et al., 2012).

A aplicabilidade de modelos de inundação mais avançados, utilizando simulações hidrodinâmicas, tornou-se mais difundida a partir dos anos 2000, em razão dos avanços na aquisição de dados topográficos e na melhora de processamento e recursos dos computadores (GILLES et al., 2012; HUNTER et al., 2007; SAMPSON et al., 2012). Assim, são encontrados diferentes estudos na literatura que utilizaram MDE para a realização estudos envolvendo modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas.

Um modelo digital de elevação de qualidade e que represente fielmente a área de estudo é importante para uma boa modelagem dos processos que ocorrem na região de estudo (KENWARD et al., 2000; TATE e FISHER, 2006; WALKER e WILLGOOSE, 1999), principalmente no que se refere à análises que incluem a propagação do escoamento. Verifica-se na literatura diferentes estudos destacando o uso de MDEs de diferentes resoluções, fontes, técnicas de obtenção de dados e interpolação aplicados a estudos com o objetivo de propagar escoamento de modelos hidráulicos, hidrológicos e/ou hidrodinâmicos bidimensionais (CEA e RODRIGUEZ, 2016; FERRARIN e UMGIESSER, 2005; FURZE, OGILVIE e ARP, 2017; HUNTER et al., 2007; KIM et al., 2014; RIZKI et al., 2017; LÓPEZ-VICENTE e ÁLVAREZ, 2018; SATTAR, GOSWAMI e KULKARNI, 2019; TAREKEGN et al., 2010; WOODROW, LINDSAY e BERG, 2016 XIE et al., 2011; XIE, PEARLSTINE e GAWLIK, 2012).

A determinação de MDEs para utilização em estudos hidrológicos pode partir do uso exclusivo de dados topográficos obtidos por mapas, radares e sensores. MDEs disponíveis online, cartas topográficas ou imagens aéreas podem ser utilizados de forma independente para

estudos hidrológicos ou hidrodinâmicos, ou seja, a utilização da informação com algumas intervenções computacionais pode ser feita como nos estudos de diversos autores (CHEN et al., 2017; GRIMALDI et al., 2013; JAIN e SINGH, 2005; LIDBERG et al., 2017; PAPASAIKA, POLI e BALTSAVIAS, 2009; SAKSENA e MERWADE, 2015; SAMPSON et al., 2012; WU et al., 2019).

Em estudos hidrológicos e hidrodinâmicos que demandem MDE com elevada complexidade, por exemplo em regiões de alta conexão de rios com planícies de inundações, áreas úmidas e lagos (PARK e LATRUBESSE, 2017; RAYBURG e THOMS, 2009; WILSON et al., 2007) ou quando se busca uma melhor resolução da informação de relevo (BURES et al., 2019; ETTRITCH et al., 2018; FERRARIN e UMGIESSER, 2005; FURZE, OGILVIE e ARP, 2017; JONES et al., 2012; MERWADE, COOK e COONROD, 2008; PARK e LATRUBESSE, 2017; SATTAR, GOSWAMI e KULKARNI, 2019; TAREKEGN et al., 2010; XIE et al., 2011), os ganhos em acurácia para melhores interpretações hidrológicas e hidrodinâmicas podem ser obtidos através da combinação de diferentes modelos numéricos de terreno com informações de campo, por exemplo. Através da melhora nas informações de terrenos, é possível um melhor entendimento sobre extensão, profundidade de água, sazonalidade de inundações, permitindo assim a adoção de práticas de gestão (XIE et al., 2011).

Nesse contexto, este artigo apresenta as estratégias utilizadas de combinação de diferentes fontes de dados para a produção de um MDE representativo da região que abrange o sistema hidrológico do Banhado do Taim, uma área úmida localizada no extremo sul do Brasil. Esta área úmida de importância internacional, Sítio Ramsar 2298, (RAMSAR, 2020), está localizada em uma região de difícil acesso para aquisição de dados, com elevada complexidade topográfica, resultante de diversas atividades antrópicas como drenagem e construção de rodovias.

O cultivo extensivo de arroz irrigado na bacia de contribuição do Banhado do Taim contribui para a ocorrência de situações conflitantes acerca do uso dos recursos hídricos na região (VILLANUEVA, MOTT-MARQUES e TUCCI, 2000), demandando estudos que avaliaram estratégias para o gerenciamento da água na região por meio de modelagens hidrológicas e hidrodinâmica (IPH, 1996; PAZ, 2003; TASSI, MOTTA-MARQUES e COLLISCHONN, 2007; VILLANUEVA, MOTTA-MARQUES e TUCCI, 2000).

Estes estudos utilizaram as informações disponíveis na ocasião para definição de um MDE, o que inclui algumas simplificações, deixando de representar características importantes do local. Portanto, a determinação de um MDE com melhor detalhamento beneficiará novos

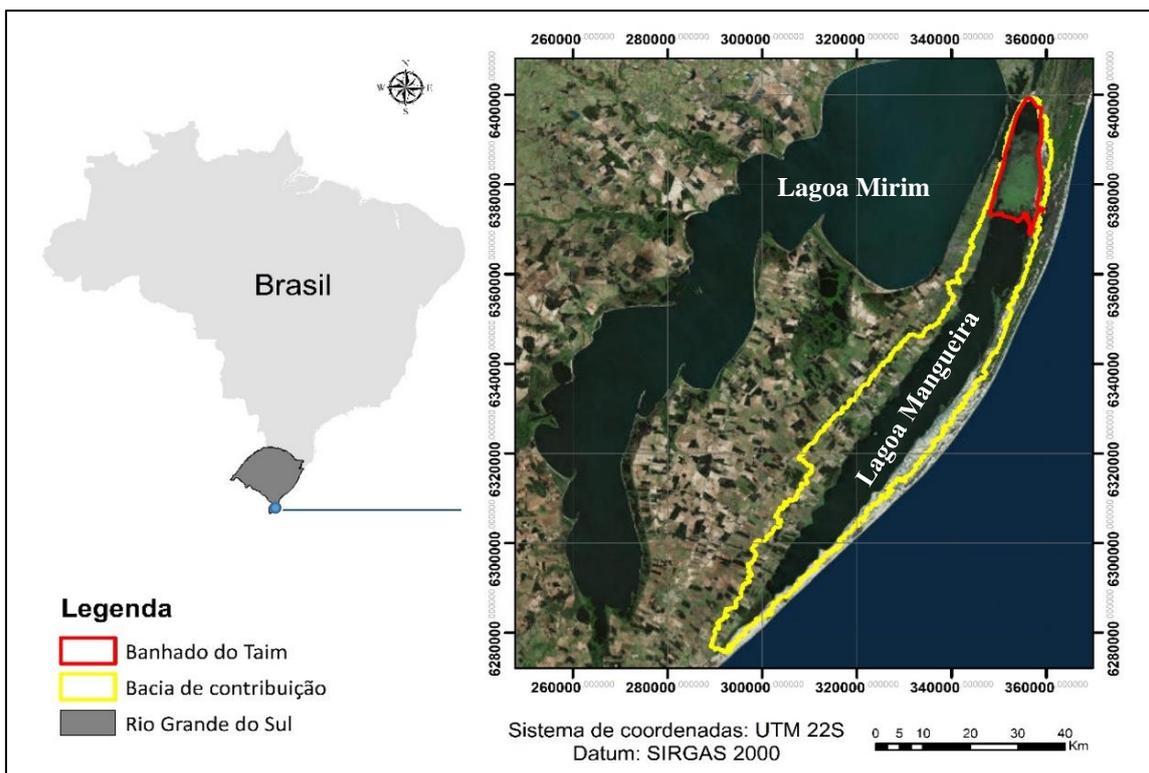
estudos hidrológicos e hidrodinâmicos, fornecendo melhores subsídios para a gestão dos recursos hídricos no local.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A região para a criação do MDE engloba toda a bacia de contribuição do Banhado do Taim (BT), que tem seu exutório na Lagoa Mirim. Assim, a área de estudo inclui o próprio Banhado do Taim (160 km²), a Lagoa Mangueira (800 km²), e as áreas das bacias de contribuição do Banhado do Taim e a Lagoa Mangueira, bem como áreas de entorno relevantes aos estudos de modelagem. A área região de estudo (Figura 1) está localizada na região costeira do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, próximo à fronteira com o Uruguai (MARQUES et al., 2002; TASSI, 2008) .

Figura 1 - Área de estudo.



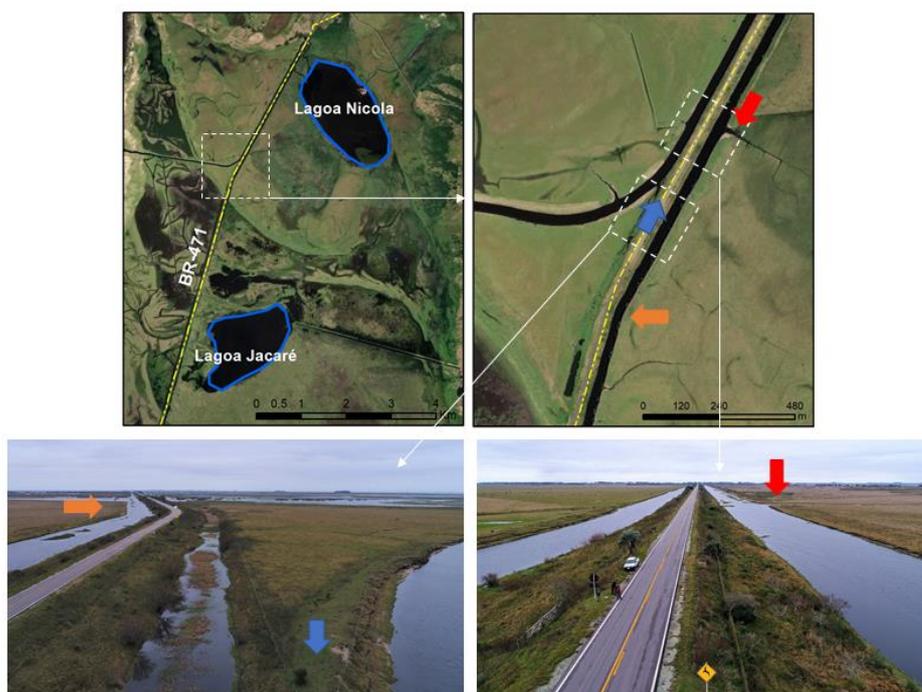
Fonte: Autor.

A região do BT é caracterizada por sua complexidade hidrodinâmica. Normalmente o escoamento na região ocorre no sentido da Lagoa Mangueira, para o Banhado do Taim, e ao norte deste para a Lagoa Mirim. No entanto, pode ocorrer inversão de escoamento Lagoa Mirim para o Banhado do Taim, e deste para a Lagoa Mangueira, sob condições específicas. A

alimentação hidrológica do Banhado do Taim é garantida por meio da precipitação direta e escoamento proveniente, prioritariamente da Lagoa Mangueira. Já a saída de água ocorre basicamente por evaporação direta e evapotranspiração, ou escoamento através das comportas localizadas no extremo norte, em direção à Lagoa Mirim (PAZ, 2003).

No interior do Banhado do Taim há alta heterogeneidade, com presença de duas lagoas (Nicola e Jacaré), vastos estandes de macrófitas emergentes (cerca de 33% da área em condições médias) (DA ROSA, 2016). A presença de macrófitas, associada à baixa declividade na região, faz com que o escoamento seja caracterizado pelas baixas velocidades superficiais, e ocorra a formação de alguns caminhos preferenciais da água dentro do BT. Além de caminhos preferenciais determinados pela presença de macrófitas emergentes, na década de 60, foi construída a rodovia BR-471, que margeia o Banhado do Taim na porção Oeste, criando uma espécie de dique por 16 km. Para a execução do aterro da rodovia, foi utilizado material escavado na área interna do Banhado do Taim, o que acabou criando um extenso canal lateral, de cerca de 30 m de largura, que direciona o fluxo de água dentro do Banhado. A presença das lagoas internas, do canal preferencial e da estrada podem ser visualizados na Figura 2 composta por imagens de satélite e fotografias aéreas do local (setas indicando mesma posição nas imagens).

Figura 2 - Presença de lagoas internas, canal preferencial e BR-471.



Fonte: Autor.

A construção dessa rodovia levou à intensificação do tráfego de veículos pesados durante a safra de arroz, bem como de veículos de turistas durante o verão, levando o número de atropelamentos de animais a aumentar. Por isso, em 1998, foi instalado o Sistema de Proteção à Fauna (SPF) que é composto por cercamento das margens do aterro, redutores de velocidade na estrada, redução do limite de velocidade permitido e também pela construção de 19 túneis de passagem de fauna, que ficaram conhecidos popularmente como capivarodutos (TASSI, 2008). A existência desses túneis tem impacto no regime hidrológico do Banhado demonstrado por (BULÉ, 2017), sendo necessária sua representação nos estudos de modelagem hidrodinâmica.

A cobertura e uso da terra no entorno do Taim é de grande heterogeneidade. A região é cercada por extensos arrozais, campos de gado, áreas de silvicultura (*Pinus sp.*) e áreas de cultivo de soja. Essas atividades representam ameaças potenciais aos ecossistemas do Taim, considerando que pesticidas (como herbicidas, fungicidas e inseticidas), fertilizantes e outros compostos podem ser entregues aos sistemas durante as inundações por processos hidrológicos de difusão e fluxo. Além da contaminação por pesticidas, devido à grande quantidade de área de cultivo de arroz irrigado por inundação (fazendas que variam de 250 ha até 3000 ha), há necessidade de retirada de expressivos volumes de água diretamente da Lagoa Mangueira, o que afeta as trocas de água entre a Lagoa e o Banhado do Taim (QUINTELA et al., 2019; TASSI, 2008; VILLANUEVA, MOTTA-MARQUES e TUCCI, 2000).

2.2. DADOS LOCAIS DISPONÍVEIS

As informações que norteiam esse estudo foram obtidas de diferentes fontes, uma vez que desenvolver um MDE representativo da região de estudo, neste caso, requer diferentes conjuntos de dados. Uma síntese dos dados utilizados, bem como suas respectivas descrições, aplicações e fontes encontra-se no Quadro 1.

2.2.1. SRTM

A área de entorno do Banhado do Taim e da Lagoa Mangueira fornecem informações sobre a bacia de contribuição e as áreas de interface entre corpo hídrico e o ambiente terrestre. Como não há disponibilidade de levantamento topográfico na bacia de contribuição, apenas cartas do exército com escala 1:50.000, a obtenção de dados que caracterizem topograficamente

a bacia de contribuição e a área de entorno da região de estudo foi possível através das imagens do SRTM obtidas no website <https://earthexplorer.usgs.gov/>, com sistema de referência WGS84, resolução espacial 30 metros, formato *.tif* com uma banda e pixel do tipo *float*. A aquisição das imagens pelo sensor data de 11 de fevereiro de 2000, sendo disponibilizadas em 23 de setembro de 2014. Apesar de existirem outras fontes de obtenção de imagens como o ALOS PALSAR, com resolução horizontal de 12,5 metros, sua resolução vertical é de 1 metro, o que dificulta sua utilização dada a planicidade do relevo local, optando-se então pelas imagens SRTM.

Quadro 1 - Síntese das informações disponíveis para a realização do estudo.

Tipo	Descrição	Aplicação	Fonte
SRTM	MDE de resolução 30 metros	Definição das áreas de entorno do BT e Lagoa Mangueira	SRTM
Batimetria L. Mangueira	Levantamento batimétrico Lagoa Mangueira	Definição do relevo de fundo da Lagoa Mangueira	IPH (1996)
MDE Taim	Informação topográfica simplificada de fundo do Banhado do Taim;	Definição do relevo de fundo do BT, recebe informações mais detalhadas posteriormente	Paz (2003) Tassi (2008)
Carta exército	Cartas topográficas do Exército	Definição de pontos de controle no refinamento do MDE integrado	Exército Brasileiro
Imagens Google	Imagens de satélite	Determinação da posição do canal lateral e da BR-471	Google Earth Pro
Projetos	Informações de projetos da BR-471 e projetos de irrigação	Definição da cota da estrada e tamanho das estruturas hidráulicas	DNOS (1968)
Topobatimetria	Informações da geometria do canal lateral	Reproduzir a informação numérica em feição no MDE	Villanueva (1997)
Curva de Permanência	Curva de permanência do BT	Definição de cotas para demonstração de áreas alagadas	Bulé et al. (2019)
Visita de campo	A área de estudo foi percorrida para conhecer pontos importantes	Analisar a área de estudo e ter um entendimento do funcionamento geral local	-

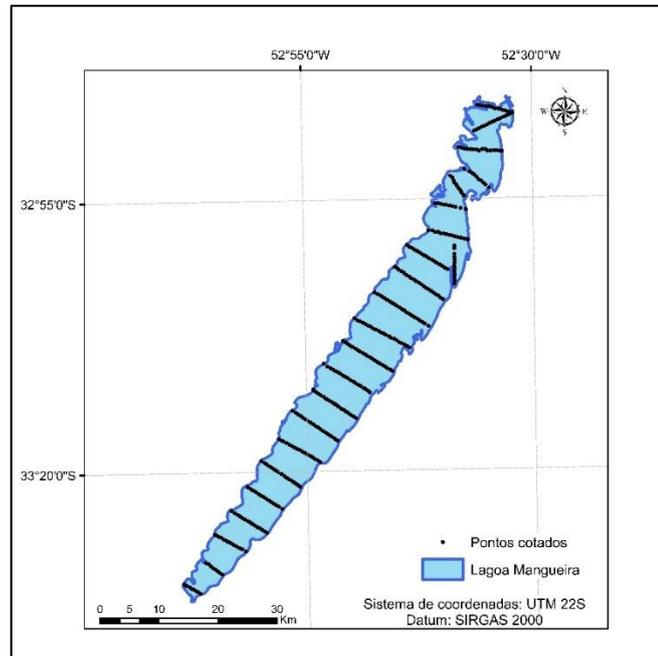
Fonte: Autor.

2.2.2. Batimetria Lagoa Mangueira

As informações de relevo de fundo da Lagoa Mangueira não podem ser obtidas através das imagens SRTM, adquiridas pelas NASA, utilizadas para as áreas de entorno devido as interferências da lâmina de água nos sensores de obtenção dessas imagens (LEHNER, VERDIN e JARVIS, 2008). Assim, para caracterização do fundo desse sistema um levantamento batimétrico foi realizado em estudo anterior para o local (IPH, 1996). As informações batimétricas referentes à Lagoa Mangueira fornecem informações ao longo de vinte e três perfis

que cobrem a extensão da Lagoa Mangueira de Norte-Sul e Leste-Oeste, conforme Figura 3. As medidas de posicionamento foram obtidas através da utilização de GPS geodésico e a profundidade de cada ponto levantadas com o uso de haste graduada em centímetros.

Figura 3 - Pontos cotados na Lagoa Mangueira distribuídos ao longo dos perfis.



Fonte: Autor (baseado em levantamento topográfico de IPH (1996)).

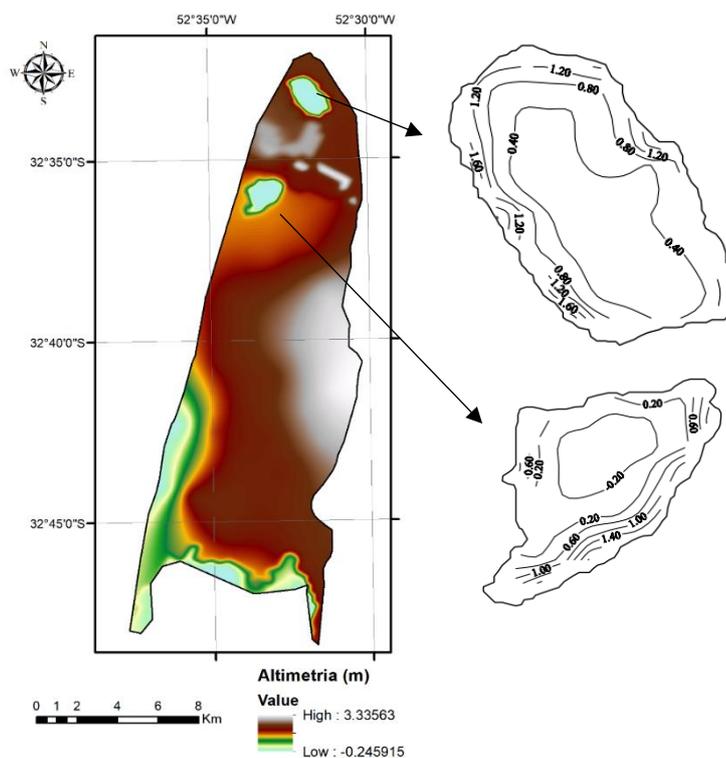
2.2.3. Topografia interna do Banhado do Taim

Da mesma maneira que na Lagoa Mangueira, a representação do relevo interno do Banhado do Taim não é obtida através das imagens SRTM pela interferência da lâmina de água e ainda pela presença intensa de macrófitas emergentes ao longo de todo sistema. Por isso, a descrição do relevo interno da região foi realizada em estudos anteriores, interpolando levantamentos topográficos do interior do banhado do Taim, de acordo com os transectos, informações de pontos cotados e conhecidos, além de batimetrias realizadas nas lagoas internas ao Banhado (IPH, 1996).

Em estudo sobre o gerenciamento hidroambiental, Tassi (2008) adaptou o MDE interno do BT descrito no estudo sobre comportamento hidrodinâmico do Banhado do Taim de Paz (2003), porém a representação do canal lateral de drenagem e as intervenções que representam

os túneis para passagem de animais não são contempladas nesses estudos. O MDE (Figura 4) possui resolução 30 metros e sistema de referência o Serviço Geográfico do Exército (SGE).

Figura 4 - MDE do Banhado do Taim desenvolvido em estudos anteriores com detalhamento das lagoas internas.



Fonte: Adaptado de Paz (2003).

As informações topobatimétricas do canal lateral, como as respectivas cotas de fundo e profundidade estão descritas numericamente nos arquivos de entrada do modelo desenvolvido por Villanueva (1997) e fazem parte da representação do canal no modelo matemático.

2.2.4. Dados de projetos, cartas do exército e demais informações.

A existência da BR-471 e a formação de um dique descrito anteriormente são informações necessárias para o desenvolvimento de um MDE integrado da região, porém não é possível identificar a elevação da estrada a partir das imagens SRTM. Por isso, as informações relacionadas às cotas da rodovia BR-471 foram obtidas em projetos executivos de estruturas hidráulicas sob a rodovia (DNOS, 1968) obtidos juntamente à ESEC-Taim. Além disso, a localização e a extensão da rodovia foram determinadas através das imagens de satélite.

Os capivarodutos e comportas existentes na região são estruturas hidráulicas inseridas ao longo dos anos e utilizadas para fins específicos. Por isso, as respectivas localizações e dimensões foram obtidas em dois estudos (BAGER e FONTOURA, 2013; DNOS, 1968), com o objetivo de incorporar alterações no terreno para que o mesmo possa receber as estruturas hidráulicas em estudos hidrológicos e hidrodinâmicos.

Outras informações importantes relacionadas a topografia da região são provenientes de cartas do exército. Utilizadas para correção de erros e como pontos de controle, duas cartas de escala 1:50.000 abrangem a área de estudo e a localização dos pontos necessários: Banhado do Taim, folha SI.22-V-A-VI-2 MI-3030/2 e a carta Farol Vergas, folha SI.22-V-B-IV-3 MI-3031/3 (UFSM, 2019).

A curva de permanência determinada para o Banhado do Taim por (BULE et al., 2019) gera informações de cotas de água e seus períodos de permanência. Os valores de cota para 20%, 40%, 60% e 80% são respectivamente 3,5 m, 2,9 m, 2,5m e 2,1m e foram utilizados para produzir mapeamento de áreas alagadas, utilizadas como controle para avaliar o ganho em representatividade, especialmente na representação da área interna do banhado.

Através da coleta das informações demonstradas acima, a manipulação e processamento foram realizados conforme descrito no item 2.3 a seguir.

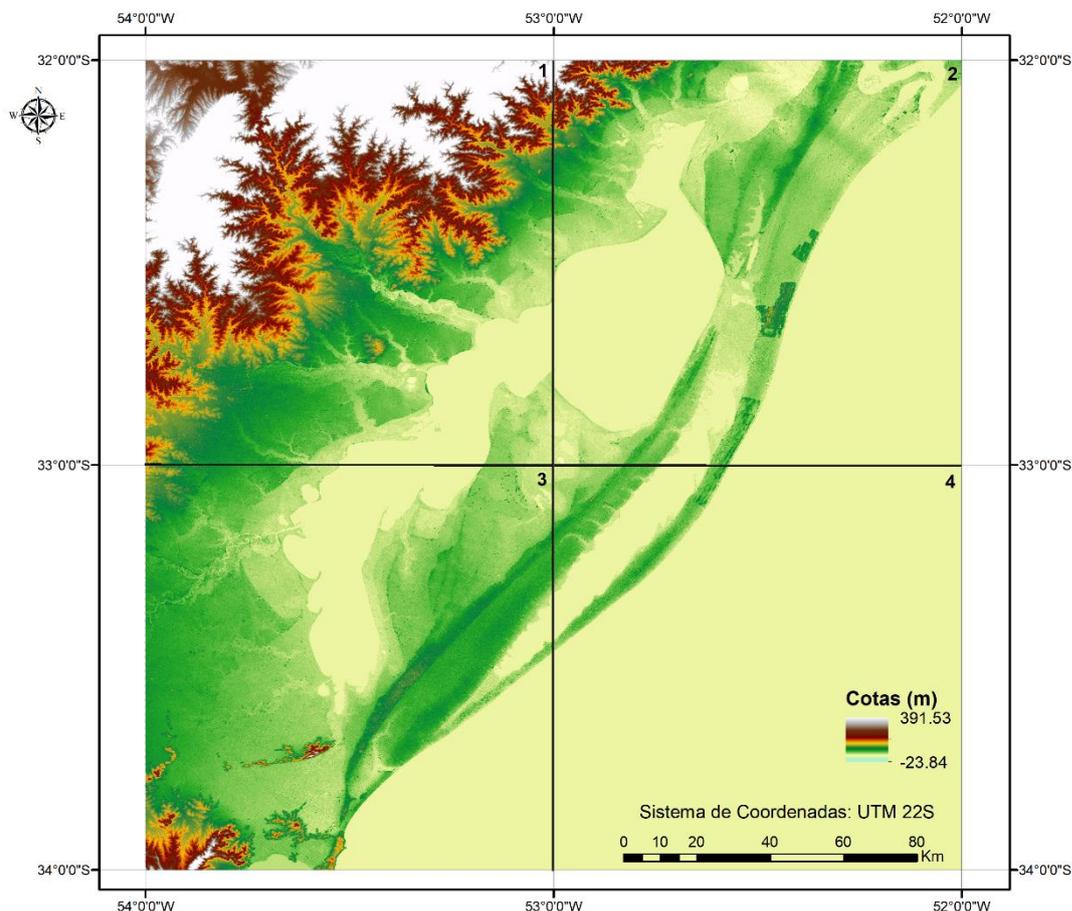
2.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS E COMPOSIÇÃO DO MDE

2.3.1. Imagens do SRTM

Através da definição do polígono que contém toda a área desejada, quatro imagens SRTM foram utilizadas: (1) SRTM1533W054V3, (2) SRTM1533W053V3, (3) SRTM1534W054V3 e (4) SRTM1534W053V3 (Figura 5). A variabilidade dos valores de elevação (-23,84 até 391,53 metros) mostrados na Figura 5 é grande devido à extensão de área abrangida pelas imagens, além de potencialmente indicar erro na obtenção dos valores a ser corrigido posteriormente.

As imagens foram processadas no software ArcGIS 10.2, primeiramente reprojetoando o sistema de coordenadas para SIRGAS 2000 UTM 22S (padrão utilizado ao longo do estudo) e, posteriormente, unindo as imagens utilizando a ferramenta mosaico, produzindo uma imagem única.

Figura 5 - Imagens de satélite utilizadas para determinação das características da região de entorno.



Fonte: Autor.

A fim de reduzir o tamanho da imagem para os limites de interesse, uma máscara de formato irregular foi criada para extrair uma nova imagem que contemple a bacia de contribuição do sistema e áreas adjacentes até o exutório na Lagoa Mirim. Os procedimentos para correção de erros de elevação na área de interesse foram realizados posteriormente e são descritos no subitem 2.3.5.

As informações obtidas a partir das imagens do SRTM (Figura 5) não possibilitam determinar informações de topografia de fundo de áreas como o próprio Banhado do Taim, lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira, mas foram utilizadas como fonte de informação para as áreas secas na bacia de contribuição.

2.3.2. Batimetria da Lagoa Mangueira

As informações de batimetria foram interpoladas pelo método de interpolação *Topo to Raster*, seguindo a recomendação de NOGUEIRA e AMARAL (2009), que identificaram que este método produziu melhores resultados, em comparação com outros métodos de interpolação para aplicação similar. Os processamentos foram realizados utilizando o software ArcGIS 10.2, sendo adotada a resolução espacial de 30 metros para manter a resolução das imagens SRTM e o sistema de coordenadas foi reprojetoado para SIRGAS 2000 UTM 22S.

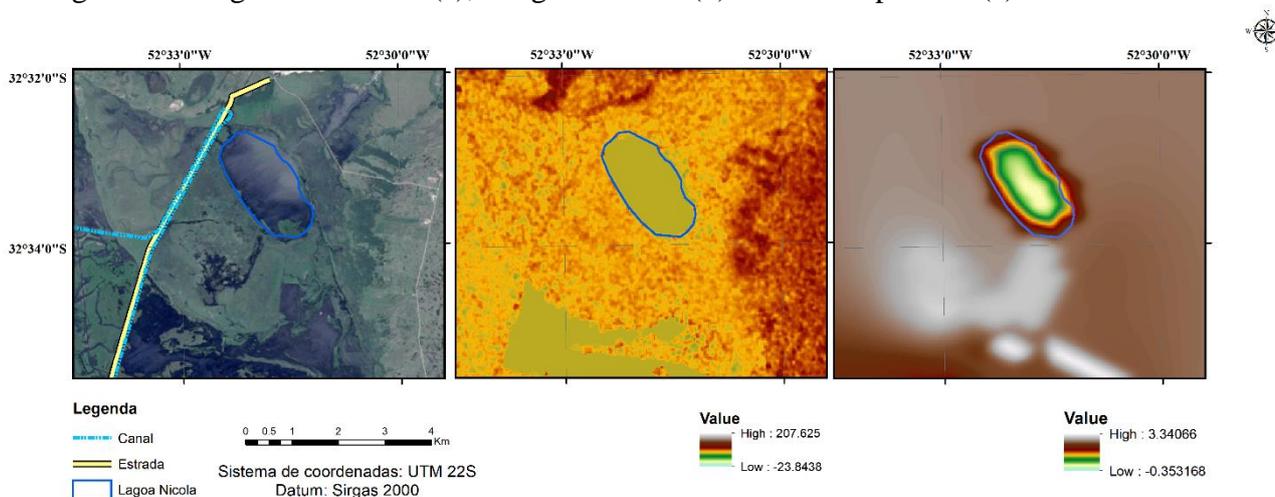
A obtenção de uma superfície contínua interpolada avança os limites físicos da Lagoa Mangueira, por isso, após interpolação, o raster resultante foi recortado através da máscara de formato da Lagoa, com borda definida nos pontos das extremidades de cada seção transversal, ou seja, o limite de utilização do raster interpolado é o ponto onde o levantamento batimétrico encontra a planície de inundação.

2.3.3. Feições que interferem na hidrodinâmica local

Para exemplificar a complexidade na região, a Figura 6 apresenta uma pequena porção da área do Banhado do Taim, localizada na região norte. Nessa figura é apresentada uma imagem de satélite do Google Earth datada de novembro de 2016 (a), que apresenta condições de nível de água semelhantes a imagem SRTM (b) e o MDE disponível para a região utilizado em estudos anteriores (PAZ, 2003; TASSI, 2008).

A inexistência do canal de drenagem na lateral e da elevação causada pelo aterro da BR-471 são evidentes nas imagens b e c da Figura 6, embora a imagem (b) apresente indícios da existência de uma superfície descontínua mais elevada na região da estrada. Isso indica a necessidade de adicionar feições para obtenção de um MDE com características mais precisas, já que a presença dessas características tem impacto no comportamento hidrodinâmico do local.

Figura 6 - Imagem de satélite (a), imagem SRTM (b) e MDE disponível (c).



Fonte: Autor.

Portanto, a incorporação das feições que representam a presença do canal lateral interno ao Banhado, bem como o canal externo que dirige o fluxo até a Lagoa Mirim e a presença do dique (BR-471), foi realizada através de quatro passos: primeiramente a digitalização do “encaminhamento” do canal e da rodovia sobre a imagem (a) da Figura 6 foi feita no ArcGIS 10.2 definindo as feições com uso de polígonos de largura 30 metros ao longo de toda sua extensão. Após a definição dos polígonos, foi realizada a definição dos valores referentes as cotas de fundo do canal e do topo da estrada. Na sequência, os polígonos foram rasterizados e, posteriormente, sobrepostos ao raster referente a Figura 6 (c). A resolução espacial utilizada no processo de rasterização e sobreposição das informações foi de 30 m.

2.3.4. Representação de intervenções estruturais com alteração do relevo

Em função da execução de estruturas hidráulicas como as comportas (Figura 7) localizadas no norte do Banhado do Taim e os túneis para passagem de animais (Figura 8), um importante rebaixamento na feição que representa a BR-471 foi realizado na posição de inserção das comportas. Esse procedimento foi realizado a fim de representar a presença das zonas de acumulação de água e servir como base para receber a estrutura hidráulica condizente para os fins de modelagem bidimensional. A cota de elevação do terreno nessa região seguiu o valor médio entre as cotas de fundo junto às comportas de -1,7 metros, já compatibilizados no sistema de referência IBGE SIRGAS 2000 UTM 22S.

Figura 7 - Fotografias aéreas da região das comportas.



Fonte: Autor.

De maneira similar e visando o mesmo objetivo, 19 rebaixamentos foram realizados ao longo do alinhamento da BR-471, promovendo a comunicação do canal lateral no interior do Banhado do Taim com a região externa a ele por baixo da rodovia. Os rebaixamentos na feição foram executados com cota média de fundo 3,5 metros conforme obtido nas informações citadas nos itens anteriores e são importantes para receber as estruturas hidráulicas em modelagem posterior.

Figura 8 - Túnel para passagem de animais.



Fonte: Adaptado de PELD (2002).

2.3.5. Correção de erros e composição do MDE da região do Banhado do Taim

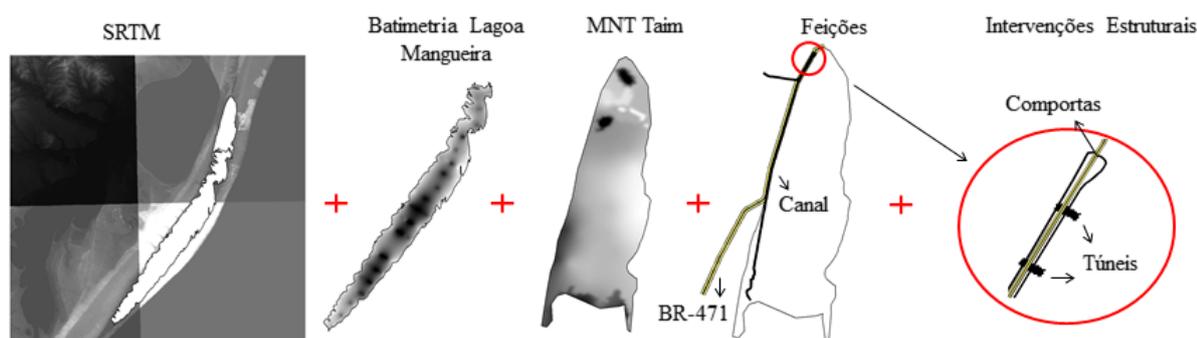
De posse de todas as informações, a compatibilização foi realizada primeiramente de maneira direta, unindo as informações e sobrepondo as áreas de interesse. Para verificar a

consistência na qualidade das informações utilizadas foram utilizados pontos de controle obtidos através de cotas marcadas nas cartas do exército e as cotas disponíveis nos projetos da BR-471.

Com a criação do mosaico com todas as fontes de dados, as regiões de interface de informações receberam uma nova interpolação através do interpolador *Topo to Raster* do ArcGIS 10.2 para suavização das uniões abruptas. Os métodos da Krigagem e IDW também foram testados, porém não mostraram resultados satisfatórios. A região onde ocorreu maior discordância de entre informações foi a interface Lagoa Mangueira – Banhado do Taim. A existência de um “degrau” físico entre os dois limites já havia sido apontada em estudos anteriores para a região (PAZ, 2003; VILLANUEVA, 1997), o que então foi considerado correto para o local. A representação esquemática da união das informações é apresentada na Figura 9.

A identificação e remoção de outliers foi realizada manualmente ponto a ponto através da comparação dos valores de cota obtidos na imagem SRTM contrastados com os valores das cartas do exército e observações em campo. Da mesma maneira, a suavização dos picos existentes nas imagens SRTM devido a existência de informações que não representam a superfície do terreno, mas sim objetos mais altos ou interferências nas imagens, também foi realizada ponto a ponto com base nas mesmas informações.

Figura 9 - Representação esquemática dos dados utilizados na geração de um MDE integrado.



Fonte: Autor.

A partir da união e compatibilização das informações coletadas e trabalhadas, tem-se como resultado um MDE representativo da área de interesse no sistema de referência SIRGAS 2000 com resolução de 30 metros.

2.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS

A morfologia das áreas alagadas, ou seja, a informação do relevo de fundo, impacta diretamente nos balanços de volume, trocas de água com sistemas vizinhos e estimativas de superfície alagadas no processo de modelagem. Além disso, a compreensão das variações na capacidade de armazenamento é uma ferramenta importante para as práticas de planejamento e gestão de recursos. Por isso, a determinação da curva cota-área-volume fornece informações que caracterizam áreas alagadas, sendo necessárias para alimentar modelos hidrológicos hidrodinâmicos (SAYL, SHAZWANI e AHMED, 2017; SIMA e TAJRISHY, 2013).

Dessa forma, três estratégias foram utilizadas para avaliar os benefícios obtidos a partir da obtenção do MDE resultante, englobando as características e feições do sistema, frente aos produtos preliminares. Primeiramente, foi realizado o comparativo de diferentes perfis transversais referentes aos materiais brutos e aos subprodutos obtidos no estudo. A seleção de quatro cortes distribuídos ao longo do Banhado do Taim permitiu a plotagem das informações de relevo de fundo para fins de comparação entre a imagem SRTM, o MDE anterior da região e o produto deste estudo.

Além dos perfis topográficos, o mapeamento de áreas alagadas para diferentes cotas de interesse também foi desenvolvido para fins de comparação e análise. Foram selecionadas quatro cotas de permanência de inundação com base na curva de permanência do Banhado do Taim obtida em Bulé et al. (2019), sendo elas 80%, 60%, 40% e 20% de permanência. Para cada valor de cota de água, foram plotados mapas indicativos de regiões alagadas referentes àquele nível de água para três imagens diferentes (SRTM, MDE antigo e MDE pós modificações) que foram comparadas entre si.

A análise das informações para representação das curvas cota-área e cota-volume da Lagoa Mangueira e do Banhado do Taim obtidas através das estatísticas do arquivo raster disponíveis no relatório de análise do raster no QGIS 3.4 também foi realizada. O comparativo de curvas cota-área e cota-volume pré e pós alterações de terreno foi realizado apenas para o Banhado do Taim, já que a representação da Lagoa Mangueira não sofreu alterações relevantes.

Os resultados dos procedimentos acima descritos foram expressos na forma de imagens comparativas, gráficos representativos de perfis topográficos e curvas cota-área-volume.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir da metodologia descrita anteriormente. A análise dos resultados foi realizada de forma qualitativa, de modo que a visualização da representação numérica do terreno se aproximasse da realidade conhecida em cartas do exército, imagens de satélite, levantamentos em campo e aferições no local.

3.1. MDE INTEGRADO

A Figura 10 apresenta uma sequência de imagens obtidas ao longo do processamento. De maneira geral, a simples união das imagens SRTM recortadas para a área de interesse, como representado na Figura 10 (a), não fornece um resultado representativo dos locais cobertos por água e vegetação, especialmente no interior do Banhado do Taim. A forte presença de macrófitas emergentes no interior do Banhado do Taim, além da lâmina de água interferem na resposta do sensor do SRTM, sendo observado o mesmo efeito na região da Lagoa Mangueira.

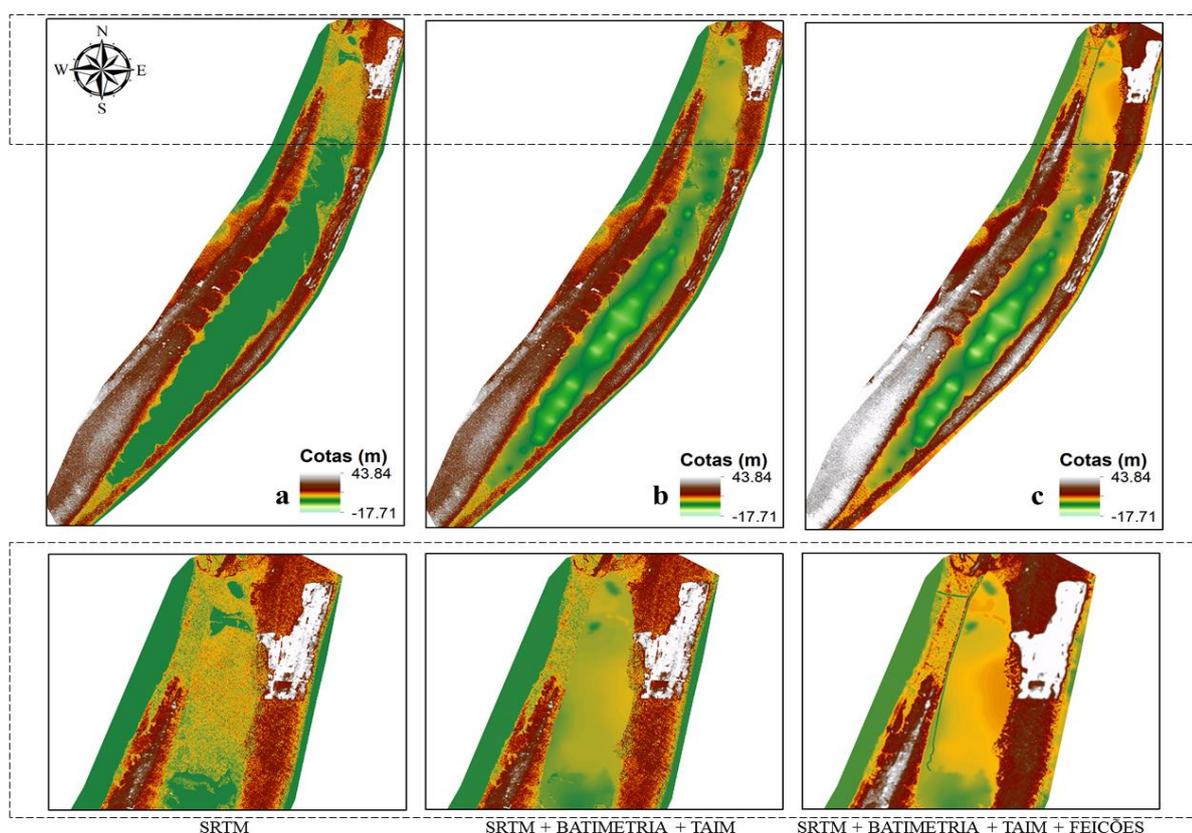
As cotas de terreno apresentadas para essa primeira situação variam de -17,72 metros até 43,84 metros. O conhecimento da área através de visitas a campo e análise das cartas do exército, permite afirmar que valores de cota do terreno menores que -3,5 metros não são encontrados na região, bem como valores da ordem de grandeza de 30 metros ou mais. Assim, possivelmente a imagem SRTM tenha produzido informações espúrias ou erros de medição (outliers), pela captação de informação de objetos elevados, como copas de árvores, a exemplo a faixa mais elevada ao Nordeste da região de estudo.

A Figura 10(b) representa a utilização do seguinte conjunto de informações disponíveis: MDE disponível para a parte interna do Banhado do Taim, combinado com a batimetria interpolada da Lagoa Mangueira e as imagens SRTM para complementar as áreas de entorno na região de interesse através de ferramenta *Merge*, que une diferentes informações a partir de ordem de prioridade definida previamente. É possível identificar visualmente uma melhora na representação do fundo dos sistemas cobertos por água e vegetação. As bordas das Lagoas internas ficam mais definidas e a declividade em direção a porção oeste do BT fica evidenciada.

Na Figura 10(c) é apresentado o MDE resultante, após adicionadas as informações sobre a BR-471 e canal de drenagem lateral (Figura 10 (c) encontra-se em tamanho maior no Apêndice A). A suavização dos picos e a remoção dos outliers pode ser identificada através da comparação dos limites superior e inferior nas cotas do terreno. Removendo os outliers e

aplicação de um filtro para reduzir valores mais elevados, não condizentes com as informações obtidas em campo, as cotas passam a variar, em média, de -3,5 metros no interior da Lagoa Mangueira até 25,7 metros na região Nordeste e no extremo Sul, concordando com os valores utilizados como referência das cartas do exército e observações no local.

Figura 10 – Resultado obtido através da união e recorte de imagem SRTM (a); Imagem SRTM com adição do relevo de fundo do BT e Batimetria da Lagoa Mangueira (b); MDE resultante (c).



Fonte: Autor.

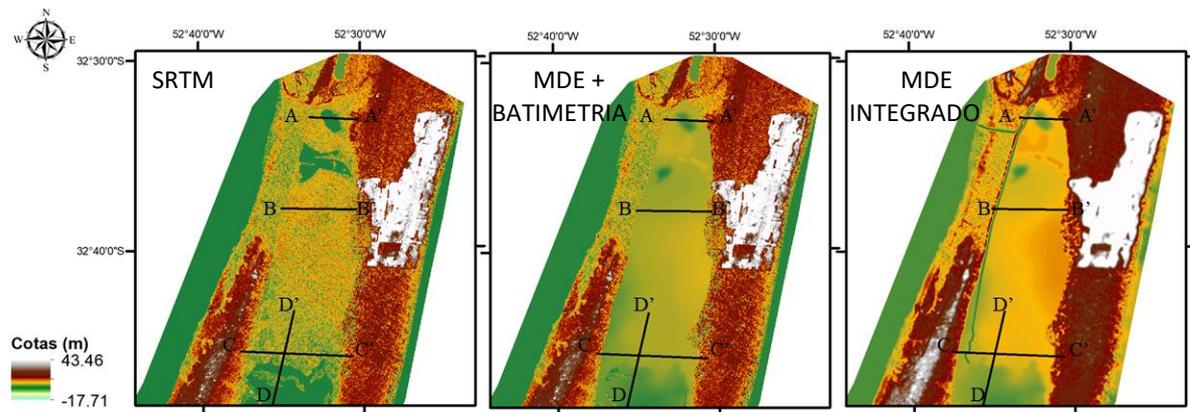
3.2. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS

3.2.1. Incorporação das informações disponíveis para a bacia de contribuição

Um importante aspecto do MDE criado é a incorporação das informações disponíveis para toda a bacia de contribuição, que são de grande relevância para questões hidrodinâmicas, pois de certa forma alteram as condições de escoamento. A fim de demonstrar os resultados

obtidos, os perfis topográficos dos cortes A-A', B-B', C-C' e D-D' apresentados na Figura 11 sustentam a análise qualitativa das feições inseridas, bem como da compatibilização das informações. Os perfis topográficos referentes à cada corte para cada imagem podem ser vistos na Figura 12.

Figura 11 - Localização dos perfis longitudinais do Banhado do Taim e da interface com a Lagoa Mangueira.

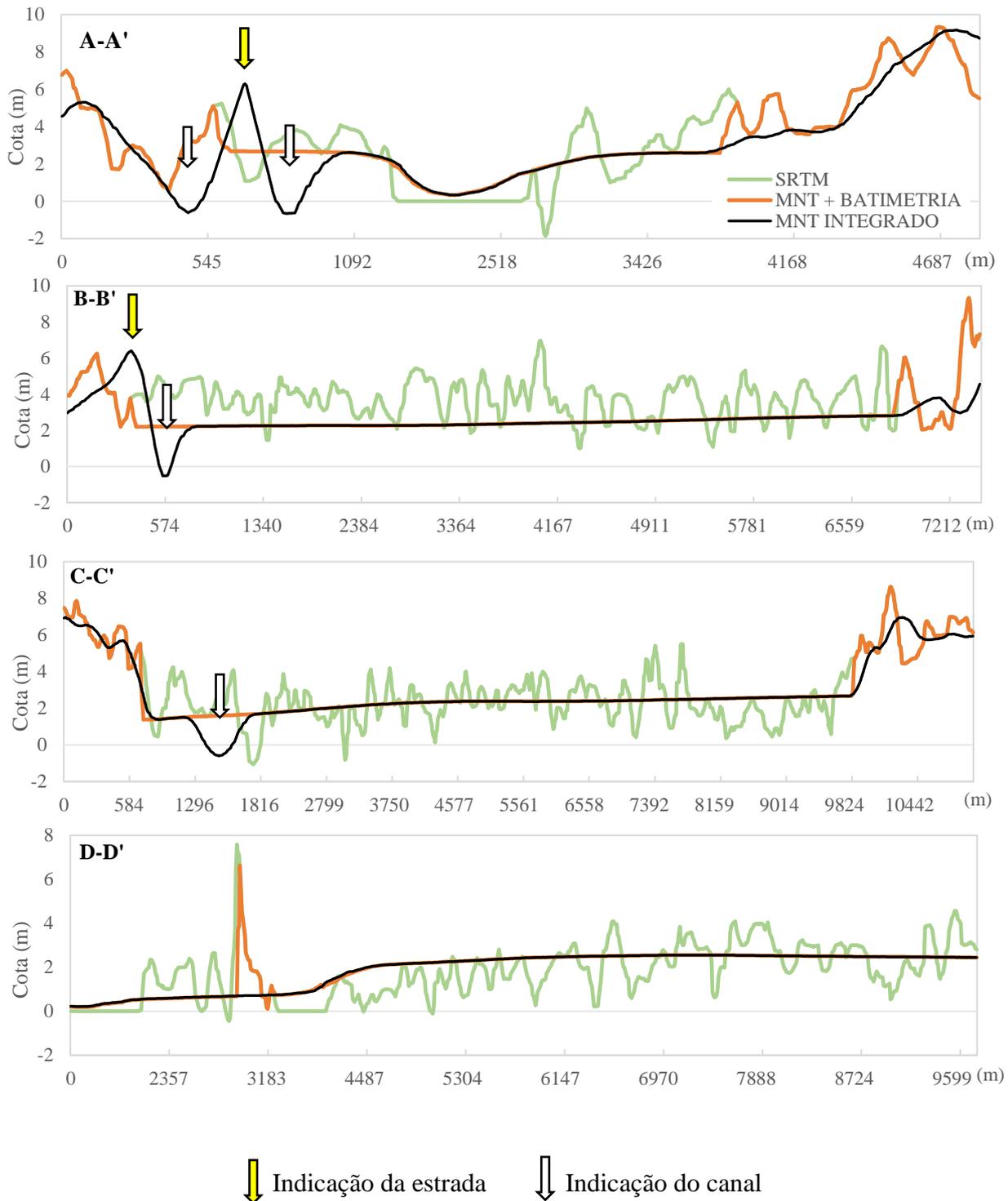


Fonte: Autor.

O corte A-A' representa a seção localizada na porção norte do BT. Quando utilizada apenas a informação do SRTM, este corte demonstra a inexistência do canal lateral interno ao BT e também do segmento de canal que direciona o fluxo no sentido Lagoa Mirim através das comportas (Figura 12). Após a integração das informações e suavização dos picos, tem-se um relevo menos acidentado, com evidência dos canais indicados pelas setas brancas, bem como a presença da elevação de cota da BR-471 indicada pela seta amarela na Figura 12. A curvatura observada entre os pontos 1000m e 2500m é referente a Lagoa Nicola, que possui cotas entre 0,40 m e 1,60m, de acordo com o levantamento batimétrico.

O perfil representado pelo corte B-B' também evidencia a representação do canal de drenagem lateral e a elevação da estrada. É importante destacar que o relevo obtido através da imagem SRTM fornece elevações equivocadas em função da superfície da água e da presença de vegetação no BT, não sendo assim uma boa fonte de informação para o interior de corpos hídricos. As maiores elevações captadas pela imagem SRTM em direção a B' são referentes aos bancos de areia no local e o início das áreas destinadas a silvicultura, representando a copa das árvores e não o relevo propriamente dito. Por isso, através de filtros para remoção desses pontos, os valores de cota utilizados para o local no MTN integrados são menores.

Figura 12 - Perfis topográficos dos cortes A-A', B-B', C-C' e D-D'.



Fonte: Autor.

O corte C-C' representa uma área da qual a estrada e o canal em direção à Lagoa Mirim já não fazem mais parte. Nesse corte é importante ressaltar a representação do canal lateral no

MDE integrado e a suavização dos picos aparentes nas imagens anteriores na planície de inundação da interface Banhado-Lagoa. Além disso, como no corte B-B', a intensa presença de macrófitas emergentes produz picos de valores dentro do BT na imagem SRTM.

O corte longitudinal D-D' representado na Figura 12 representou um pico elevado por volta dos 3000 metros que representa um valor da imagem SRTM não compatível com a realidade do terreno. A suavização desse pico foi realizada e a evidência do “degrau” entre os dois sistemas aparece em torno do metro 3700, mostrando que, apesar do escoamento da água ocorrer prioritariamente no sentido Lagoa Mangueira – Banhado do Taim, as elevações médias dentro do BT são maiores.

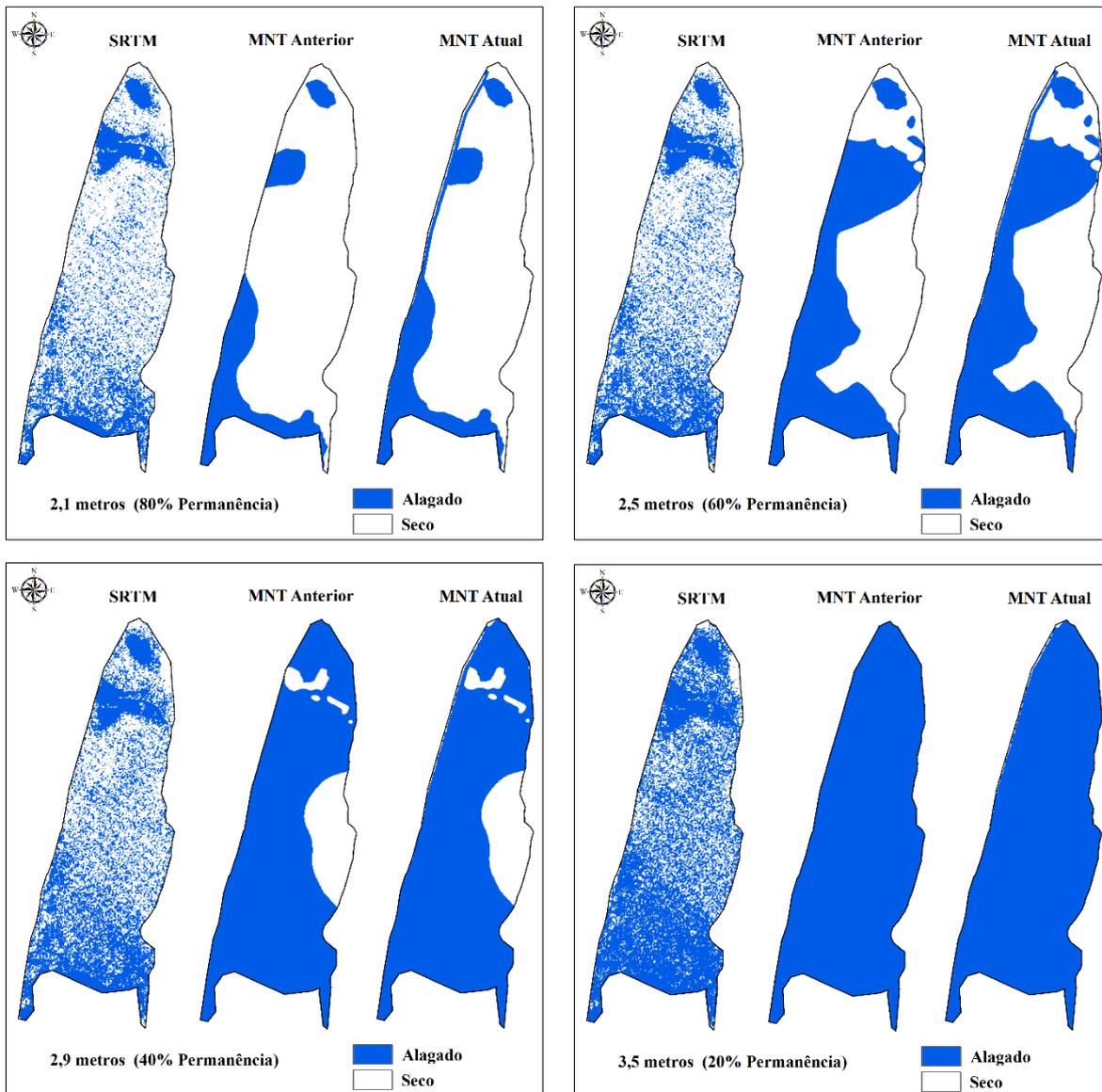
Além da observação visual da melhora da representação do terreno, merece destacar os pontos de controle obtidos a partir das cartas do exército e que se localizam a oeste no ponto A (3 metros), no ponto B (3 metros), em torno do ponto C (8 metros) e no ponto C' (5 metros), sendo assim compatíveis com os resultados obtidos nos perfis topográficos da Figura 12. Outras referências utilizadas como controle foram as cotas na BR-471, para que se mantivessem as cotas dentro dos valores esperados foi a fixação do valor da estrada nos pontos conhecidos. Através do valor referente a cota da estrada, possibilitando obter um MDE com resultados compatíveis com o campo.

O mapeamento de áreas alagadas no Banhado do Taim também demonstra como a inserção de feições, especialmente na região interna, produz resultados diferentes nas regiões que sofreram maiores alterações (Figura 13). A definição do canal lateral fica evidente em valores de cota de água mais baixos (permanência mais alta), além de demonstrarem a ineficiência de se utilizar uma imagem SRTM para representação de relevo de fundo.

As evidências da melhora obtida através das modificações no terreno podem ser vistas para cotas de permanência de 80% e 60%, onde há maior exposição do relevo de fundo. Por essas permanências representarem valores de cota menores que 2,7 metros de água, o canal lateral fica aparente, pois sua borda está em cota 2,7 metros, em média.

Além da melhora do mapeamento de áreas alagadas quando comparados os MDEs antigo e atual, quando levada em consideração a imagem SRTM, a delimitação da mancha de inundação também apresenta melhoras significativas. Devido à existência das macrófitas emergentes e superfícies de lâmina de água, como no caso das lagoas no interior do Banhado do Taim, a interferência desses elementos leva a interpretações equivocadas, já que tanto macrófitas quanto superfícies líquidas aparentam ser informação de relevo quando não são.

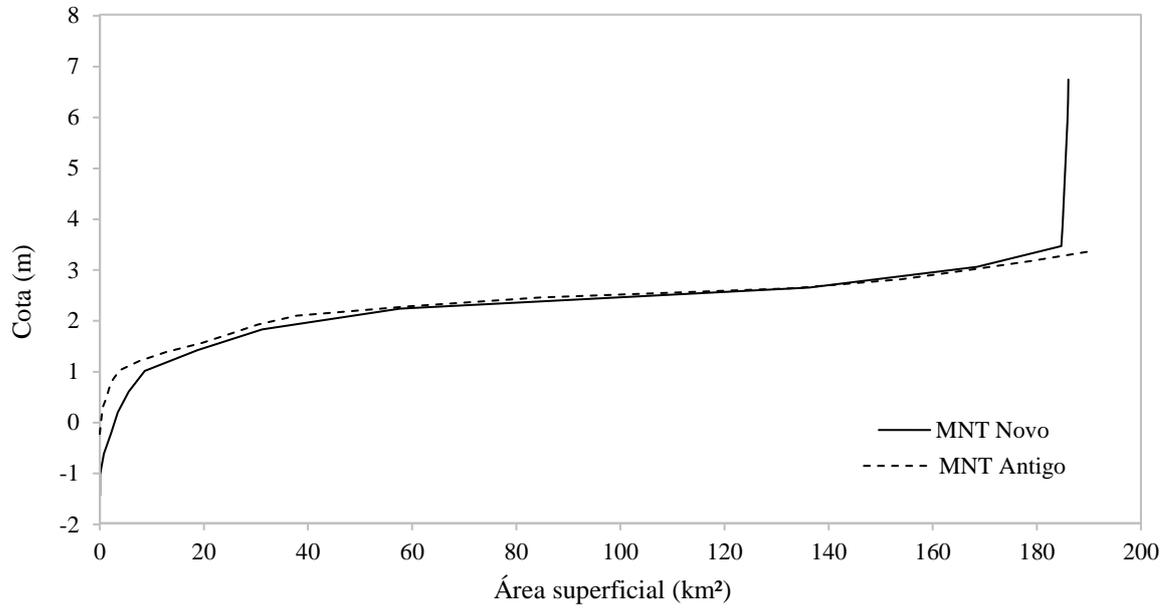
Figura 13 - Áreas alagadas para diferentes permanências no Banhado do Taim.



Fonte: Autor.

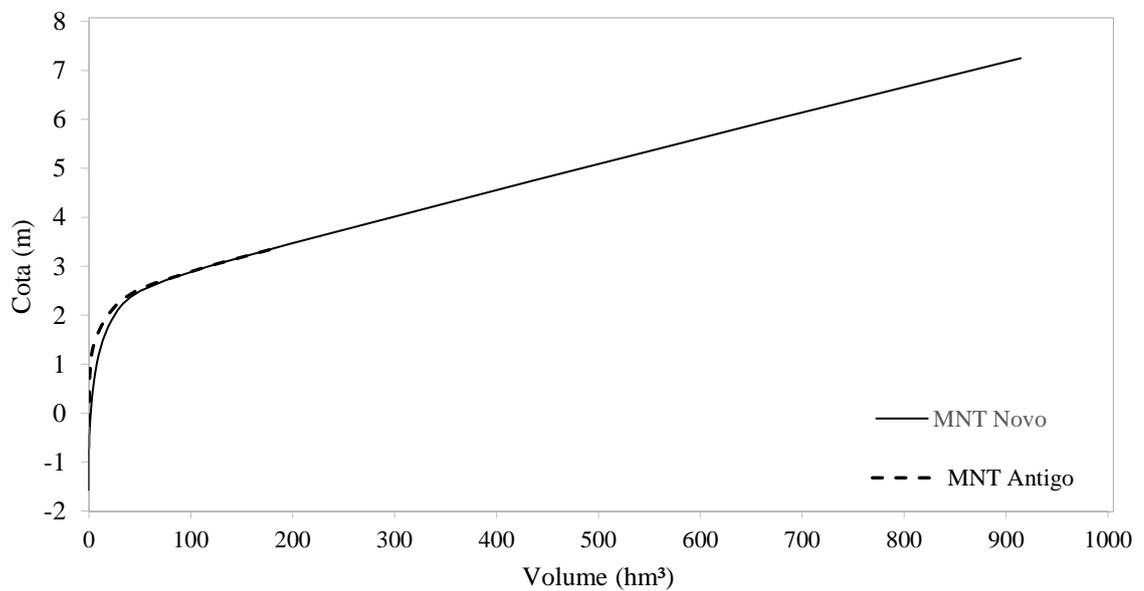
As curvas cota-área (Figura 14) e cota-volume (Figura 15) para o Banhado do Taim foram obtidas através das informações de relevo pré e pós alterações de terreno. Juntamente com a curva cota-área-volume da Lagoa Mangueira (Figura 16), elas fornecem informações sobre cotas máximas e mínimas, bem como se a distribuição da área superficial e do volume em função da cota do terreno.

Figura 14 - Curva cota-área do Banhado do Taim.



Fonte: Autor.

Figura 15- Curva cota-volume do Banhado do Taim.



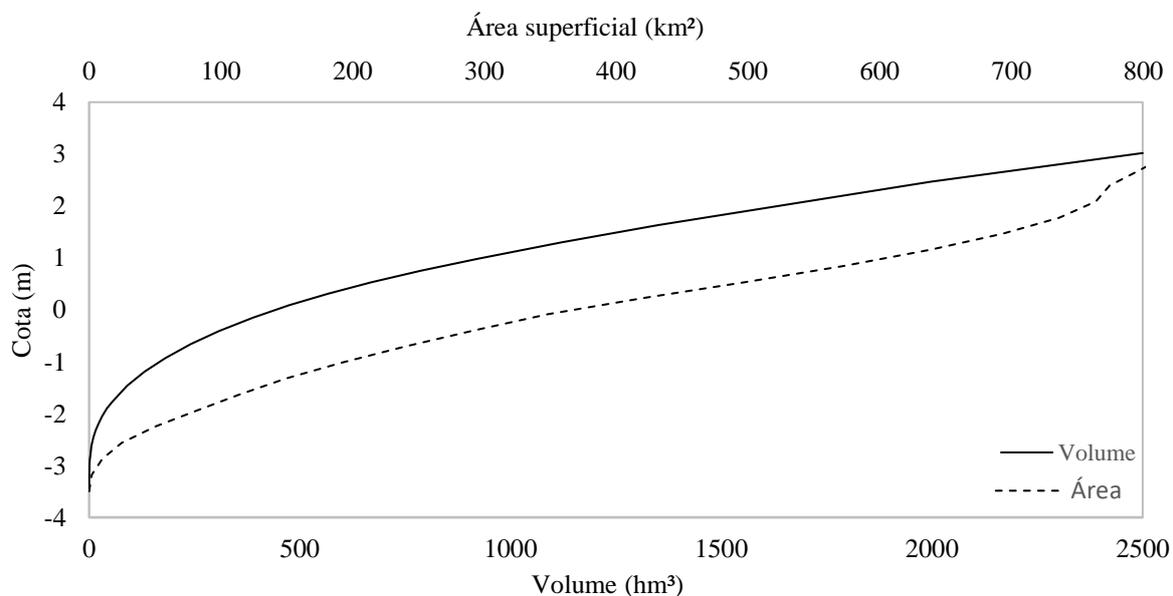
Fonte: Autor.

É possível perceber alterações das curvas do BT para as cotas mínimas e máximas. Essas mudanças ocorrem devido a inserção do canal lateral, que reduz as cotas mínimas de valores em torno de -0,35 metros para valores próximos de -1,5 metros, e o posicionamento da estrada na borda oeste do BT, que aumenta as cotas máximas de 3 metros para valores em torno de 6 metros.

O acréscimo no valor da cota máxima fica em evidência na curva da área na Figura 14. Pode-se inferir que o grande aumento no valor da cota não produz uma área alagada maior, já que a estrada inserida funciona como um vertedor, o que impede o espelho d'água de aumentar significativamente. Para a curva de volume, isso não é verdadeiro. Para cotas superiores a 3 metros, o aumento gradual de volume ocorre da mesma maneira no MDE antigo e no MDE atual, já que a capacidade de armazenamento não se altera em função da adição da feição da estrada.

As alterações no terreno realizadas neste estudo não interferem nas curvas para a Lagoa Mangueira Figura 16. Isso ocorre pelo fato de que as modificações abrangem somente a compatibilização das bordas da Lagoa com o restante do terreno, não produzindo mudanças nos valores de armazenamento e área alagada.

Figura 16 - Curva cota-área-volume da Lagoa Mangueira.



Fonte: Autor.

Em função da borda da Lagoa Mangueira estar localizada em cota média 1,5 metros, as variações da curva cota-área-volume podem ser analisadas em dois segmentos. Para valores de cota menores que 1,5 metros, é necessário um grande acréscimo de cota para produzir determinado volume de armazenamento, já para cotas maiores que 1,5 metros, acréscimos menores de cota são capazes de produzir o mesmo volume de armazenamento. Isso ocorre devido a propagação do escoamento na planície de inundação do sistema.

A curva cota-área segue uma tendência linear e pode ser aproximada pela equação (1) com $R^2 = 0,97$,

$$\text{Cota} = (0,0065 * \text{Área}) - 2,6734 \quad (1)$$

sendo a cota em metros e a área superficial em km^2 .

Os resultados sugerem que as melhorias obtidas na representação do terreno foram relevantes nesse estudo. Considerando informações escassas e de difícil obtenção, os aprimoramentos na representação das características locais ficam evidenciados na inserção do canal de drenagem lateral que direciona o fluxo no sentido Banhado do Taim – Lagoa Mirim. Além disso, a BR-471 também está representada no MDE integrado e, para estudos hidrológicos, funciona como um vertedor, influenciando assim nos padrões de comportamento da água.

O produto obtido foi utilizado na modelagem hidrológica-hidrodinâmica do sistema representado e será apresentado e discutido no capítulo II dessa dissertação.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um MDE local compatível com as necessidades de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, utilizando informação de diferentes fontes já que uma fonte sozinha não é capaz de definir todas as informações do sistema.

Com base nos resultados é possível concluir que a manipulação das informações foi satisfatória para se atingir o objetivo do estudo. De maneira geral, a união de informações provenientes de diferentes fontes permitiu criar um MDE integrado de toda a região de estudo, inserindo feições e características não existentes previamente. A caracterização da complexidade da região traz benefícios para estudos de modelagem no local, permitindo o desenvolvimento de pesquisas e estudos futuros.

No processo de avaliação da qualidade dos resultados, fica evidente a representação do canal lateral de drenagem e da BR-471. Através da análise dos perfis longitudinais, das áreas alagadas e das curvas cota-área e cota-volume pode-se afirmar a melhora na qualidade da representação topográfica da região através da compatibilização de informação de fontes distintas.

Ressalvas e recomendações:

- Imagens obtidas através de satélite, como no caso das imagens do SRTM, não são capazes de representar o fundo dos corpos hídricos e, dependendo da resolução, como as de 30 metros utilizadas nesse estudo, também não representam e forma satisfatória detalhes relevantes na área de estudo.

- A união de subprodutos de fontes diferentes pode ser fonte de erro negligenciado no processamento de imagens, por isso, é necessário realizar a interpolação nas regiões de interface e sempre atentar para as referências utilizadas, a fim de minimizar erros e produzir um MDE realista e suavizado onde se faz necessário.

- A adição de pontos de controle conhecidos é importante para garantir um resultado acurado da área sendo representada.

- O terreno receberá informações referentes as estruturas hidráulicas locais, por isso, como no caso das comportas e dos túneis para passagem de animais, apenas o rebaixamento do terreno foi realizado como forma de preparação para os próximos estudos, que incluem a modelagem bidimensional, por exemplo.

- Nas etapas finais de desenvolvimento desse estudo, um levantamento topográfico com drone foi realizado na região das comportas (alta complexibilidade). A partir desse

levantamento, uma parcela de um MDE será obtida como subproduto de alta resolução (1 centímetro) para futuros estudos.

Para trabalhos futuros, além da incorporação da região de maior complexibilidade, recomenda-se também realizar novos levantamentos topográficos na região, visto que as informações de fundo dos corpos hídricos podem ter sido alteradas ao longo do tempo. Além disso, buscar um levantamento batimétrico da Lagoa Mirim e expandir o MDE do local permite modelar uma parcela maior do local.

REFERÊNCIAS

- BAGER, A.; FONTOURA, V. **Evaluation of the effectiveness of a wildlife roadkill mitigation system in wetland habitat.** *Ecological Engineering*, v. 53, p. 31–38, 2013.
- BAGNARDI, M.; GONZÁLEZ, P. J.; HOOPER, A. **High-resolution digital elevation model from tri-stereo Pleiades-1 satellite imagery for lava flow volume estimates at Fogo Volcano.** *Geophysical Research Letters*, p. 6267–6275, 2016.
- BULÉ, B. P. **Influência das variáveis hidrológicas e da irrigação nos níveis do Banhado do Taim por meio de modelagem hidrológica.** 2017. 53 f. Trabalho de conclusão de curso (Eng. Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- BULÉ, B. P.; TASSI, R.; PERIUS, C. F.; DE PAULA, S. C. **Avaliação da Influência da Irrigação nos níveis do Banhado do Taim por meio de modelagem hidrológica.** XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, 2019.
- BURES, L.; ROUB, R.; SYCHOVA, P.; GDULOCA, K.; DOUBALOVA, J. **Comparison of bathymetric data sources used in hydraulic modelling of floods.** *Journal of Flood Risk Management*, v. 12, n.1, p. 1–10, 2019.
- CEA, M.; RODRIGUEZ, M. **Two-Dimensional Coupled Distributed Hydrologic–Hydraulic Model Simulation on Watershed.** *Pure and Applied Geophysics*, v. 173, n. 3, p. 909–922, 2016.
- CHEN, Y.; LI, J.; WANG, H.; QIN, J.; DONG, L. **Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 2, p. 735–749, 2017.
- DA ROSA, C. N. **Influência Dos Níveis De Água Na Dinâmica De Macrófitas Aquáticas Emergentes Do Banhado Do Taim.** 2016. 174 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- DNOS. Departamento Nacional De Obras De Saneamento. **Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico de Transformação em Irrigação da Região do Taim (RS).** V. 4, Brasília, 1968.
- ETTRITCH, G.; HARDY, A.; BOJANG, L.; CROSS, D.; BUNTING, P.; BREWER, P. **Enhancing digital elevation models for hydraulic modelling using flood frequency detection.** *Remote Sensing of Environment*, v. 217, p. 506–522, 2018.
- FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem numérica de terreno.** *Introdução à Ciência da Geoinformação.* São José dos Campos: INPE, 2011. cap. 7. p. 173-210. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em 23 de outubro de 2019.
- FERRARIN, C.; UMGIESSER, G. **Hydrodynamic modeling of a coastal lagoon: The Cabras lagoon in Sardinia, Italy.** *Ecological Modelling*, v. 188, n. 2–4, p. 340–357, 2005.
- FURZE, S.; OGILVIE, J.; ARP, P. A. **Fusing Digital Elevation Models to Improve Hydrological Interpretations.** *Journal of Geographic Information System*, v. 09, n. 05, p. 558–575, 2017.

- GETIRANA, A. C. V. et al. **Improving hydrological information acquisition from DEM processing in floodplains.** Wiley InterScience, v. 23, p. 502–514, 2009.
- GILLES, D.; YOUNG, N.; SCHROEDER, H.; PIOTROWSKI, J.; CHNAG, Y. **Inundation Mapping Initiatives of the Iowa Flood Center: Statewide Coverage and Detailed Urban Flooding Analysis.** Water, v. 4, p. 85–106, 2012.
- GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; ARCANGELETTI, E.; NARDI, F. **Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modeling.** Journal of Hydrology, v. 487, p. 39–47, 2013.
- HUNTER, N. M.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; WILSON, M. D. **Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review.** Geomorphology, v. 90, p. 208–225, 2007.
- IPH. **Comportamento hidrológico do Banhado do Taim.** Volume I – Relatório e anexos C, D, F, G e H. I. Instituto de pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 166 p. (1996).
- JAIN, M. K.; SINGH, V. P. **DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation.** Journal of Hydrology, v. 302, n. 1–4, p. 107–126, 2005.
- JONES, J. W.; DESMOND, G. B.; HENKLE, C.; GLOVER, R. **An approach to regional wetland digital elevation model development using a differential global positioning system and a custom-built helicopter-based surveying system.** International Journal of Remote Sensing, v. 33, n. 2, p. 450–465, 2012.
- KENWARD, T.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; FIELDING, E. **Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions.** Remote Sensing of Environment, v. 74, n. 3, p. 432–444, 2000.
- KIM, J.; SCHUMANN, G.; NEAL, J. C.; LIN, S. **Megaflood analysis through channel networks of the Athabasca Valles, Mars based on multi-resolution stereo DTMs and 2D hydrodynamic modeling.** Planetary and Space Science, v. 99, p. 55–69, 2014.
- KOUKOUVELAS, I. K.; ZYGOURI, V.; NIKOLAKOPOULOS, K.; VERROIOS, S. **Treatise on the tectonic geomorphology of active faults: The significance of using a universal digital elevation model.** Journal of Structural Geology, v. 116, p. 241–252, 2018.
- LANGHORST, T. et al. **Anticipated Improvements to River Surface Elevation Profiles From the Surface Water and Ocean Topography Mission.** Frontiers in Earth Science, v. 7, n.102, p. 1–13, 2019.
- LE COZ, M.; DELCLAUX, F.; GENTHON, P.; FAVREAU, G. **Assessment of Digital Elevation Model (DEM) aggregation methods for hydrological modeling: Lake Chad basin, Africa.** Computers & Geosciences, v. 35, p. 1661 – 1670, 2009.
- LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. **New global hydrography derived from spaceborne elevation data.** Eos, Transactions, American Geophysical Union, v. 89, n. 10, p. 93– 104., 2008.

- LI, X.; CUMMINGS, A. R.; ALRUZUQ, A. R.; MATYAS, C. J.; AMANAMBU, A. C. **Combining water fraction and DEM-based methods to create a coastal flood map: A case study of hurricane Harvey.** ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 8, n. 5, 2019.
- LIDBERG, W.; NILSSON, M.; LUNDMARK, T.; AGREN, A. N. **Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling.** Hydrological Processes, v. 31, n. 26, p. 4660–4668, 2017.
- LÓPEZ-VICENTE, M.; ÁLVAREZ, S. **Influence of DEM resolution on modelling hydrological connectivity in a complex agricultural catchment with woody crops.** Earth Surface Process and Landforms, v. 43, p. 1403-1415, 2018.
- MERWADE, V.; COOK, A.; COONROD, J. **GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping.** Environmental Modelling and Software, v. 23, n. 10–11, p. 1300–1311, 2008.
- MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. **The digital Terrain Model - Theory & Application.** Dept of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Inst. Of Technology – Cambridge, p. 433–442, 1958.
- MIURA, H. **Fusion Analysis of Optical Satellite Images and Digital Elevation Model for Quantifying Volume in Debris Flow Disaster.** Remote Sensing, v. 11, n. 9, 2019.
- MOTTA-MARQUES, D. M. et al. **O sistema Hidrológico do Taim.** PELD – CNPq. Dez anos do programa de Pesquisas de Longa Duração no Brasil: Achados, Lições e Perspectivas, p. 200-224, 2002.
- NAGAVENI, C.; KUMAR, K. P.; RAVIBABU, M. V. **Evaluation of TanDEMx and SRTM DEM on watershed simulated runoff estimation.** Journal of Earth System Science, v. 128, n. 2, 2019.
- NOGUEIRA, J. D. L.; AMARAL, R. F. **Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros - RN.** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. p. 4117–4123, 2009.
- PAPASAIKA, H.; POLI, D.; BALTSAVIAS, E. **Fusion of Digital Elevation Models from Various Data Sources.** IEEE, 2009.
- PARK, E.; LATRUBESSE, E. M. **The hydro-geomorphologic complexity of the lower Amazon River floodplain and hydrological connectivity assessed by remote sensing and field control.** Remote Sensing of Environment, v. 198, p. 321–332, 2017.
- PAZ, A. R. **Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do Banhado do Taim (RS).** 2003. 176 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- PEÑA, F.; NARDI, F. **Floodplain terrain analysis for coarse resolution 2D flood modeling.** Hydrology, v. 5, n. 4, 2018.

- QUINTELA, F. M. et al. **High arsenic and low lead concentrations in fish and reptiles from Taim wetlands, a Ramsar site in southern Brazil.** *Science of the Total Environment*, v. 660, p. 1004–1014, 2019.
- RAMSAR. **Ramsar Sites Information Service.** Disponível em: <<https://rsis.ramsar.org/ris/2298?language=en>>. Acesso em: 07 janeiro 2020.
- RAYBURG, S.; THOMS, M. **A coupled hydraulic-hydrologic modelling approach to deriving a water balance model for a complex floodplain wetland system.** *Hydrology Research*, v. 40, n. 4, p. 364–379, 2009.
- RIZKI, P. N. M.; EUM, J.; LEE, H.; OH, S. **Spark-based in-memory DEM creation from 3D LiDAR point clouds.** *Remote Sensing Letters*, v. 8, n. 4, p. 360–369, 2017.
- SAKSENA, S.; MERWADE, V. **Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping.** *Journal of Hydrology*, v. 530, p. 180–194, 2015.
- SAMPSON, C. C. et al. **Use of terrestrial laser scanning data to drive decametric resolution urban inundation models.** *Advances in Water Resources*, v. 41, p. 1–17, 2012.
- SANDELLS, M. J.; DAVENPORT, I. J.; GURNEY, R. J. **Passive L-band microwave soil moisture retrieval error arising from topography in otherwise uniform scenes.** *Advances in Water Resources*, v. 31, n. 11, p. 1433–1443, 2008.
- SATTAR, A.; GOSWAMI, A.; KULKARNI, A. V. **Application of 1D and 2D hydrodynamic modeling to study glacial lake outburst flood (GLOF) and its impact on a hydropower station in Central Himalaya.** *Natural Hazards*, v. 97, p. 535 - 553, 2019.
- SAYL, K. N.; SHAZWANI, N.; AHMED, M. **Optimization of area – volume – elevation curve using GIS – SRTM method for rainwater harvesting in arid areas.** *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 11, 2017.
- SIMA, S.; TAJRISHY, M. **Using satellite data to extract volume – area – elevation relationships for Urmia Lake, Iran.** *Journal of Great Lakes Research*, v. 39, n. 1, p. 90–99, 2013.
- TAREKEGN, T. H.; HAILE, A. T.; RIENTJES, T.; REGGIANI, P.; ALKEMA, D. **Assessment of an ASTER-generated DEM for 2D hydrodynamic flood modeling.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 12, n. 6, p. 457–465, 2010.
- TASSI, R. **Gerenciamento hidroambiental de terras úmidas.** 2008. 240 P. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2008.
- TASSI, R.; MOTTA-MARQUES, D.; COLLISCHONN, W. **Advances in water management of southern Brazilian sub-tropical wetlands using bio-indicators.** *IAHS Publication*, n. 315, p. 1–8, 2007.
- TATE, N. J.; FISHER, P. F. **Causes and consequences of error in digital elevation models.** *PPG: Earth and Environment*, v. 4, p. 467–489, 2006.

- UFSM. **Cartas topográficas do Rio Grande do Sul – 1:50.000**. Laboratório de Cartografia. 2020. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/cartografia/>. Acesso em 07 janeiro 2020.
- VILLANUEVA, A. O. N.; MOTTA-MARQUES, D.; TUCCI, C. E. M. **The Taim wetland conflict: A compromise between environment conservation and irrigation**. *Water International*, v. 25, n. 4, p. 610–616, 2000.
- VILLANUEVA, A. O. N. **Simulação de áreas de inundação dinâmicas: Canais compostos e wetlands**. 1997. 125 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. **On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology**. *Erosion, Sedimentation and Geomorphology*, v. 35, n. 7, p. 2259–2268, 1999.
- WILSON, M. D. et al. **Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands**. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 15, p. 4–9, 2007.
- WISE, S. M. **Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model**. *Computers and Geosciences*, v. 33, n. 10, p. 1351–1365, 2007.
- WOODROW, K.; LINDSAY, J. B.; BERG, A. A. **Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction**. *Journal of Hydrology*, v. 540, p. 1022 – 1029, 2016.
- WU, Q.; LANE, C. R.; WANG, L.; VANDERHOOF, M. K.; CHRISTENSEN, J. R.; LIU, H. **Efficient Delineation of Nested Depression Hierarchy in Digital Elevation Models for Hydrological Analysis Using Level-Set Method**. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 55, n. 2, p. 354–368, 2019.
- XIE, Z.; LIU, Z.; JONES, J. W.; HIGER, A. L.; TELIS, P.A. **Landscape unit based digital elevation model development for the freshwater wetlands within the Arthur C. Marshall Loxahatchee National Wildlife Refuge, Southeastern Florida**. *Applied Geography*, v. 31, n. 2, p. 401–412, 2011.
- XIE, Z.; PEARLSTINE, L.; GAWLIK, D. **Developing a fine-resolution digital elevation model to support hydrological modeling and ecological studies in the northern Everglades**. *GIScience and Remote Sensing*, v. 49, n. 5, p. 664–686, 2012.

CAPÍTULO II – MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANhado DO TAIM UTILIZANDO HEC-RAS

RESUMO

AUTORA: Bibiana Peruzzo Bulé
ORIENTADORA: Rutineia Tassi

As áreas úmidas são reconhecidas como um dos recursos naturais mais valiosos do mundo devido suas características e as funções que desempenham. Porém, apesar dessa importância, várias áreas úmidas do mundo vem perdendo área devido as ameaças antrópicas. O Banhado do Taim (BT), localizado no extremo Sul do Brasil é um exemplo de área úmida e objeto de estudo desse trabalho, que está inserido em região de recorrentes conflitos relacionados ao uso da água envolvendo atividade econômica e a preservação ambiental. Plantações de arroz nas imediações do BT retiram massivos volumes de água da Lagoa Mangueira, sua principal tributária, levando a mudanças na hidrodinâmica local. Por um lado, existe a dependência econômica da agricultura e, por outro, questões relacionadas a disponibilidade de água para manutenção sistêmica. Estruturas inseridas na região como estradas, comportas e túneis de fauna também afetam a hidrodinâmica local. Devido a sua importância, alguns estudos dedicaram-se a entender e reproduzir as variáveis que afetam o regime hidrológico para desenvolver estratégias para políticas de gestão da água, permitindo alcançar os benefícios ambientais e econômicos. A complexidade do local leva à necessidade de aplicar modelos hidrológicos e hidrodinâmicos capazes de representar o comportamento do local, porém, a luz dos dados e capacidades computacionais da época de desenvolvimento desses estudos, os modelos utilizados adotam algumas simplificações e tem seu uso limitado nos dias de hoje. Nesse estudo, o HEC-RAS 5.0.7 foi utilizado para representar o sistema baseado em informações de terreno obtidas a partir da combinação de diferentes fontes de dados, como satélite e medições locais, permitindo a aquisição de uma nova informação de terreno mais completa utilizada como base para propagação do escoamento. Baseado na nova informação de terreno, nos dados hidrológicos (precipitação e evaporação), volumes de água retirados da Lagoa Mangueira, cotograma da Lagoa Mirim (outra tributária do BT), localização das macrófitas e detalhamento das estruturas hidráulicas, foi possível calibrar e validar a série de níveis de água do Banhado do Taim no modelo HEC-RAS 2D, versão 5.0.7, uma ferramenta computacional avançada que recebe constantes atualizações e permite a análise de uma variedade de resultados provenientes da simulação hidrodinâmica. Além disso, três cenários de simulação também foram criados para analisar diferentes situações de gerenciamento dos recursos hídricos na região. A calibração do modelo para 1960 a 2019 utilizou como referência a série de níveis de água do mesmo período resultante de um estudo hidrológico-hidrodinâmico prévio. Foi possível obter um NSE de 0,90, um PBIAS de -1,7% e um RSR de 0,32. Para a validação foram utilizados dados medidos de nível d'água para o período de 1995 a 2003, obtidos em 2 réguas localizadas no interior do Banhado do Taim. Para a validação os resultados foram muito bons para uma das réguas (NSE 0,79, PBIAS 5,4% e RSR 0,46) e bons para a outra (NSE 0,63, PBIAS 5,7% e RSR 0,61). Os 3 cenários de simulação apresentaram variações nas condições de nível e hidroperíodo do BT conforme esperado.

Palavras-chave: Área úmida. Calibração. Gerenciamento.

CHAPTER II – BIDIMENSIONAL HYDRODYNAMICS MODELING OF THE TAIM WETLAND USING HEC-RAS 5.0.7

ABSTRACT

AUTHOR: Bibiana Peruzzo Bulé

ADVISOR: Rutineia Tassi

Wetlands are ecosystems recognized as one of the most valuable natural resources in the world due to their characteristics and the functions they perform. However, despite this importance, wetland areas around the world have been losing area due to human threats. The Taim Wetland (TW), located in the Southern part of Brazil, is an example of a wetland area and object of study of this paper. The wetland is situated in a region of recurring conflicts related to the use of water due to economic activities and environmental preservation. Extensive rice fields around BT withdraw massive volumes of water from its main tributary (Mangueira Lake), leading to changes in local hydrodynamics. Thus, by one side, there is the regional economic dependence on rice cultivation, and, on the other hand, issues related to the water availability for maintaining the ecosystem. Structures inserted in the region, such as roads, gates and fauna tunnels also affect the local hydrodynamics. The Taim wetland has been object of several studies that aimed to understand the variables that affect the hydrological regime in order to develop strategies for water management policies, allowing the balance between environmental and economic benefits. The complexity of the site leads to the need of applying hydrological and hydrodynamic models capable of representing the behavior of the site. However, in the light of information available at the time and computational constrains, these studies needed to adopt several simplifications. In this study, HEC-RAS 5.0.7 was used to represent the system based on terrain information obtained from the combination of different data sources, such as satellite information and measurements on site, allowing the acquisition of more complete and accurate terrain information used for modeling. From this new terrain information, hydrological data such as precipitation and evaporation, estimated volumes of water withdrawn from Mangueira Lake, stage hydrograph from Mirim Lake (another tributary of TW), location of macrophytes and details of hydraulic structures, it was possible to calibrate and validate a two-dimensional model in HEC-RAS 2D, an advanced computational tool that is been updated continuously and allows the analysis of a variety of results from hydrodynamics simulation. In addition, three simulation scenarios were also created to analyze different situations of water resource management in the region. The calibration of the HEC-RAS 2D model used as a reference the results from 1960 to 2019 of a hydrological-hydrodynamic study of the region, with statistical coefficients analyzed for two periods 1960-2019 and 1980-2019, due to high uncertainty of some periods. The calibration for the 1960-2019 period is classified as “very good” and showed NSE 0.81, PBIAS -5.2% and RSR 0.44. For the second period, NSE 0.90, PBIAS -1.7% and RSR 0.32. For the validation with data measured through 2 rulers in the period 1995 - 2003, the simulation shows “very good” results for one ruler (NSE 0.79, PBIAS 5.4% and RSR 0.46) and “good” for the other (NSE 0.63, PBIAS 5.7% and RSR 0.61). The scenarios showed differences on water level and behavior of the simulates time-series.

Keywords: Wetland. Calibration. Management.

1. INTRODUÇÃO

Áreas úmidas ou ambientes úmidos são ecossistemas de transição que se salientam na natureza por sua elevada importância social, ambiental e por seus serviços ecossistêmicos (DURANEL et al., 2007; NERI-FLORES et al., 2019). Especialmente encontradas em áreas costeiras de relevo baixo, essas áreas promovem a melhora da qualidade da água, regularização de fluxos, recarga de aquíferos, retenção de sedimentos e nutrientes, além de serem consideradas os maiores sumidouros de carbono no ambiente (LES LANDES et al., 2014; MITRA, WASSMANN e VLEK, 2005; MITSCH e GOSSELINK, 2007; NERI-FLORES et al., 2019; WESTON et al., 2014).

Dentre essas razões, as áreas úmidas são tidas um dos ecossistemas mais produtivos da terra, comparadas às florestas tropicais e recifes de corais (CHIN, 2016). Apesar de sua relevância, as pressões sobre esses ecossistemas ocorrem desde o século 18, com crescimento mais relevante desde os anos 50, atingindo seu pico no final do século 20 (BIRDLIFE INTERNATIONAL, 2017 ; OECD, 1996). Perdas de mais de 50% desses ecossistemas, desde os anos 1900, levam à redução da biodiversidade (MALTBY e ACREMAN, 2011; PERENNOU et al., 2012; SHINE e KLEMM, 1999; WINKLER e DEWITT, 1985), com estudos que apontam taxas de perdas 3,7 vezes mais rápidas na segunda metade do século 20 e início do século 21 (DAVIDSON, 2014), devido às conversões dessas zonas em áreas de agricultura, industrial ou urbana.

Devido à complexibilidade relacionada a presença de macrófitas e planícies, aliado à importância dessas áreas, é crescente o uso de modelos hidrológicos e/ou hidrodinâmicos para melhorar o entendimento dos processos nelas envolvidos, e auxiliar na restauração e manejo desses ecossistemas (BAUER, GUMBRICHT e KINZELBACH, 2006; BRAUN et al., 2019; CHEN, MESELHE e WALDON, 2012; DIXON e FLORIAN, 1993; HSU et al., 1998; JONES et al., 2012; LAI, HUANG e JIANG, 2012; MARTINEZ-MARTINEZ et al., 2014; MILZOW, BURG e KINZELBACH, 2010; MIN, PAUDEL e JAWITZ, 2010; MOUSTAFA e HAMRICK, 2000; THOMPSON et al., 2004; ZHANG et al., 2002). Porém, o que se observa nesses estudos são simulações de curto e médio prazo, o que muitas vezes não reflete de maneira ampla os impactos que as estações do ano, períodos de cheias e de secas, além da influência do ser humano podem ter nesses ecossistemas. A escassez de dados, os custos computacionais, as instabilidades numéricas, dados de entrada inadequados e grande volume de arquivos de saída são os fatores que tornam a utilização de modelos, principalmente os bidimensionais que

requerem informação de topografia e relevo acuradas, menos explorados para simulações de longo prazo (WEN et al., 2013).

Nesse contexto, o objeto de estudo deste trabalho é o Banhado do Taim, localizado na região costeira do sul do Brasil. Reconhecido com sítio Ramsar nº 2298 (RAMSAR, 2020), essa área úmida de reconhecimento internacional tem sua dinâmica movida por diferentes forças, e é alvo de conflitos relacionados ao uso da água, uma vez que a mesma é necessária à conservação da área, mantendo sua funcionalidade e biodiversidade e, ao mesmo tempo, é essencial para orizicultura desenvolvida na região (TASSI, MOTTA-MARQUES e COLLISCHONN, 2007). A coletânea de biodiversidade presente nas terras úmidas do Banhado do Taim inclui desde macroinvertebrados, peixes e répteis até aves migratórias e espécies ameaçadas de extinção (TASSI, 2008).

As regiões adjacentes ao Banhado possuem ligações com o mesmo, fazendo com que ele responda não somente a fatores climáticos sobre ele, mas também alterações no sistema hidrológico do Taim inteiro, fazendo com que muitas características do local se mostrem dependentes dos fatores externos, implicando em modificações no ecossistema local (MOTTA MARQUES et al., 2002; VILLANUEVA, 1997).

Neste sistema costeiro o relevo é muito plano, o regime das águas não é impactado pelo oceano e a vegetação é basicamente composta por macrófitas emergentes (VILLANUEVA, 1997). A existência dessa vegetação promove o desenvolvimento de um sistema complexo, (CURRAN e HESSION, 2013), o que combinado às características de relevo, torna a hidrodinâmica complexa e sua reprodução dependente de informações de topografia e relevo de qualidade, bem como detalhamento das demais informações.

Estudos dedicados ao desenvolvimento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos foram realizados para a região para ajudar no entendimento dessa complexidade (PAZ, 2003; VILLANUEVA, 1997). Apesar de, ainda nos dias de hoje produzirem bons resultados, como são estudos desenvolvidos há mais de 15 anos, e com modelos especialmente codificados para a região, a utilização destes se torna um fator limitante nos dias de hoje. Devido à pequena disponibilidade de documentação e ausência de atualização, a utilização destes modelos requer diferentes artifícios computacionais, e maior experiência do usuário devido à falta de interface desses programas.

De qualquer forma, devido ao elevado valor ambiental do Banhado do Taim, surge a necessidade de se produzirem estudos continuados na região, utilizando ferramentas computacionais mais modernas, acompanhando a evolução dos computadores, a

disponibilidade de dados, e a necessidade crescente de inovação. Com isso, ajustar um modelo hidrodinâmico de longo prazo no HEC-HAS 5.0.7, um software de domínio público mundialmente empregado, que conta com boa documentação, possibilita atualizações mais constantes, permite análises de cenários em diferentes estudos, além de ser uma ferramenta mais amigável ao modelador.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

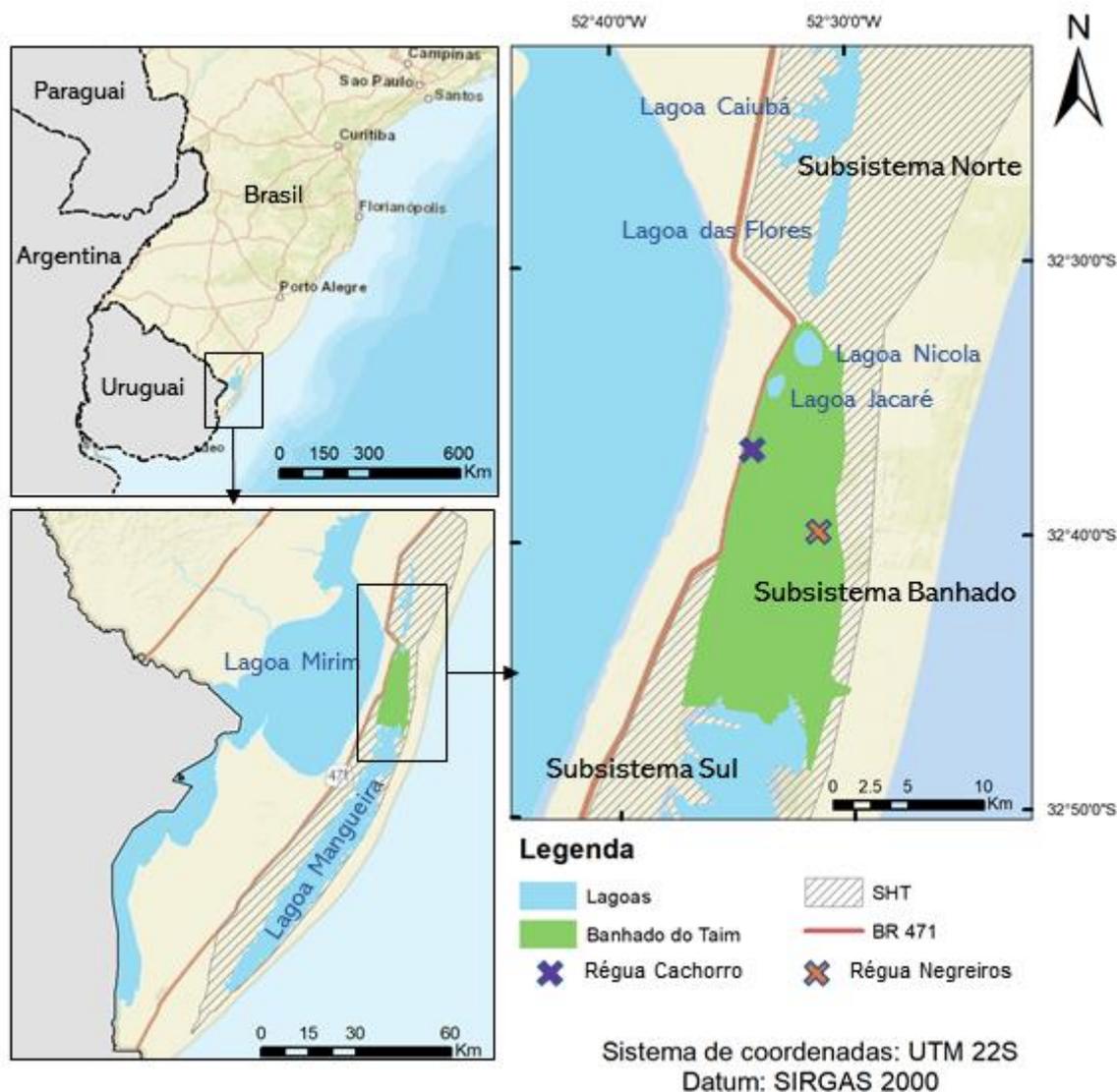
A área de estudo deste trabalho é a região do Banhado do Taim, sítio RAMSAR nº 2298, designado em 2017 (RAMSAR, 2020). O Banhado do Taim possui área superficial média de 190 km² e está inserido na região denominada Sistema Hidrológico do Banhado do Taim, definida como a área que abrange as Lagoas Mirim, Mangueira e o Banhado do Taim (MOTTA MARQUES et al., 2002), na grande bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, de superfície aproximada de 62.250 km².

O Sistema Hidrológico do Taim está localizado entre o Oceano Atlântico e a Lagoa Mirim, abrangendo áreas dos municípios de Santa Vitória do Palmar e Rio Grande, bem como regiões de dunas, campos lagoas e banhados alagados. O SHT é formado por três sistemas distintos que interagem entre si: (i) o Subsistema Norte, com uma área de 387 km², é composto pelas lagoas Caiubá e das Flores e pelo Banhado do Maçarico. A influência desse subsistema no subsistema Banhado é mínima. (ii) Subsistema Banhado (270 km²) que engloba o Banhado propriamente dito, bem como as Lagoas Nicola e Jacaré. Nesse subsistema, o escoamento tem como características as velocidades baixas causadas pela presença intensa de macrófitas emergentes e o seu exutório são as comportas inseridas na porção norte do Banhado em direção a Lagoa Mirm. (iii) o Subsistema Sul, de área superficial 1597 km² é formado basicamente pela Lagoa Mangueira e sua Bacia de contribuição. As trocas de água ocorrem basicamente entre os subsistemas ii e iii através de um canal junto à BR-471, e por trocas de água na interface Lagoa Mangueira-Banhado (MOTTA MARQUES et al., 2002; VILLANUEVA, 1997). O SHT e os principais componentes explorados nesse estudo podem ser visualizados na Figura 17.

O Sistema Hidrológico do Taim está inserido em região costeira de relevo plano, com elevações médias de -3 m em regiões alagadas, chegando aos 25 m nos pontos mais elevados da bacia de contribuição, em direção ao interior do continente. No entanto, pode-se dizer que a

maior parte da região do Banhado do Taim é caracterizada por baixas declividades, o que torna complexa a hidrodinâmica local.

Figura 17 - O Sistema Hidrológico do Taim e seus componentes.



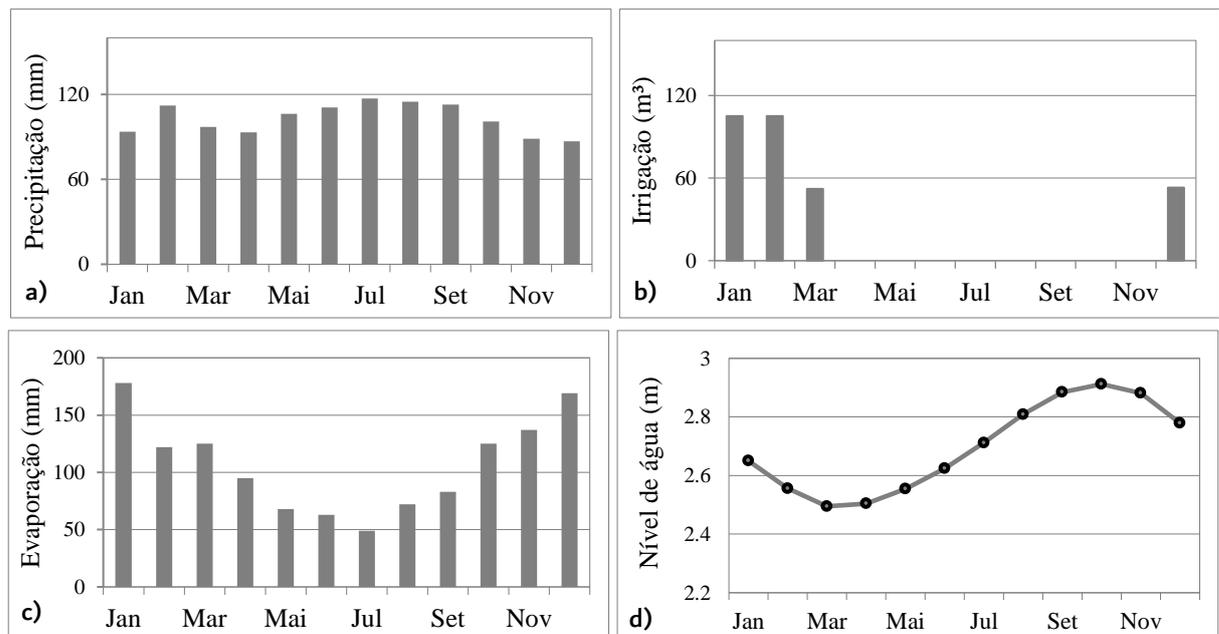
Fonte: Autor.

Normalmente, o escoamento do sistema ocorre no sentido da Lagoa Mangueira, para o Banhado do Taim, e ao norte deste para a Lagoa Mirim. No entanto, pode ocorrer inversão de escoamento da Lagoa Mirim para o Banhado do Taim, e deste para a Lagoa Mangueira, sob condições específicas. A alimentação hidrológica do Banhado do Taim é garantida por meio da precipitação direta e escoamento proveniente, prioritariamente da Lagoa Mangueira. Já a saída

de água ocorre basicamente por evapotranspiração direta, ou escoamento através das comportas localizadas no extremo norte, em direção à Lagoa Mirim (PAZ, 2003).

A região é de clima subtropical Ia sofre grande influência do Oceano Atlântico, tendo temperaturas médias mínimas de 8°C e médias máximas de 24°C (ROSSATO, 2011). O clima exerce forte influência na dinâmica e no comportamento de todo o sistema hidrológico local, em especial na disponibilidade de água para regular o hidroperíodo, o que torna importante entender e identificar como a variabilidade da precipitação (temporal e espacial) impacta a dinâmica local (BURGER, 2000). A sazonalidade da precipitação, irrigação e evaporação, bem como as cotas de água no Banhado do Taim ao longo do tempo podem ser visualizadas na Figura 18.

Figura 18 - Sazonalidade da (a) precipitação, (b) irrigação, (c) evaporação e (d) níveis de água no Banhado do Taim.



Fonte: Autor.

No interior do Banhado do Taim o escoamento é caracterizado pelas baixas declividades associadas as baixas velocidades superficiais, o que ocorre devido à presença de macrófitas aquáticas, as quais desaceleram o escoamento e promovem a formação de alguns caminhos preferenciais. Além disso, as retiradas de água para manutenção da irrigação das culturas de arroz são feitas diretamente da Lagoa Mangueira, fato este que pode influenciar os níveis do

Banhado do Taim, além da sua variabilidade natural, dependendo da época do ano. Estudos anteriores mostram que o nível médio de água no interior do Banhado do Taim é da ordem de 2,80 metros, no entanto, durante longos períodos úmidos, os picos podem atingir valores próximos a 5,50 metros, e durante estiagens pode ser reduzido a mínimos da ordem de 1,0 metro (BULÉ, 2017; MOTTA-MARQUES et al., 2013). Essa variabilidade pode modificar completamente a paisagem da região, impactando diretamente as espécies que dependem desse ecossistema.

Adicionalmente, deve-se mencionar que na década de 60, foi construída a BR-471 uma rodovia federal que corta o Banhado do Taim de Norte a Sul. A construção da rodovia se deu por meio de aterro, o que fragmentou a região do Banhado do Taim, levando a um elevado número de atropelamentos de animais que tentam atravessar a rodovia (BAGER e FONTOURA, 2013). Em razão disso, em 1998, foi instalado o Sistema de Proteção à Fauna (SPF) que é composto por cercamento das margens do aterro, redutores de velocidade na estrada, redução do limite de velocidade permitido, e também por 19 túneis de passagem de fauna, que ficaram conhecidos popularmente como capivarodutos (TASSI, 2008). A construção da estrada e a inserção dos túneis para passagem de animais promoveu alterações não somente relacionadas ao trânsito de veículos e mortandade de animais, mas também ocasiona alterações hidrológicas-hidrodinâmicas na região. O aterro da estrada, com cotas mais elevadas que o Banhado do Taim, tornou a mesma um dique, represando a água e, conseqüentemente, promovendo alterações hidrodinâmicas relevantes. Além disso, a inserção dos túneis para passagem de fauna tem impacto direto no escoamento, especialmente quando os níveis da água estão mais altos no Banhado do Taim, e estes passam a atuar como descarregadores para o outro lado da estrada (BULÉ, 2017).

Como se verifica, o sistema hidrológico-hidrodinâmico da região é muito complexo, fato que, juntamente com a precariedade de dados hidrológicos para a região, fez com que até o ano de 1995 não houvesse estudo hidrológico que englobasse todo o ecossistema. No ano de 1995, em um estudo específico para entender o funcionamento do Sistema Hidrológico do Banhado do Taim (IPH, 1996) foram instaladas réguas linimétricas que foram monitoradas por um período não contínuo de 7 anos. Devido à instalação tardia das réguas, a série de níveis de água observada não contemplava anos anteriores a 1995, surgindo a necessidade do desenvolvimento do modelo proposto por Villanueva (1997), sendo o primeiro trabalho realizado neste sentido. Este trabalho pioneiro, além de estender as séries de níveis para anos anteriores com um modelo hidrodinâmico pseudo-bidimensional de células, permitiu avaliar

diferentes cenários de gestão dos recursos hídricos da região. Os cenários avaliados permitiram identificar que captações de água na Lagoa Mangueira têm potencial de causar efeitos hidrológicos no Banhado do Taim, e a chave para a conservação deste ecossistema está no gerenciamento adequado da água no sistema como um todo.

Posteriormente, Paz (2003) aplicou o modelo IPH-A, um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal, associado a um algoritmo de secagem/inundação para o sistema formado pela Lagoa Mangueira e pelo Banhado do Taim. O objetivo do estudo foi analisar quais eram os principais fatores de influência no comportamento hidrodinâmico do local. Através deste estudo, foi possível analisar que a ação do cisalhamento do vento na superfície da água e a presença de macrófitas têm papel fundamental na dinâmica do Banhado do Taim e estão fortemente associadas.

Outro estudo dedicado ao Banhado do Taim teve por objetivo validar e aplicar o modelo desenvolvido por Villanueva (1997) para estender a série de níveis até o mês de dezembro do ano de 2003. Além disso, a pesquisa estudou diferentes bioindicadores no local, aplicando conceitos de índices de adequabilidade de habitat para avaliar temporalmente e espacialmente do regime hidrológico do Banhado do Taim sobre os diferentes indicadores selecionados (TASSI, 2008).

2.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO BANHADO DO TAIM USANDO O HEC-RAS 2D

Para estudar o comportamento hidrológico-hidrodinâmico no Banhado do Taim foi realizada uma modelagem matemática de longo prazo de janeiro de 1960 a julho de 2019, objetivando ajustar o modelo a uma série contínua de níveis mensais de água, a partir de dados disponíveis para a região.

A simulação hidrológica-hidrodinâmica de longo prazo no Banhado do Taim foi realizada por meio do software HEC-RAS em sua versão 5.0.7, sendo essa bidimensional (USACE(a), 2016). Um rotina hidrológica *off-line* também foi desenvolvida para a determinação do balanço de volumes na Lagoa Mangueira (condição de contorno).

O HEC-RAS 2D versão 5.0.7 pode modelar componentes puramente unidimensionais, como em suas versões anteriores, áreas definidas como polígonos completamente bidimensionais baseadas em informações topográficas de terreno, ou ainda uma modelagem

híbrida, onde o rio principal, por exemplo, é modelado como objeto unidimensional e demais áreas consideradas polígonos bidimensionais (USACE(b), 2016).

A base para as simulações no HEC-RAS parte da necessidade de representação do sistema utilizando informações topográficas e geométricas da área de estudo. A geometria do sistema simulado no HEC-RAS é composta por polígonos definidos pelo usuário, que podem incluir as áreas de acumulação e as áreas de fluxo bidimensionais (2D) que definem elementos que compõem o escoamento. Esses dados geométricos consistem na descrição do tamanho, forma e conectividade das diferentes áreas de fluxo 2D ou áreas de acumulação do modelo (USACE (b), 2016).

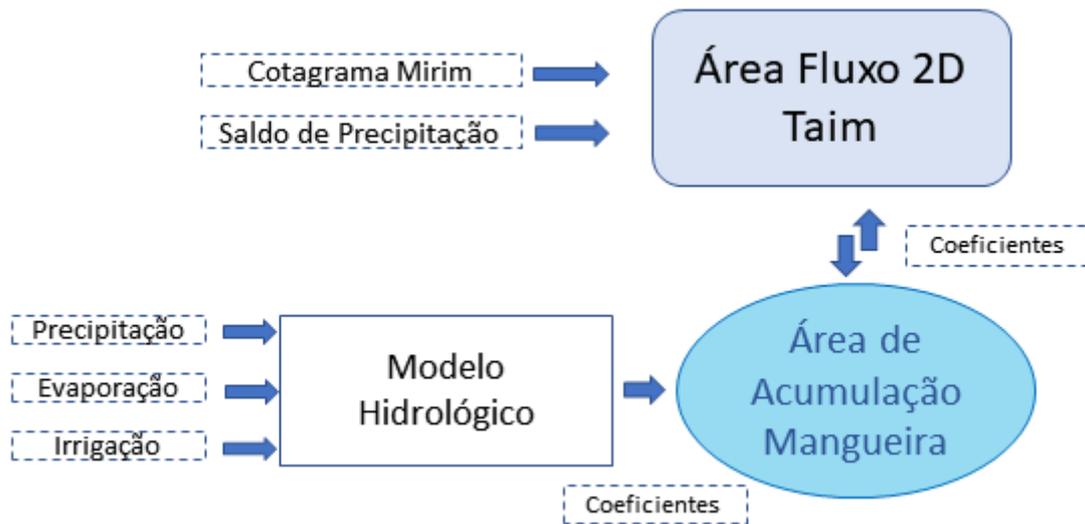
As áreas de acumulação usualmente são utilizadas para definir lagos, reservatórios ou corpos hídricos maiores, com menor nível de detalhamento e funcionam como condições de contorno na modelagem do sistema (USACE (b), 2016). Já as áreas de fluxo 2D são geometrias compostas por células irregulares e detalhadas onde a propagação do escoamento ocorre de maneira bidimensional. Assim, a Lagoa Mangueira, condição de contorno de montante, foi representada como uma área de acumulação que recebe um hidrograma de vazões de entrada ou saída da Lagoa, obtido através de um modelo hidrológico *off-line* desenvolvido no estudo. Por requerer um nível de detalhe maior, o Banhado do Taim, foco do estudo, foi representado como uma área de fluxo bidimensional.

Além das geometrias inseridas no sistema, algumas condições de contorno não necessitam representações geométricas individuais e podem ser inseridas em faces específicas de geometrias pré-existentes no sistema. Como exemplo, podem ser citados os hidrogramas inseridos ao longo do curso de rios ou em pontos específicos de reservatórios, declividades que representem saídas livres de áreas de acumulação ou reservatórios e, ainda, a inserção de um cotograma que defina o nível de água exercido em um ponto de uma geometria qualquer (USACE (a), 2016). Dessa maneira, a condição de contorno de jusante do sistema (Lagoa Mirim) foi representada pela inserção de um cotograma localizado na face da área de fluxo 2D Taim que encontra a Lagoa Mirim.

A representação esquemática das geometrias e condições de contorno estão apresentadas na

Figura 19 e os dados necessários para cada etapa da modelagem estão contidos no item 2.2.1.

Figura 19 - Representação esquemática das informações do modelo.



Fonte: Autor.

2.2.1. Dados necessários

O período selecionado para simulação baseia-se na disponibilidade de dados, bem como informações sobre níveis de água no Banhado do Taim obtidas especialmente a partir de modelagem. A série de níveis de água foi obtida por meio de simulações com o modelo desenvolvido por (VILLANUEVA, 1997), que demonstrou manter boa performance na validação indireta para um período recente de dados (2003-2009) (DE PAULA, 2019) e, dessa forma, serviu como série de referência na ausência de dados observados durante vários períodos da série.

As principais informações que descrevem a área de estudo podem ser separadas conforme sua utilização em termos de modelagem hidrológica-hidrodinâmica. As informações básicas necessárias para a modelagem hidrológica correspondem às séries históricas de precipitação, evaporação e os volumes de água estimados retirados a partir da Lagoa Mangueira para irrigação das culturas de arroz.

Já os dados necessários para a componente hidrodinâmica contemplam as informações topográficas do relevo, condições de contorno, localização e detalhamento das estruturas hidráulicas e macrófitas emergentes que influenciam na hidrodinâmica local, modelos de

simulação desenvolvidos para a região e séries observadas. Um resumo das informações disponíveis encontra-se no Quadro 2.

Quadro 2 - Resumo dos dados disponíveis para a realização do estudo.

Tipo	Descrição	Aplicação	Referência
Climático	Séries históricas de precipitação e evaporação observadas (1960 - 2019)	Variáveis de entrada no modelo <u>hidrológico</u> da Lagoa Mangueira	Bule (2017) De Paula (2019)
Irrigação	Volume de água estimado retirado para irrigação a partir da Lagoa Mangueira	Variável de entrada no modelo <u>hidrológico</u> da Lagoa Mangueira	IRGA De Paula (2019)
MDE Taim	MDE de resolução 30 metros, obtido a partir da combinação de diferentes fontes de informação que contempla toda a região de estudo	Base para a propagação do escoamento da modelagem <u>hidrodinâmica</u>	Capítulo I dessa dissertação.
Níveis Lagoa Mirim	Série de níveis de água observados na Lagoa Mirim (1960 – 2019)	Condição de contorno de jusante no modelo <u>hidrodinâmico</u>	Bule (2017) De Paula (2019)
Estruturas	Detalhamento das estruturas hidráulicas da região	Estruturas inseridas no modelo <u>hidrodinâmico</u>	Bager e Fontoura (2013) Villanueva (1997)
Macrófitas	Localização das macrófitas emergentes	Determinação da rugosidade na área interna do BT – modelo <u>hidrodinâmico</u>	Da Rosa (2016)
Observações	Dados de nível de água observados em réguas linimétricas	Referência para calibração e validação do modelo <u>hidrodinâmico</u>	Tassi (2008)
Série simulada	Resultado de um modelo hidrológico e hidrodinâmico da região de estudo	Referência para calibração e validação do modelo <u>hidrodinâmico</u> na ausência de observações	Adaptado de Villanueva (1997)

Fonte: Autor.

2.2.2. Modelo digital de elevação (MDE)

Dados de diferentes fontes foram utilizados para produzir uma informação de relevo contínua e representativa da região de estudo. Os dados anteriormente disponíveis para a região contemplavam produtos independentes utilizados em estudos anteriores e informações de radar disponíveis online gratuitamente.

Primeiramente, utilizou-se dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* – USGS). As imagens SRTM com resolução de 30 metros obtidas dessa maneira não apresentam de maneira correta o relevo de fundo das áreas cobertas com água e macrófitas

emergentes, como o caso do BT e da Lagoa Mangueira. Por isso, o MDE SRTM foi utilizado para determinar as características do terreno da planície de inundação e áreas de entorno da região de interesse.

Para determinar o MDE de fundo da Lagoa Mangueira procedeu-se com a espacialização das informações batimétricas disponíveis, utilizando a interpolação *Topo to Raster* no software ArcGIS 10.2. Os dados utilizados nesse processo constam no estudo do IPH (1996).

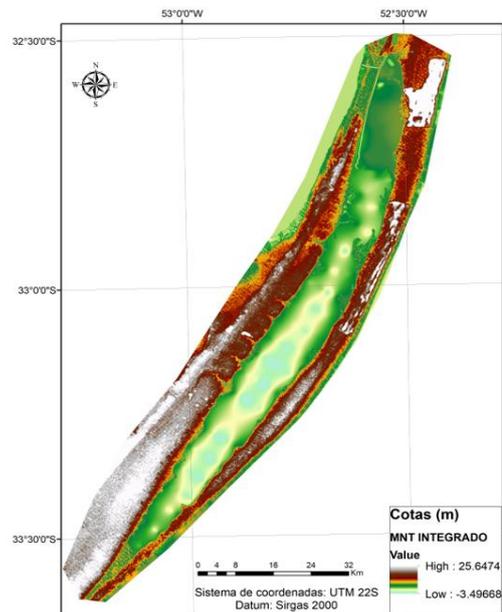
Após determinado o relevo de fundo, a informação foi compatibilizada no mesmo sistema de coordenadas (IBGE – SIRGAS 2000) das imagens SRTM, com as bordas interpoladas novamente para que a transição entre o dado batimétrico interpolado e a imagem SRTM fosse suavizada, representando parte da área de estudo.

Da mesma maneira, as informações dos transectos, batimetria das Lagoas internas ao Banhado e demais informações de relevo do BT foram utilizadas para determinar as cotas de fundo e obter uma superfície contínua do Banhado do Taim. Informações dos estudos de Paz (2003) e Tassi (2008), complementadas com cartas as cartas do exército Banhado do Taim, folha SI.22-V-A-VI-2 MI-3030/2 e a carta Farol Vergas, folha SI.22-V-B-IV-3 MI-3031/3 e cotas da BR-471 permitiram adicionar as feições inexistentes e produzir uma informação de relevo completa.

Assim, a partir da união e compatibilização das informações, utilizando o sistema de coordenadas IBGE SIRGAS 2000 foi possível produzir um MDE da região de estudo (Figura 20) com resolução de 30 metros.

O MDE define o interior da Lagoa Mangueira e do Banhado do Taim, bem como reproduz as áreas de entorno e as feições existentes no local, como a elevação da BR-471 e o canal de drenagem interno ao Banhado do Taim. Essas feições são importantes na modelagem hidrológica-hidrodinâmica e não são representadas nas informações topográficas dos estudos anteriores. Maiores informações sobre esse procedimento foram apresentadas no Artigo I da presente dissertação e a Figura 20 apresenta-se em tamanho maior no Apêndice A desse trabalho.

Figura 20 - MDE da região de estudo.



Fonte: Autor.

2.2.3. Módulo Mangueira

2.2.3.1. Representação geométrica

A Lagoa Mangueira foi representada no HEC-RAS 2D como uma área de acumulação, sendo necessário informar: delineamento do contorno da lagoa, relação cota x volume, condição inicial e, como condição de contorno, um hidrograma afluente à lagoa.

O delineamento do contorno utilizado é uma adaptação de um arquivo contendo o vetor de limite das Lagoas do estado do Rio Grande do Sul, disponível na base de dados da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler FEPAM (FEPAM, 2005). O vetor original contempla lagos e lagoas de todo o estado do Rio Grande do Sul, para isso, a seleção apenas da Lagoa Mangueira foi realizada.

A informação para definição da curva cota x volume foi obtida a partir do MDE de fundo da Lagoa Mangueira. Através da ferramenta de edição das áreas de acumulação no HEC-RAS 2D é possível extrair as informações do terreno e utilizá-las para definir as informações necessárias para a lagoa.

Para a condição de contorno, foi utilizada a série temporal de vazões resultantes de contribuição à Lagoa Mangueira. Como essa Lagoa não dispõe de informações de monitoramento de vazão, e o HEC-RAS 5.0 não contempla o módulo hidrológico, a alternativa encontrada foi a criação de um modelo hidrológico *off-line* para simular as vazões que deveriam ser consideradas como condição de contorno na Lagoa Mangueira, conforme a seguir descrito item 2.2.3.2.

Durante as simulações, as trocas de fluxo das áreas de acumulação com outras similares ou com áreas de fluxo 2D são calculadas utilizando *level pool routing method* como equacionamento do vertedor. Essa metodologia simplificada calcula a vazão de saída da área de armazenamento através dos dois vertedores inseridos na interface dado o hidrograma de entrada e um coeficiente que caracterize a descarga relacionado com o nível de água (IONESCU e GOGOASE, 2018). Na representação utilizada, a área de acumulação é a Lagoa Mangueira, que está conectada ao Banhado do Taim, uma área de fluxo 2D através da utilização de dois vertedores descontínuos descritos no item 2.2.5. Essa solução introduz simplicidade na representação de uma AC, ao não permitir avaliar a hidrodinâmica dentro da área da Lagoa Mangueira, mas acelera o processamento computacional, o que nesse estudo foi uma boa opção, já que o estudo não está voltado para o entendimento da hidrodinâmica na Lagoa Mangueira.

2.2.3.2. *Determinação da condição de contorno – Modelagem hidrológica off-line*

Seguindo o exemplo de outros trabalhos já desenvolvidos para a região, foi utilizado um modelo de balanço de volumes para a bacia de contribuição e da própria Lagoa Mangueira. O saldo de volume foi utilizado como informação de entrada no modelo HEC-RAS, ou seja, condição de contorno para a Lagoa Mangueira.

O balanço de volume foi calculado mensalmente, utilizando as séries de precipitação, evaporação, volumes de água retirados para irrigação a partir da Lagoa Mangueira, além de utilizar dados físicos como área da bacia de contribuição e área superficial da Lagoa Mangueira. A equação (2) descreve o modelo:

$$Q = (P * Am) - (E * Am * 0,9) + (P * Acc * C_e) - Vol_{irr} * 23,15 \quad (2)$$

Sendo Q a vazão mensal recebida ou retirada da Lagoa Mangueira (m^3s^{-1}), P a precipitação (mm), A_m a área média da Lagoa Mangueira (m^2), E a evaporação (mm), Acc a área de contribuição da Lagoa Mangueira (m^2), C_e o coeficiente de escoamento e Vol_{irr} o volume de água retirado para irrigação (hm^3).

O somatório da A_m e Acc totaliza a área de toda a bacia de contribuição determinada pelo delineamento utilizando o software ArcGIS 10.2 com base no MDE da região. O valor de área total encontrado foi 1602 km^2 , acordando com o valor utilizado por Villanueva (1997). A área superficial média definida foi de 801 km^2 para valores médios de nível de água de $3,56 \text{ m}$ (obtido através da simulação hidrodinâmica pelo modelo de Villanueva (1997)). Por consequência, o valor de Acc foi fixado em 801 km^2 da mesma maneira.

Como vantagem, esse modelo simplificado apresenta apenas um parâmetro (C_e) a ser ajustado durante o processo de calibração, já que se fixa em $0,9$ o coeficiente de tanque da multiplicação da segunda parcela da equação, como definido em estudos anteriores. Porém, a principal simplificação deste modelo está em considerar uma área média constante da superfície da Lagoa Mangueira e, por consequência, da bacia de contribuição. Uma análise de sensibilidade dessa área superficial foi realizada, a fim de identificar o comportamento da série de vazão mensal diante de uma possível incerteza na estimativa correta dessa superfície. Assim, a área superficial foi incrementada em 10% e 20% , e reduzida nas mesmas proporções. Os resultados produziram séries de vazão mensal com volume total $3,6\%$ e $7,3\%$ menores para os aumentos de 10% e 20% na área superficial, e séries de vazão com volume total $3,4\%$ e $6,5\%$ maiores para reduções de 10% e 20% na área superficial, respectivamente. Considerou-se, para fins da modelagem, que esses percentuais de incerteza inferiores a 8% não produzem prejuízos durante o estudo, portanto o procedimento foi considerado adequado.

Os valores de vazão afluentes à Lagoa Mangueira foram calculados a passo mensal. Através da simulação do modelo utilizando este passo mensal, houve grande instabilidade numérica, por isso, interpolou-se a série de vazões para valores diários para fins de suavização da representação dessa variável e redução dessas instabilidades do modelo obtidas na tentativa prévia. Não foram utilizados dados diários na simulação, pois, as séries utilizadas para fins de calibração (DE PAULA, 2019) e de validação (TASSI, 2008) utilizam base mensal, mantendo-se assim, similaridade das entradas.

Outros testes para representar a condição de contorno da Lagoa Mangueira foram realizados, porém os resultados não foram satisfatórios. Como exceção, em uma tentativa onde a série de níveis de água da Lagoa Mangueira foi utilizada diretamente como contorno na

interface Lagoa-Banhado, os resultados foram ótimos. No entanto, o limitante dessa opção é a própria disponibilidade de série de níveis da Lagoa Mangueira, já que não há valores observados para essa situação, apenas resultados de simulação de estudos prévios, o que retorna o modelo hidrológico *off-line* como a melhor opção para essa representação.

2.2.4. Módulo Taim

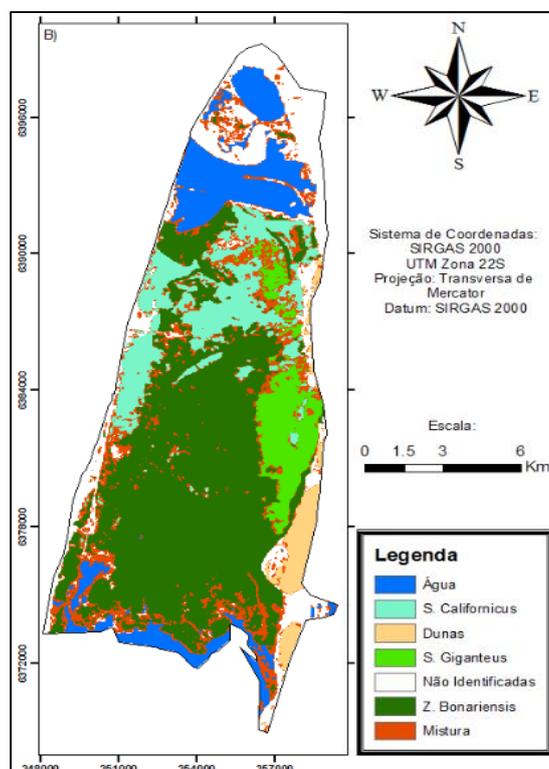
2.2.4.1. Dados geométricos

O Banhado do Taim foi representado por uma área de fluxo 2D no HEC-RAS com limites de formato da sua bacia de contribuição. Além da geometria do banhado, algumas características peculiares que influenciam na hidrodinâmica foram representadas: delimitações internas e externas de áreas de canal, lagoas e zonas de macrófitas.

As características da área interna do Banhado são a presença do canal que direciona o fluxo até as comportas localizadas ao norte, a existência de lagoas e extensas zonas de macrófitas. O delineamento do canal e das lagoas foi realizado digitalizando a informação do terreno no editor de geometrias do HEC-RAS com a ferramenta *2D Manning regions*, o que permite a atribuição de diferentes coeficientes de rugosidade de Manning para cada região determinada.

A localização das macrófitas emergentes foi determinada com base nos resultados obtidos por Da Rosa (2016), que descreve os padrões das principais macrófitas emergentes (*S. Californicus*, *S. Giganteus* e *Z. Bonariensis*) para condições de cheia, média e de seca (Figura 21). A condição hidrológica média foi escolhida por representar os padrões de ocorrência médios dessas vegetações.

Figura 21 - Padrão de vegetação para condições hidrológicas médias.

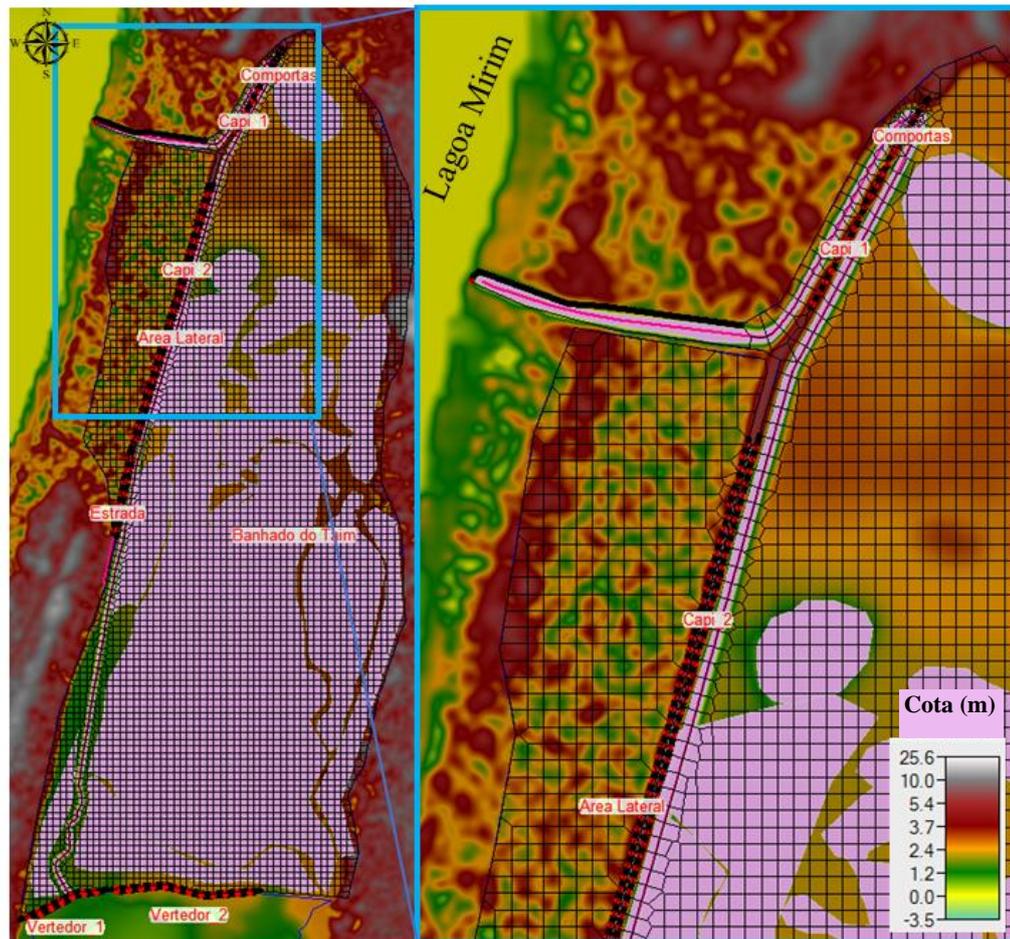


Fonte: Adaptado de Da Rosa (2016).

A geometria que contempla módulo Taim também engloba o prolongamento do canal interno do Banhado, que ao chegar nas comportas passa a se direcionar para oeste até a Lagoa Mirim. A Figura 22 mostra a representação esquemática do módulo Taim inserido no software HEC-RAS 5.0, bem como a posição das estruturas hidráulicas detalhadas no item 2.2.5. Em destaque, pode-se observar as regiões delimitadas como descrito acima, bem como a posição do canal que direciona o fluxo até a Lagoa Mirim.

A geometria do módulo Taim (Figura 22) possui 4924 células de área média 39424 m², com dimensões mínimas de 30x30 metros em locais de maior detalhamento como na região das comportas e máxima de 200 x 200 metros nas regiões comuns.

Figura 22 - Representação do módulo Taim e estruturas hidráulicas no HEC-RAS.

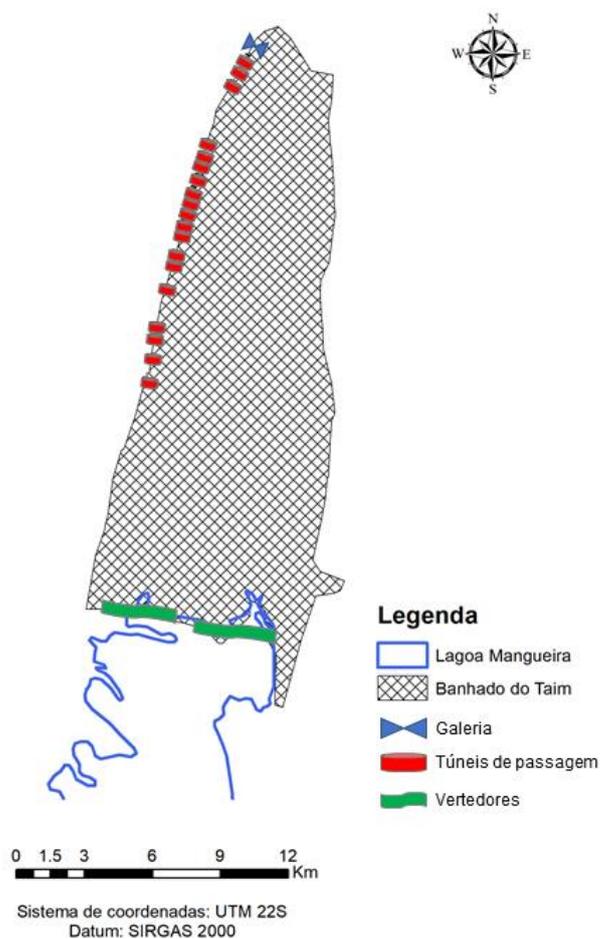


Fonte: Autor.

2.2.5. Estruturas hidráulicas

A utilização de estruturas hidráulicas na modelagem serve tanto para representar estruturas hidráulicas existentes como para realizar a conexão entre diferentes áreas representadas por geometrias (áreas de acumulação e área de fluxo 2D). Um total de 22 estruturas hidráulicas (Figura 23) foram incorporadas no modelo utilizando a ferramenta de conexão no editor de geometrias do HEC-RAS 5.0.7. Essas estruturas foram modeladas com suas especificações como localização, tamanho e forma geométrica.

Figura 23 - Localização das estruturas hidráulicas inseridas no modelo.



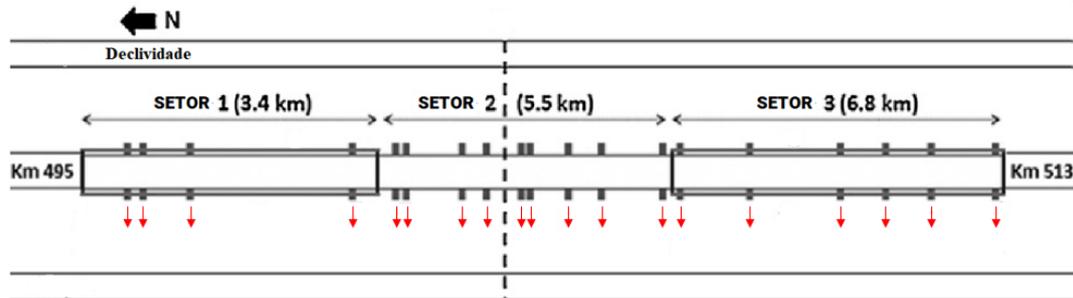
Fonte: Autor.

O sistema de proteção à fauna ao longo da BR-471 conta com gradeamento, redutores de velocidade, melhoria da sinalização da via e inserção de 19 túneis para passagem de animais ao longo de 16 quilômetros da BR-471. Embora o SPF não tenha desempenhado apropriadamente sua função (BAGER e FONTOURA, 2013), os chamados capivarodutos têm influência na hidrodinâmica da água, especialmente quando os níveis estão mais altos (BULÉ, 2017).

Considerando a existência desses túneis, 19 estruturas quadradas, de dimensões 1,2 m x 1,5 m, com cota de fundo 3,5 metros foram executados ao longo da feição que representa a estrada. Embora as estruturas físicas sejam tubos circulares, a representação de feições desse formato não é possível dentro do modelo com a utilização da regra de operação necessária (operação a partir de 1998). Por isso, foi utilizada uma área hidráulicamente equivalente. A cota de alguns túneis foi medida no local, optando-se por utilizar um valor médio para todos os

condutos. Para o posicionamento ao longo dos quilômetros, o estudo de Bager e Fontoura (2013) foi utilizado como base de distribuição, onde cada seta em vermelho representa um túnel (Figura 24). Como regra de operação, a abertura do vão representado só é realizada no ano de 1998, ano que o sistema passou a existir.

Figura 24 - Localização dos túneis para passagem de animais.



Fonte: Adaptado de Bager e Fontoura (2013).

Além dos túneis para passagem de animais, as estruturas hidráulicas para regular o fluxo de água entre a Lagoa Mirim e o Banhado do Taim também foram adicionadas. A estrutura (Figura 25) é formada por 2 conjuntos de 8 galerias, cada um contendo oito vãos que passam por baixo da BR-471 no sentido Lagoa Nicola – Lagoa Mirim, medindo 1,524 x 1,524 m de seção transversal, separadas por colunas de 0,20 m de espessura sendo as cotas de fundo -2,53 m e -0,93 m IBGE (VILLANUEVA, 1997).

Figura 25 - Fotos aéreas das comportas ao Norte do BT (a - Lagoa Mirim; b - Estrada; c - BT).

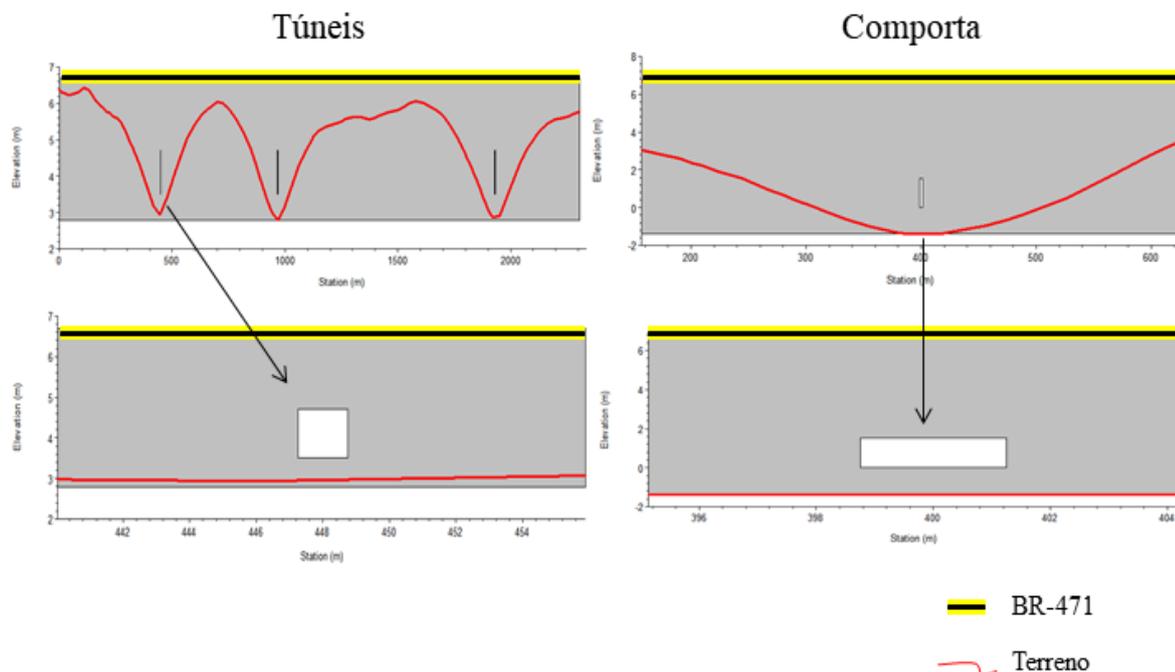


Fonte: Autor.

Para fins de representação, um vão único de dimensões 1,52 m x 2,5 m totalizando 3,8 m² foi executado. O valor representa cerca de 10% da área máxima possível, já que a capacidade de descarga das comportas é muito reduzida devido a danificações no sistema e fechamentos realizados através de tapumes, conforme descrito por Villanueva (1997), e observada em campo

em 2019. Por este motivo, reduções na área de fluxo foram adotadas para melhor representar os fenômenos. A Figura 26 mostra como ficaram as estruturas dentro do modelo.

Figura 26 - Representação dos túneis e das comportas dentro do modelo.

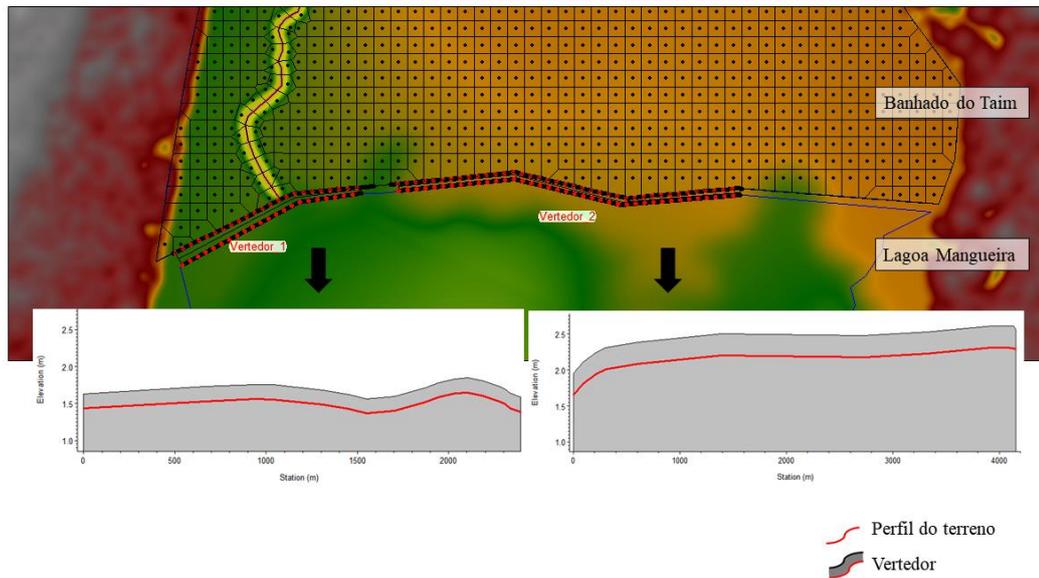


Fonte: Autor.

Apesar de não existir estrutura física na interface dos sistemas Lagoa Mangueira e Banhado do Taim, a conexão entre a área de acumulação e a área de fluxo 2D deve ser representada no modelo por estruturas hidráulicas representativas.

Após diversas tentativas, que incluíram o uso de canal 1D, relevo com diferentes rugosidades, inserção de apenas condição de contorno de nível diretamente ligada a área de fluxo 2D (descrito no item 2.2.3.2) entre outras, sem resultados satisfatórios, verificou-se que os melhores resultados para representar a interface entre a Lagoa Mangueira e o Banhado do Taim seria obtida com a introdução de vertedores. Logo, dois vertedores descontínuos (Figura 27) com características diferentes foram adicionados, a fim de representar as regiões onde ocorrem essa conexão de forma mais acentuada.

Figura 27 - Representação esquemática dos vertedores da interface Banhado - Lagoa.



Fonte: Autor.

Assim, a região Oeste, onde ocorre uma conexão entre a Lagoa Mangueira e o Banhado do Taim por meio de um canal preferencial, foi representada por um segmento de vertedor (Vertedor 1) com aproximadamente 2,5 km. Na região central da interface entre o Banhado do Taim e a Lagoa Mangueira há um extenso estande de macrófitas emergentes, que se estende por cerca de 4,2 km. Essa conexão também foi representada por meio de um segmento de vertedor (Vertedor 2).

Essa segmentação permitiu a introdução de características distintas para os dois trechos de vertedor (Vertedor 1 e Vertedor 2). O trecho leste de interface, localizado em cotas mais elevadas junto a um cordão de dunas não recebeu estrutura hidráulica, por ser uma região com baixa conexão entre o Banhado do Taim e a Lagoa Mangueira.

2.2.6. Condições de contorno

O presente estudo utilizou três tipos de condições de contorno, sendo uma delas necessária à simulação da Lagoa Mangueira, representada como uma área de acumulação, sendo a condição de contorno um hidrograma lateral e duas necessárias à modelagem do Banhado do Taim, uma área de fluxo 2D, sendo a precipitação direta e um cotograma, conforme a seguir descrito.

A Lagoa Mangueira é a condição de contorno de montante ao BT. Este corpo hídrico é um dos maiores responsáveis pelas variações de nível observado no Banhado do Taim (VILLANUEVA, 1997), sendo assim, é de grande importância a correta reprodução desta condição ao ajuste final do modelo. Para representar as contribuições oriundas da Lagoa Mangueira, um hidrograma de contribuição (hidrograma lateral) foi inserido como uma condição de contorno interna à Lagoa Mangueira.

A série de vazão diária foi determinada conforme descrito no item 2.2.3.2. A equação de descarga nos vertedores da interface entre o Banhado do Taim e Lagoa Mirim permite avaliar as trocas de vazões da área de fluxo 2D para a área de acumulação, podendo representar inversões de escoamento (do Banhado do Taim para a Lagoa Mirim).

Na representação das condições de contorno relacionadas ao Banhado do Taim foram utilizadas uma série de precipitação, para representar o saldo do balanço hidrológico vertical que ocorre na região do Banhado do Taim (precipitação direta - evapotranspiração) e uma condição de contorno de jusante, para representar os efeitos hidrodinâmicos da Lagoa Mirim nas condições de escoamento.

A série de precipitação adicionada como uma condição de contorno engloba apenas o saldo do volume de água que incide diretamente sobre a região do Banhado do Taim, pois não é possível realizar uma simulação chuva-vazão na versão utilizada do software HEC-RAS. Assim, o artifício utilizado foi informar uma série de precipitação diária, que indica o saldo resultante do processo de balanço hidrológico vertical de subtração da evapotranspiração e precipitação mensais, divididos igualmente pelo número de dias do mês, a fim de utilizar uma série interpolada e reduzir as instabilidades numéricas, conforme realizado para o módulo Mangueira (item 2.2.3.2). Como saldos negativos não são contabilizados, valores negativos foram informados como saldo nulo para fins de indicação da série de precipitação. Uma porcentagem de 11% da série de saldo apresentou valores negativos, porém os valores utilizados de evaporação no estudo podem estar superestimados (DE CAMARGO, A. e DE CAMARGO, M., 2000) e, ainda, a série de saldo só representa a parcela da precipitação que incide diretamente sobre o Banhado do Taim, para a região da Lagoa Mangueira, essa simplificação não foi realizada.

O cotograma representativo da Lagoa Mirim, contorno de jusante, foi adicionado de maneira direta no final do alinhamento do canal que escoo do Banhado sentido Lagoa Mirim. A última célula do alinhamento recebeu o cotograma observado da Lagoa Mirim somado de

0,33 metros para fins de compatibilização dos sistemas de coordenadas, conforme descrito em Villanueva (1997).

2.3. CALIBRAÇÃO

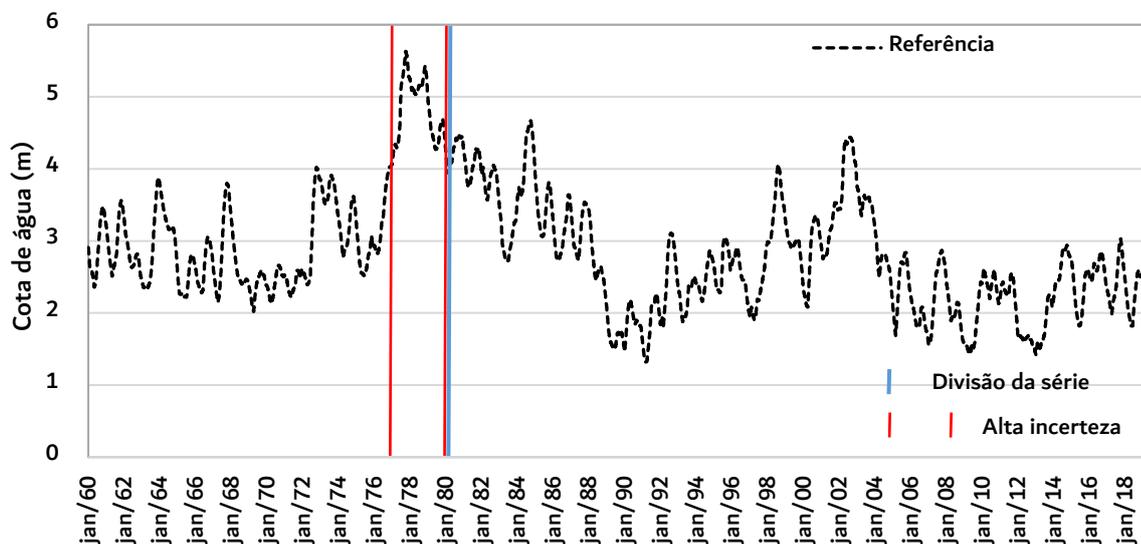
2.3.1. Calibração dos parâmetros e condições iniciais no HEC-RAS

Os resultados da definição dos parâmetros baseiam-se na escolha do melhor resultado produzido em termos de nível de água simulado em um ponto específico do Banhado, tomando como referência a comparação entre os níveis de água simulados e o de controle (série histórica). O modelo desenvolvido no HEC-RAS para o Banhado do Taim foi calibrado utilizando os resultados obtidos por De Paula (2019), onde foi utilizado o modelo de Villanueva (1997) para simular uma série de nível de água de 1960 a 2019, que apresenta resultados confiáveis garantidos pelas validações em estudos posteriores (DE PAULA, 2019; TASSI, 2008). A série completa utilizada como referência contempla resultados de 1960 até 2019, porém, ela foi separada em dois períodos devido a existência de uma faixa de incerteza grande em um período de cheia de 1977 a 1980. A série referência tem alta incerteza desse período, uma vez que o modelo utilizado tem limitação de representação da estrada, não permitindo que a mesma atue como vertedor. Para calibração, a série então foi segmentada, resultando em séries referência de 1960 a 2019 e 1980 a 2019 como na Figura 28.

Durante a calibração, conforme descrito em detalhe nos itens a seguir, primeiramente foi ajustado o coeficiente do modelo *off-line* da Lagoa Mangueira. Posteriormente, os ajustes das condições hidrodinâmicas iniciariam com a determinação dos tamanhos das células do grid que compõe a área de fluxo 2D do Banhado do Taim, buscando um balanço de performance e resultado, já que o tamanho de cada célula determina boa parte da duração total da simulação.

As condições iniciais da Lagoa Mangueira (área de acumulação) e do Banhado do Taim (área de fluxo 2D), além do ajuste dos coeficientes relacionados às estruturas hidráulicas (coeficientes de descarga do vertedor na interface Banhado do Taim – Lagoa Mangueira e coeficientes de descarga das comportas no exutório do Banhado) foram calibradas dentro de faixas de valores factíveis. Adicionalmente, os coeficientes de rugosidade da geometria que representa a superfície interna do Banhado do Taim também foram ajustados, com destaque para as regiões com densos estandes de macrófitas, lagoas, canal de drenagem e dunas, que sofreram variações de acordo com referências para regiões similares.

Figura 28 - Série utilizada como referência na calibração.



Fonte: Autor.

O processo de ajuste dos parâmetros foi realizado manualmente, e os parâmetros foram ajustados um a um, com a observância na melhoria do resultado da modelagem. Foi definido um período de aquecimento para o modelo de 6 meses para melhorar as instabilidades iniciais obtidas nas primeiras simulações. Os itens a seguir descrevem de maneira mais detalhada esses procedimentos.

2.3.1.1. Calibração do modelo hidrológico off-line da Lagoa Mangueira

O coeficiente de escoamento (C_e) representa a quantidade de água que gera escoamento pela bacia em eventos chuvosos, e não possui um valor fixo relacionados à somente uma variável, mas pode variar em função da intensidade, distribuição espacial e temporal da precipitação, condições de umidade do solo e retenções (TUCCI, 2000). No caso deste estudo, o coeficiente de escoamento permite calcular qual o volume de água acrescido a Lagoa Mangueira devido à precipitação que ocorre na sua área de contribuição e a determinação de um valor médio permite analisar cenários médios de balanço hídrico a longo prazo.

O parâmetro C_e foi ajustado previamente a qualquer intervenção nos valores dos demais coeficientes da simulação hidrodinâmica. Inicialmente, um coeficiente de 0,25 foi definido para

teste, conforme utilizado em Villanueva (1997), porém os volumes de água encontrados na Lagoa Mangueira ficaram abaixo da média. Então valores de 0,30, 0,35, 0,40 e 0,50 foram testados por representarem valores factíveis considerando as características da região, optando-se por utilizar o valor que produziu volumes de troca de água entre a Lagoa Mangueira e o BT coerentes com os valores médios e esperados para o local.

2.3.1.2. *Dimensões do grid*

O Banhado do Taim foi representado por uma área de fluxo 2D no HEC-RAS. Essas são regiões nas quais há escoamento, sendo aplicado o método dos volumes finitos para a resolução do sistema de equações, onde em vez da utilização de uma curva para definir as características da área, como nas áreas de acumulação, uma malha bidimensional é criada cobrindo todo o limite da área de fluxo 2D. A malha é composta por células irregulares de 3 a 8 lados de tamanhos de escolha do usuário (USACE (a), 2016). Através da inserção de linhas de interrupção é possível representar as particularidades do sistema com tamanhos reduzidos de células nos locais onde há maior interesse no entendimento da hidrodinâmica.

Inicialmente, o Banhado do Taim foi representado por uma malha de mesma resolução do MDE (30 metros), sem a utilização de linhas de interrupção, levando a diversas dificuldades em todas as tentativas de simulações e tempos computacionais elevados. A partir disso, foi definida uma malha de 100 metros x 100 metros para toda a região interna do Banhado, com realização de um melhor detalhamento junto ao canal paralelo à BR-471 e região das comportas, onde foram utilizadas células que variavam de 30 a 50 metros. Ao longo do desenvolvimento do estudo, verificou-se que se o tamanho de cada célula fosse dobrado (200 m x 200 m) e os pontos cruciais mantidos com resolução de 30 a 50 metros, os resultados não eram alterados, e o tempo de simulação era significativamente reduzido.

2.3.1.3. *Condição inicial da Lagoa Mangueira e Banhado do Taim*

A definição das condições de nível de água inicial na Lagoa Mangueira e no Banhado do Taim são informações que indicam a quantidade de água existente na área de acumulação e na área de fluxo 2D no momento do primeiro passo de tempo da simulação. A partir dessas informações, as variações que ocorrem ao longo da simulação podem ter efeitos diferentes, por isso é importante ajustar um valor coerente para o sistema.

Testes com lâminas de água variadas na área de acumulação da Lagoa Mangueira e na área de fluxo 2D do Banhado do Taim foram realizados, baseando-se na série história utilizada como referência. Entretanto, foi possível verificar que os resultados gerais da simulação de longo prazo se mantêm semelhantes para todo o período de simulação, sem diferenças significativas em função das incertezas das condições iniciais, exceto para os primeiros anos de simulação, confirmando o efeito de memória do Banhado do Taim descrito por Bulé (2017).

Ressalta-se, ainda, que o valor calibrado para as condições iniciais do Banhado do Taim e da Lagoa Mangueira são referentes a simulação com início em janeiro de 1960, qualquer alteração de data inicial requer a utilização de um período de aquecimento ou nova calibração para o mês/ano desejado.

2.3.1.4. *Ajuste dos parâmetros das estruturas hidráulicas*

As equações que definem a vazão descarregada pelo vertedor ou através de galerias surgem da equação de conservação de massa, com derivações empíricas bastante estáveis. O HEC-RAS requer que o usuário defina o coeficiente do vertedor (C), sendo C um parâmetro não adimensional que inclui o coeficiente de descarga do vertedor, aceleração da gravidade e outras constantes baseadas nas propriedades geométricas do vertedor (USACE (b), 2016). Além disso, o coeficiente de descarga das comportas (Cd), valor adimensional, também utilizado para modular a vazão participa da regulação das trocas de água pelos orifícios definidos na modelagem (OSKUYI e SALMASI, 2012).

Cada variação dos coeficientes C dos vertedores localizados na interface BT e Lagoa Mangueira reflete na maior ou menor passagem de volume da Lagoa para o Banhado, e as alterações de Cd promovem aumento ou redução da transferência de água através da comportas ao norte do BT. Como recomendação do software, a faixa de valores para o Cd é de 0,5 a 0,7 (USACE, 2016). A Tabela 1 reúne as faixas de valores testados para cada estrutura:

Tabela 1 - Faixa de valores testados para os coeficientes de cada estrutura.

Estrutura	Coefficiente	Faixa de valores testados
Comportas	Cd	0,1 – 0,7
Vertedor 1	C	0,1 – 1,0
Vertedor 1	C	0,1 – 1,0

Fonte: Autor.

Além dos parâmetros calibrados, a utilização de um parâmetro fixo para a descarga de orifícios dos capivarodutos foi realizada com base na literatura. Sabe-se que esses túneis para passagem de animais atuam como orifícios de saída de água do sistema em função do nível de água exercido na região. De acordo com Porto (2006), os coeficientes de descarga para essas estruturas variam de 0,5 a 0,7 nas condições do sistema. Através disso, definiu-se o valor de 0,5 para o coeficiente de descarga dos capivarodutos, uma vez que esse é apresentado como padrão do programa e representa um valor factível para esse tipo de estrutura.

2.3.1.5. *Coefficiente de rugosidade de Manning*

Foi necessário ajustar o coeficiente de rugosidade de Manning para as diferentes feições existentes na região interior do Banhado do Taim, o que inclui o canal, áreas ocupadas por macrófitas, as lagoas e demais zonas normalmente ocupadas por pastagens, arbustos de pequeno porte e dunas, e correspondem às áreas que normalmente não estão saturadas.

Para o canal lateral paralelo à BR-471, a rugosidade foi ajustada considerando valores de referência da literatura (PORTO, 2006), para canais com vegetação, com variação entre 0,025 e 0,040. Durante o processo de calibração a rugosidade do canal foi mantida constante, ao longo de toda a sua extensão para fins de representação.

Para as regiões com macrófitas, diferentes valores de rugosidade foram avaliados, considerando uma faixa possível de valores, que variou entre 0,05 e 0,315, conforme resultados de diferentes estudos envolvendo vazão com ambientes vegetados (DE DONCKER et al., 2009; FATHI-MOGHADAM e DRIKVANDI, 2012; SANDERCOCK e HOOKE, 2010; SHIELDS, COULTON e NEPF, 2017; WU, SHEN e CHOU, 1999).

Para as lagoas internas Nicola e Jacaré, a rugosidade foi ajustada considerando valores de referência obtidos em estimativas para corpos hídricos no estudo de Woldemichael et al. (2010). Durante o processo de calibração, as variações consideradas entre 0,010 e 0,040 não produziram diferenças significativas nos resultados, por isso, o valor do coeficiente de Manning atribuído para as Lagoas Nicola e Jacaré foi arbitrário.

Na região leste do Banhado do Taim, onde predominam as dunas, os valores do coeficiente de rugosidade testados variaram de 0,012 a 0,035, seguindo as recomendações para ambientes de planície de inundação com características arenosas do USGS (ARCEMENT JR e SCHNEIDER, 1984).

Para as demais regiões internas do Banhado do Taim, que não se enquadraram nas feições previamente descritas, foi mantido o valor padrão do *software*, que é um valor factível considerando os outros valores.

A Tabela 2 apresenta uma síntese da faixa de valores de rugosidade testada durante o processo de calibração, para cada feição que compõe a geometria da área interna do Banhado do Taim.

Tabela 2 - Coeficientes de Manning utilizados como referência para calibração nas diferentes feições da área interna do Banhado do Taim.

Feição	Faixa de valores de referência	Referência
Canal interno	0,025 – 0,033	Porto (2006)
Dunas	0,012 – 0,035	Arcement Jr e Schneider (1984)
Lagoas	0,010 – 0,040	Woldemichael et al. (2010)
<i>S. Californicus</i>	0,05 – 0,350	*
<i>S. Giganteus</i>	0,05 – 0,350	*
<i>Z. Bonariensis</i>	0,05 – 0,350	*
Demais regiões	0,06	Padrão do <i>software</i>

*(DE DONCKER et al., 2009; FATHI-MOGHADAM e DRIKVANDI, 2012; SANDERCOCK e HOOKE, 2010; SHIELDS, COULTON e NEPF, 2017; WU, SHEN e CHOU, 1999).

Fonte: Autor.

2.3.1.6. Medidas de desempenho

A avaliação do desempenho das simulações foi realizada utilizando-se as recomendações de Moriasi et al. (2007) para determinação de coeficiente *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE), *Percent bias* (PBIAS) e *RMSE-observations standard deviation ratio* (RSR), além de análise gráfica comparativa de observação e simulação.

Para ser classificado com “muito bom”, o modelo deve apresentar NSE superior a 0,75, PBIAS entre $\pm 10\%$ e RSR entre 0 e 0,50. Desempenho classificado como “bom” apresenta NSE entre 0,65 e 0,75, PBIAS entre $\pm 15\%$ e RSR entre 0,50 e 0,60. Resultados satisfatórios apresentam coeficientes NSE entre 0,50 e 0,65, PBIAS entre $\pm 25\%$ e RSR entre 0,60 e 0,70. Para valores de NSE inferiores 0,50, PBIAS maior que 25% e menor que -25% e RSR maior que 0,70, os resultados são insatisfatórios.

2.3.2. Definições para a modelagem em regime não permanente

O HEC-RAS 5.0.7 é capaz de resolver tanto as equações completas Saint Venant (*full 2D Saint Venant equations*), quanto a versão simplificada (*diffusion wave equations*) para propagação do escoamento (USACE, 2016), deixando a cargo do usuário definir o conjunto de equações que melhor se adapta ao seu estudo.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 p g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + pf + \frac{\partial}{\rho \partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\rho \partial y} (h \tau_{xy}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 q g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + qf + \frac{\partial}{\rho \partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\rho \partial x} (h \tau_{xy}) \quad (5)$$

onde ζ é a elevação da superfície (m), p e q são vazões específicas nas direções x e y , respectivamente, ($m^2 s^{-1}$), h é a lâmina de água (m), n é o coeficiente de rugosidade de Manning, g é a aceleração da gravidade (ms^{-2}), f é Coriolis (s^{-1}), ρ é a densidade da água (kgm^{-3}) e τ_{xx} , τ_{yy} e τ_{xy} são as componentes cisalhantes. Ambos equacionamentos partem da equação da continuidade (3), porém quando a versão de equacionamento simplificada é selecionada, os termos de inércia das equações de momento (4 e 5) são consideradas zero.

Em um estágio inicial, foram realizadas simulações com as duas abordagens. Apesar do tempo de simulação ser reduzido a cerca de 65% do total utilizando a versão simplificada, a utilização do equacionamento completo produz resultados melhores, especialmente na simulação dos períodos onde há efeitos preponderantes de jusante, o que era esperado. Assim, foi definida a utilização do equacionamento completo de *Saint Venant*.

O intervalo de tempo das simulações também foi investigado em um estágio inicial da pesquisa. Com o objetivo de assegurar a estabilidade numérica, primeiramente foram testados diferentes passos de tempo para a realização da simulação. Assim, simulações iniciais foram realizadas com intervalo de tempo de 20 segundos, buscando estabilidade numérica, porém o tempo de processamento era muito longo e muitas vezes o modelo era interrompido por erros desconhecidos.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, atualizações do software HEC-RAS foram liberadas, incluindo uma rotina que incorpora ao programa a opção de utilização de um passo de tempo variável baseado na condição de Courant-Friedrichs-Lewy definida pela equação (6).

$$Cr = \frac{c\Delta t}{\Delta x} = \frac{\sqrt{gh}\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (6)$$

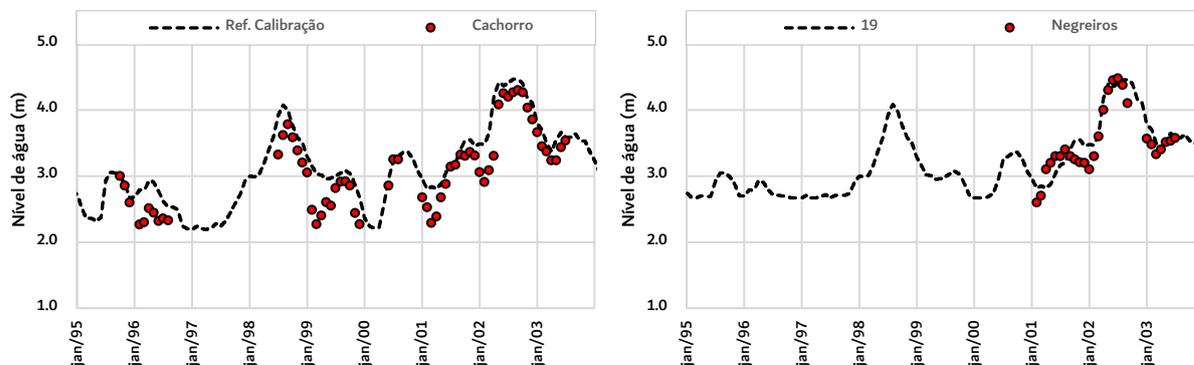
Sendo: Cr é o número de Courant, c é a celeridade da onda ($m.s^{-1}$), Δt é o passo de tempo (s), Δx é o tamanho da célula (m), g é a aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$), e h é a altura da lâmina de água (m).

O passo de tempo variável permitiu definir um passo de tempo inicial (20 minutos) para o começo da simulação, que é automaticamente aumentado ou diminuído pelo modelo, de forma a manter o resultado da equação (6) dentro do valor desejável para o número de Courant. A faixa de variação de valores de Cr pode ser definida pelo usuário e, durante as simulações, foram testadas variações começando em 0,9, seguindo resultados encontrados em simulações hidrodinâmicas utilizando HEC-RAS (PENG e LIU, 2019); após diversas tentativas, a variação foi fixada entre 0,99 e 1,1.

2.4. VALIDAÇÃO

Para o processo de validação, foram utilizadas as observações de duas réguas instaladas nas regiões internas no Banhado do Taim, e foram monitoradas em alguns meses nos períodos compreendidos entre 1995-1996 e 1998-2003. A régua do Cachorro está localizada na porção média Oeste do Banhado, enquanto e a régua Negreiros, na porção Leste. A Figura 29, mostra além das observações, obtidas em Tassi (2008), as séries de níveis de água simulados utilizando o modelo de Villanueva (1997), obtidas em De Paula, (2019), com os indicativos do número da célula do modelo, que correspondem à posição das réguas na Figura 17.

Figura 29 - Observações das réguas Cachorro e Negreiros juntamente com o resultado da simulação utilizada como referência.



Fonte: Adaptado de Tassi (2008).

Da mesma maneira que para a calibração, a avaliação da validação do modelo foi realizada utilizando-se as recomendações de Moriasi et al. (2007). Empregou-se a análise gráfica comparativa e dos coeficientes *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE), *Percent bias* (PBIAS) e *RMSE-observations standard deviation ratio* (RSR) como indicadores de qualidade da validação.

2.5. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Após a calibração e validação do modelo HEC-RAS 2D na simulação dos níveis d'água do Banhado do Taim, foi explorada a capacidade do modelo em simular diferentes situações de manejo e gerenciamento do local, com a finalidade de demonstrar a aplicabilidade do modelo ajustado à área de estudo.

Para isso, foram definidos e simulados três diferentes cenários, que refletem alterações nos padrões de retiradas de água para irrigação e operação das comportas, conforme a seguir descritos. Os resultados destes cenários foram comparados com o cenário de referência, que corresponde ao resultado da simulação calibrada e validada como descrita nos itens anteriores, e que demonstra o resultado de ocorrência considerado real para o Banhado do Taim.

Cenário I: Influência da regra de operação das comportas na hidrodinâmica do Banhado do Taim

Este cenário objetivou promover o entendimento de como o fechamento total das comportas impacta os níveis de água do Banhado do Taim. Para isso, foi adicionada uma regra de operação das comportas no modelo HEC-RAS que a mantêm as comportas fechadas durante todo o período simulado. Neste cenário, à exceção do fechamento das comportas, todas as parametrizações e configurações do modelo, além dos dados de entrada foram os mesmos obtidos e usados no processo de calibração.

Cenário II: Influência da redução da irrigação na hidrodinâmica do Banhado do Taim

As estimativas de volume de água retirados para irrigação a partir da Lagoa Mangueira são calculados a partir de quantidade de área plantada e taxa aplicação para irrigação (BULÉ, 2017). Para entender como a melhoria nas técnicas de plantio – com reduções nas taxas de aplicação de água por hectare – impacta na hidrodinâmica do Banhado do Taim, este cenário considerou uma redução de 50% na taxa de aplicação de água para a irrigação, tomando como referência o valor utilizado em estudo anteriores (de $21.s^{-1}ha^{-1}$), e também considerado durante o processo de calibração e validação.

Cenário III: Influência da eliminação das retiradas de água para irrigação na hidrodinâmica do Banhado do Taim

Neste cenário, as retiradas de água a partir da Lagoa Mangueira para fins de irrigação foram anuladas, permitindo avaliar um cenário hipotético, onde a orizicultura irrigada seria substituída por outra atividade que não demandasse água deste sistema.

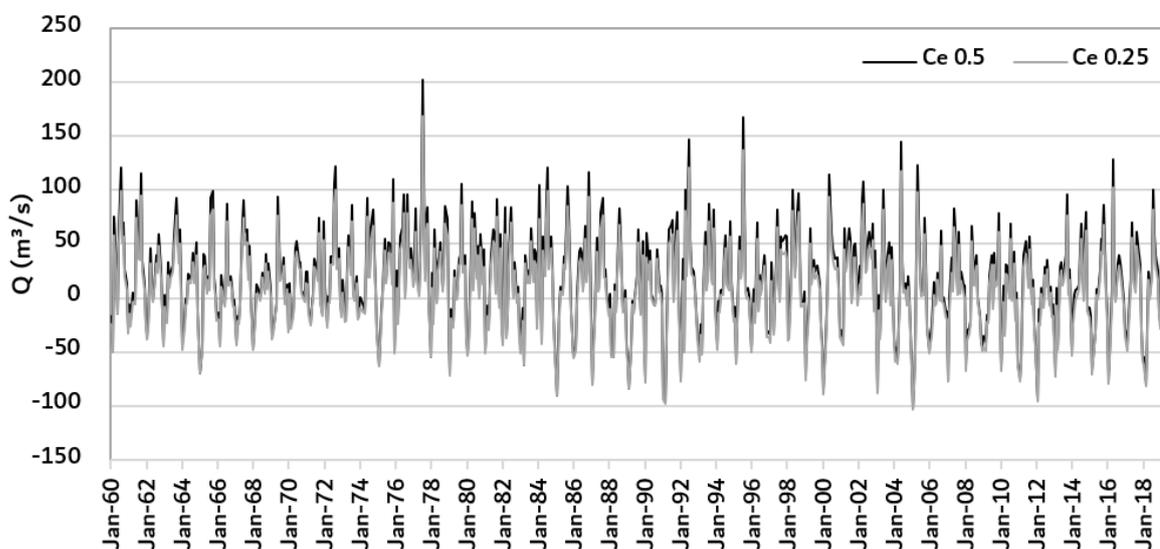
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CALIBRAÇÃO

3.1.1. Condição de contorno

A condição de contorno calibrada baseia-se na determinação do coeficiente de escoamento no modelo hidrológico da Lagoa Mangueira. Conforme apresentado na metodologia, por meio de uma série de simulações *off-line* foi realizado o ajustamento do parâmetro C_e da equação (2). Para isso, os valores de C_e foram variados e as séries de vazão resultantes era utilizadas como entrada na modelagem com o HEC-RAS. A Figura 30 apresenta duas séries de vazão afluente à Lagoa Mangueira resultante desse processo para dois valores (mínimo e máximo) de C_e testados.

Figura 30 - Hidrogramas laterais para diferentes valores de Coeficiente de escoamento.



Fonte: Autor.

Após as primeiras simulações consideradas bem-sucedidas utilizando o HEC-RAS durante a fase de calibração, ou seja, simulações que foram completadas para todo o período e apresentaram coeficiente NSE maiores que zero, foi possível determinar os coeficientes de

performance analisados para determinação do C_e , conforme apresentados na Tabela 3, que mostra os resultados para os dois valores extremos do parâmetro.

Tabela 3 – Funções objetivo para análise de C_e .

C_e	0,25	0,5
RSR	0,94	0,61
PBIAS	-13,90%	-7,50%
NSE	0,11	0,45

Fonte: Autor.

Por meio desse resultado, verifica-se que o valor determinado para o coeficiente C_e é 0,5, o que indica que 50% da precipitação incidente na área de contribuição da Lagoa Mangueira produz escoamento superficial. Para áreas naturais, o valor do coeficiente de escoamento usualmente encontra-se em faixas de valores ligeiramente menores (SRIWONGSITANON e TAESOMBAT, 2011), porém, por se tratar de uma área de contribuição em planície de inundação às margens da lagoa, com grande influência desse corpo hídrico, as condições de umidade podem alterar esse coeficiente (BASTIAANSEN e CHANDRAPALA, 2003). Além disso, a manutenção de lâminas de água permanente nas lavouras de arroz durante alguns meses do ano acaba por proporcionar condições para o aumento do valor desse coeficiente.

A determinação dos parâmetros detalhados nos próximos itens baseou-se na fixação das três condições de contorno definidas (Saldo de precipitação no Taim, cotograma Lagoa Mirim e hidrograma da Lagoa Mangueira) e alterações em cada um dos parâmetros.

3.1.2. Dimensões da malha

Inicialmente, pretendia-se utilizar a melhor discretização possível com base na resolução de 30 m do MDE. A utilização de uma malha de dimensões 30 m x 30 m demandava muito tempo computacional (cerca de 180 horas para 60 anos de anos) e ocorria o cessamento das simulações de forma inesperada. Como o ajustamento dos parâmetros foi feito de maneira manual e com variação individual de cada parâmetro, havia necessidade de simular diversas vezes o modelo, demandando muito tempo e esforço computacional, por isso, a identificação da mínima resolução necessária para manter a qualidade dos resultados foi imprescindível.

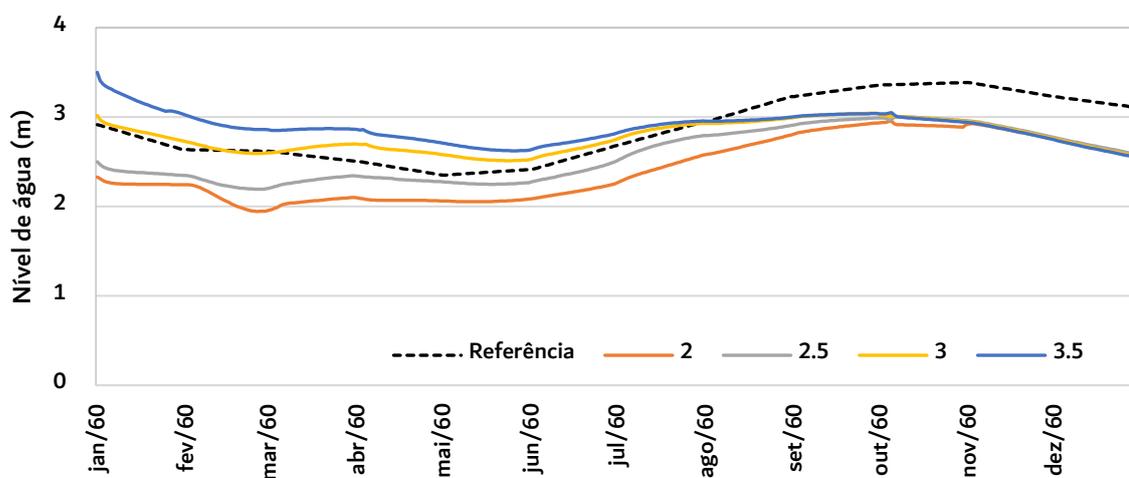
Como tentativa, definiu-se uma malha de 100 metros x 100 metros, o que reduziu o tempo de processamento em cerca de 60%, e os resultados permaneceram similares em termos de nível de água ao longo do tempo em pontos específicos do Banhado do Taim, utilizados como controle.

Mesmo com a redução da resolução, a simulação de todo o período requeria cerca de 75 horas. Na tentativa de encontrar um tamanho de célula suficientemente grande para reduzir o tempo computacional sem prejudicar os resultados, o tamanho de final de cada célula foi definido como 200 m x 200 m, com maior detalhamento de pontos cruciais (30 a 50 metros). Foi possível verificar que a redução da resolução da malha não impactou nos resultados em termos de volume e propagação do escoamento.

3.1.3. Condição inicial da Lagoa Mangueira e do Banhado do Taim

Diversas tentativas, com diferentes condições iniciais, foram executadas para se determinar qual a melhor condição de nível inicial para o sistema. A Figura 31 mostra em detalhe o primeiro ano simulado com as mesmos parâmetros, alterando apenas a condição inicial. Variações de 2 metros, 2,5 metros, 3 metros e 3,5 metros de nível de água na área de acumulação e na área de fluxo 2D foram utilizadas com base no resultado esperado, já que a série utilizada como referência na calibração para as simulações possui como resultado 2,91 m para janeiro de 1960.

Figura 31 - Nível de água simulada para diferentes condições de níveis iniciais.



Fonte: Autor.

Através da Figura 31, é possível perceber que o efeito da condição inicial cessa por volta do 11º mês da simulação, comprovando os efeitos de memória do sistema descritos por Bulé (2017). Através dessa análise, define-se como 3,0 metros a condição inicial e ressalta-se que quando o modelo for utilizado para diferentes períodos iniciais, deve-se atentar para essa variável de memória do sistema.

3.1.4. Ajuste dos parâmetros das estruturas hidráulicas

O ajustamento dos parâmetros das estruturas hidráulicas foi realizado concomitantemente para todas as estruturas, já que as alterações causadas pela variação do parâmetro de uma estrutura podem ser balanceadas pelas alterações em outro. Os coeficientes dos vertedores da interface (C) e o coeficiente de descarga das comportas (Cd) foram variados de maneira a buscar o melhor resultado de calibração e os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros atribuídos para as estruturas hidráulicas.

Estrutura	Coefficiente	Valor atribuído
Comportas	Cd	0,2
Vertedor 1	C	0,8
Vertedor 2	C	0,1

Fonte: Autor.

O valor atribuído para o coeficiente Cd das comportas está abaixo da faixa de valores recomendados pelo *software*. Devido ao mau funcionamento e falta de operação das comportas, combinado com a presença de vegetação, a capacidade de fluxo através das comportas é reduzida, e isso manifestou-se no valor do Cd ajustado.

Foram utilizados valores diferenciados para o ajustamento dos coeficientes de descarga dos dois vertedores na interface entre a Lagoa Mangueira e o Banhado do Taim, justamente para retratar as diferentes características do local onde há inserção do vertedor. Ao vertedor 1, na região Oeste de conexão foi atribuído maior coeficiente relacionado à descarga, pois este está posicionado na interface do Banhado do Taim com a Lagoa Mangueira em região próxima ao alinhamento do canal lateral, o que faz com que o fluxo seja preferencial. Já o vertedor 2 está em local com maior concentração de macrófitas emergentes, e sem definição de canal de drenagem, o que faz com que as trocas de água entre a Lagoa e o Banhado seja difusa e mais

lenta, representadas pela redução do coeficiente do vertedor. Dadas as condições de cada vertedor, os parâmetros ajustados apresentam valores compatíveis com as características do escoamento em cada um deles.

3.1.5. Coeficiente de rugosidade de Manning

Não foi possível calibrar as velocidades na região interna do Banhado do Taim em função das alterações da rugosidade para cada uma das feições definidas. Isso ocorre já que não há observações de velocidade disponíveis para o local. Dessa forma, baseando-se em valores referência, e no melhor resultado de nível de água simulado, a Tabela 5 apresenta os valores definidos para cada uma das feições inseridas no sistema.

Tabela 5 - Valores de referência e valores atribuídos de rugosidade para as feições na região interna do Banhado do Taim.

Feição	Faixa de valores de referência	Valor atribuído
Canal interno	0,025 – 0,033	0,033
Dunas	0,012 – 0,035	0,035
Lagoas	0,010 – 0,040	0,012
<i>S. californicus</i>	0,050 – 0,350	0,100
<i>S. giganteus</i>	0,050 – 0,350	0,070
<i>Z. bonariensis</i>	0,050 – 0,350	0,090
Demais áreas	0,060	0,060

Fonte: Autor.

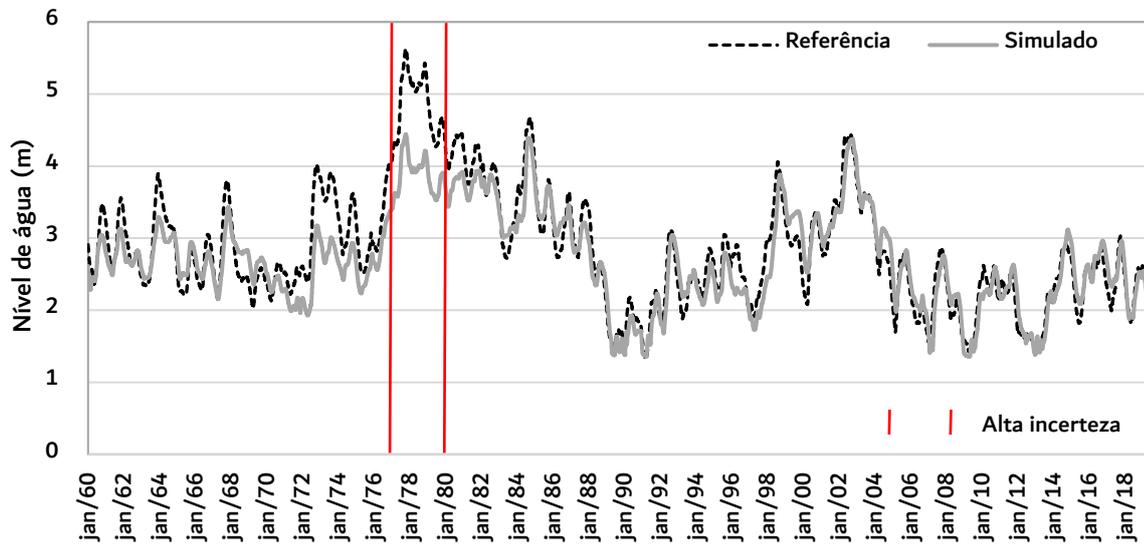
As alterações dos valores de rugosidade para cada feição dentro da faixa de referência não produziram variações significativas nos níveis de água simulados e velocidades. Dessa forma, a atribuição do valor para cada uma das feições foi feita de maneira arbitrária, levando-se em consideração os valores de literatura e o padrão de distribuição de cada espécie de macrófita considerada.

3.1.6. Performance do modelo na calibração

A avaliação da performance da calibração foi realizada para o período completo da simulação, compreendido entre 1960 e 2019 (Figura 32), mas também foi realizada uma análise

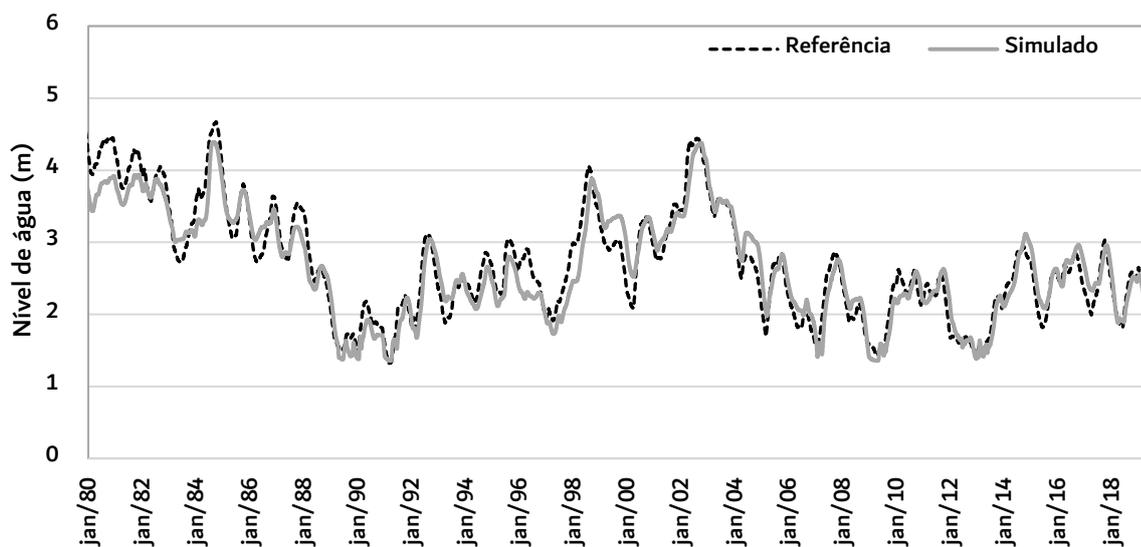
do período compreendido entre 1980 e 2019 (Figura 33) devido à grande faixa de incerteza na referência adotada no período de cheia por volta de 1977 até 1980.

Figura 32 - Resultado da simulação obtido para o período de 1960 - 2019.



Fonte: Autor.

Figura 33 – Resultado da simulação obtido para o período de 1980 a 2019.



Fonte: Autor.

Conforme se verifica, há melhoria na qualidade da performance do modelo, observando-se as estimativas de volume e o comportamento da série para o período após 1980, conforme evidenciado nos coeficientes estatísticos descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficientes estatísticos para os dois períodos considerados na calibração.

Período	1960 – 2019	1980 – 2019
RSR	0,44	0,32
PBIAS	-5,2%	-1,7 %
NSE	0,81	0,90

Fonte: Autor.

Os resultados gráficos para os dois períodos considerados indicam uma calibração adequada para representar a série de nível de água em comparação com a referência utilizada. Embora o segundo período selecionado apresente resultados melhores, todos os parâmetros das duas análises são consideradas muito boas de acordo com as orientações de Moriasi et al. (2007).

Em termos médios, a série referência possui média 2,85 metros, com desvio padrão de 0,83 metros e a simulada 2,71 metros de média com 0,66 metros de desvio padrão. A média e desvio padrão reduzidos estão diretamente associados a subestimativa do pico existente entre 1977 e 1980, pois para boa parte das recessões a simulação apresenta valores superestimados, indicando médias ligeiramente maiores.

Os erros máximos absolutos são verificados nos anos de 1977 e 1978, com valores da ordem de 1,2 metros, o que representa um erro expressivo considerado o ecossistema em análise. A calibração e validação da série utilizada como referência não contemplam o período de maiores erros, por isso, a incerteza na afirmação do erro absoluto existe, não devendo ser negligenciada nas aplicações do modelo ajustado ao local. Para o período de 1980 a 2019, o erro máximo foi de 60 centímetros nos anos de 1996 e 1998 para 4 meses do período simulado, indicando que o modelo, de maneira geral, consegue descrever adequadamente os níveis de água.

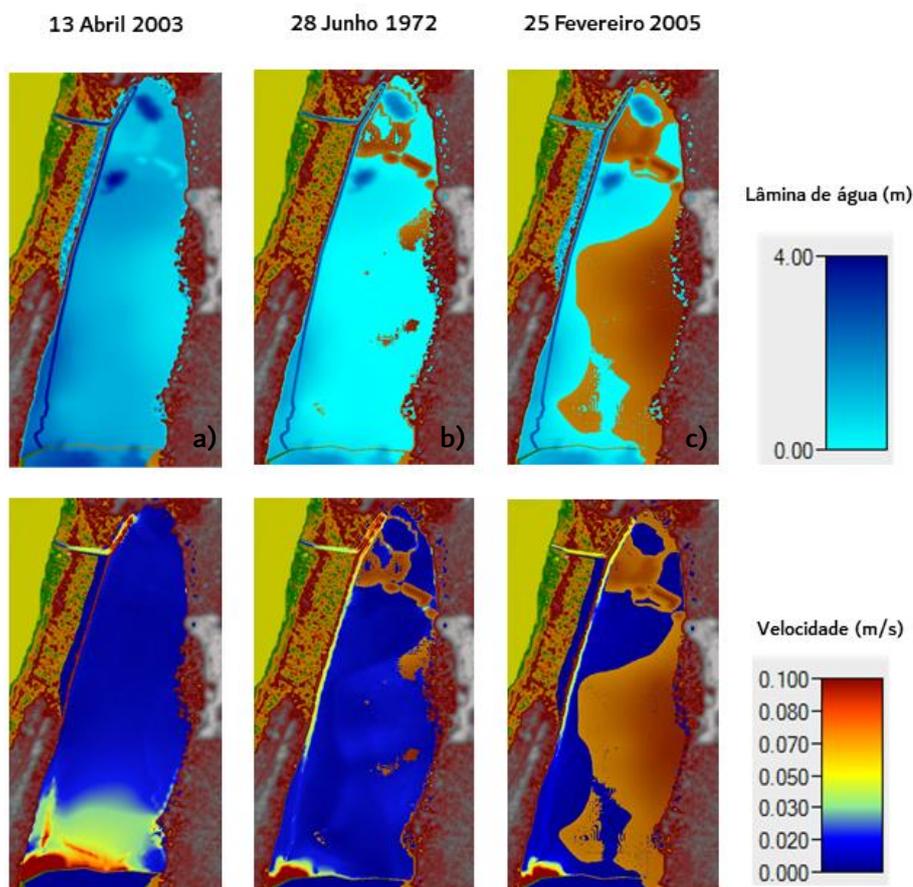
Além disso, outros fatores agregam erros nas estimativas. A parametrização definida para o sistema é única para todo o período considerado, porém, sabe-se que ocorrem alterações no sistema (naturais ou artificiais) podem promover mudanças nos padrões do local. Além disso, o coeficiente de escoamento definido para o modelo *off-line* da Lagoa Mangueira, por

exemplo, apresenta valor fixo para todas as condições, o que simplifica as estimativas, mas pode agregar erro nos volumes produzidos já que as condições de umidade antecedente do solo tem capacidade de alterar os valores desse coeficiente.

No geral, o ajuste possui picos bem representados e algumas recessões superestimadas que serão discutidas com maior evidência na validação do modelo. A lâmina de água espacializada para qualquer período da simulação, as velocidades obtidas para todos os pontos do sistema e setas indicativas de direção de fluxo podem ser obtidas de maneira direta dos arquivos de saída pós processamento da modelagem, permitindo uma boa análise da hidrodinâmica da área interna do Banhado.

Para exemplificar, a Figura 34 mostra as informações de lâmina de água e velocidades para dias representativos de situações hidrológicas de cheia (a), intermediárias (b) e de seca (c). Nas imagens indicativas de velocidade, é possível observar padrões de velocidade relacionados com os diferentes coeficientes de Manning atribuídos a cada região.

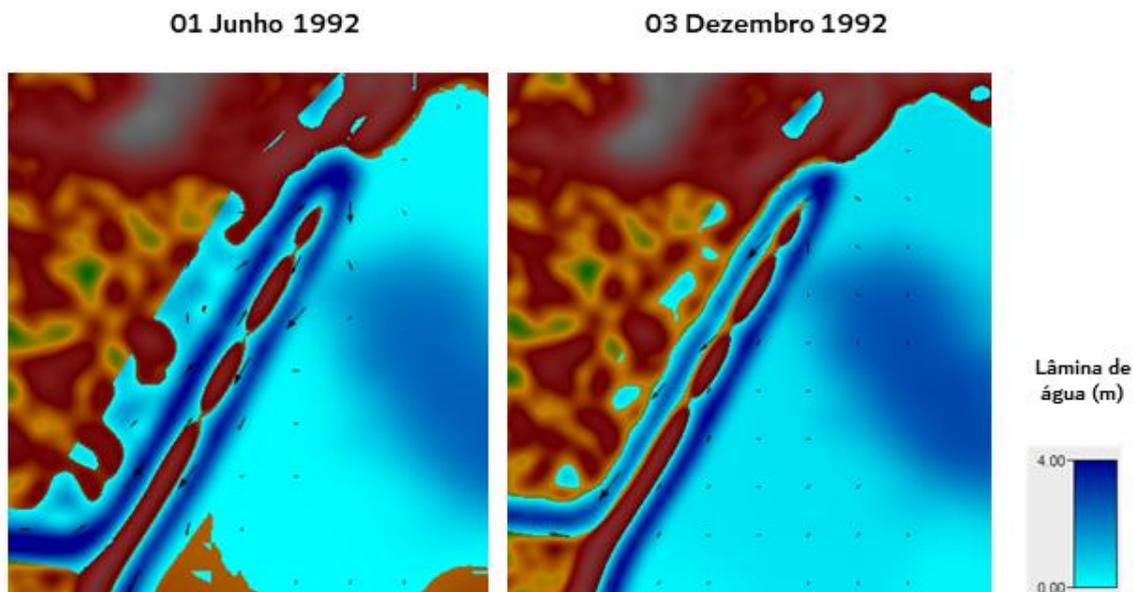
Figura 34 - Lâmina de água e velocidade espacializadas para três condições hidrológicas.



Fonte: Autor.

Além da lâmina de água e velocidades, é possível verificar visualmente a inversão de fluxo que ocorre do canal que conecta o Banhado do Taim à Lagoa Mirim, dependendo das condições hidrológicas, conforme revelam as setas indicativas da direção do escoamento da Figura 35 (a magnitude da seta está relacionada com a magnitude da velocidade).

Figura 35 - Detalhe da inversão de fluxo na região das comportas.



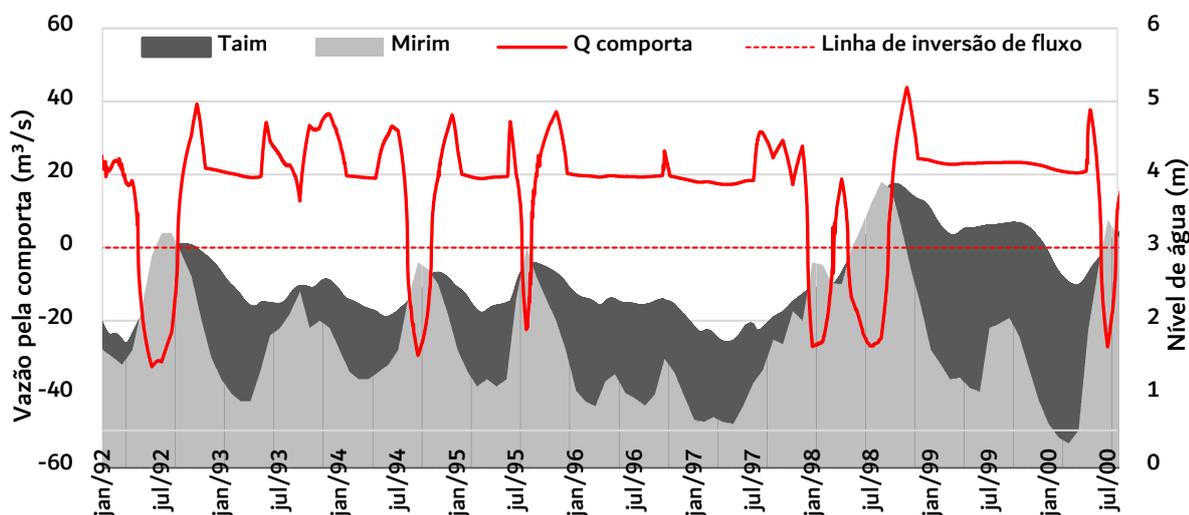
Fonte: Autor.

A Figura 36 mostra a vazão junto às comportas ao Norte do Banhado, onde é possível identificar a inversão de escoamento e os níveis de água na Lagoa Mirim e Banhado do Taim. Para o período selecionado, verifica-se que cada vez que o nível interno do Banhado é igualado ou superado pelo nível da Lagoa Mirim, há inversão de fluxo, ou seja, escoamento preferencial da Lagoa Mirim para o Banhado do Taim. Salienta-se, também, que a inversão de fluxo ocorre usualmente para níveis de água médios a altos no Banhado do Taim e na Lagoa Mirim, porém são visualizadas algumas inversões ao longo da simulação para níveis abaixo da média nos dois sistemas.

Além dos resultados aqui apresentados para elucidar as possibilidades de análise, diferentes informações podem ser obtidas de maneira direta nos arquivos de saída do HEC-RAS após o processamento das simulações. Como exemplo, é possível obter os hidrogramas e

cotagramas de todas as estruturas hidráulicas, volumes totais que escoam pelas estruturas e representação gráfica do aumento e redução da lâmina de água ao longo do tempo.

Figura 36 - Vazão simulada nas comportas e níveis de água no BT e L. Mirim.



Fonte: Autor.

3.2. VALIDAÇÃO

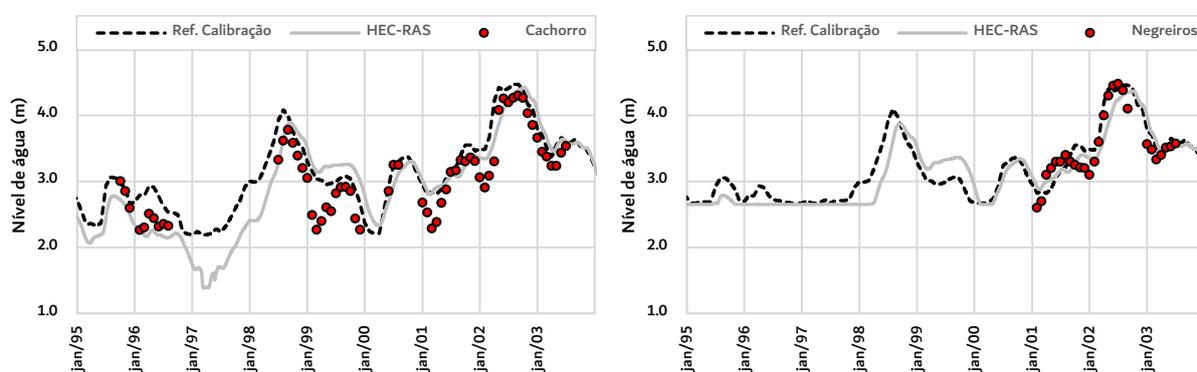
A validação foi realizada com os dados observados em duas réguas diferentes internas ao Banhado do Taim, conforme descrito na metodologia. A título de comparação, as séries utilizadas como referência na calibração foram plotadas na Figura 37 juntamente com as observações e os resultados do modelo desenvolvido no estudo.

A avaliação dos resultados foi realizada através da análise gráfica e dos parâmetros estatísticos da Tabela 7. Os resultados obtidos para a validação, de acordo com critérios de Moriasi et al. (2007), são bons para a régua Cachorro e muito bons para a régua Negreiros. Essa tabela também apresenta as estatísticas que seriam obtidas se considerada a série de referência obtida com o modelo proposto por Villanueva (1997) para a validação.

Conforme observado na Figura 37, o modelo HEC-RAS tem limitação de reproduzir recessões em níveis muito baixos, já recessões em níveis mais altos são melhor representadas, assim como no modelo utilizado como referência na calibração. Muitas podem ser as variáveis relacionadas a essa limitação: incerteza na estimativa do “saldo de precipitação”, que pode ter superestimado a quantidade de água no Banhado do Taim; dados de evaporação observada

podem subestimar a evapotranspiração local; os volumes de água reais retirados da lagoa Mangueira para fins de irrigação podem ser maiores dos que os utilizados para esse estudo; ou ainda possível problema nos parâmetros das estruturas ou de rugosidade estimados, visto que não há valor exato a se utilizar. Além disso, a alta complexibilidade do sistema modelado torna difícil a representação de todos os fenômenos na integridade por ambos os modelos comparados.

Figura 37 - Dados observados e simulados para dois pontos do Banhado do Taim.



Fonte: Autor.

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos da validação.

Modelo	Referência		HEC-RAS 2D		
	Régua	Cachorro	Negreiros	Cachorro	Negreiros
RSR		0,59	0,43	0,61	0,46
PBIAS		8,3%	2,3 %	5,7%	5,4%
NSE		0,65	0,81	0,63	0,79

Fonte: Autor.

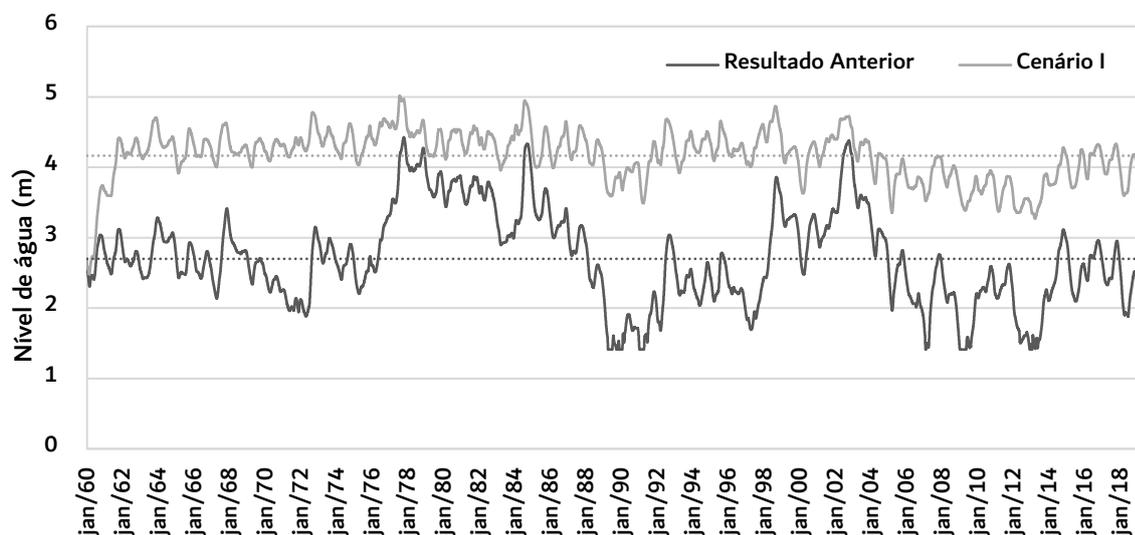
De maneira geral, assim como na calibração, os resultados obtidos para a validação são satisfatórios e demonstram a capacidade do modelo ajustado de representar os fenômenos propostos.

3.3. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

3.3.1. Cenário I: Influência da regra de operação das comportas na hidrodinâmica do Banhado do Taim

A análise gráfica do cenário I (Figura 38) permite avaliar as consequências nos níveis de água no interior do Banhado do Taim, em razão do total fechamento das comportas, nesse cenário hipotético. Nesse cenário, as perdas de água no Banhado do Taim ocorrem exclusivamente por meio de processos hidrológicos (evapotranspiração) e pelos capivarodutos, que em níveis mais altos de água, atuam de maneira mais intensa. Como em longo prazo o saldo do balanço hidrológico vertical é positivo nessa bacia hidrográfica (precipitação > evapotranspiração), ocorrem condições para a elevação no nível médio em longo prazo. Além disso, ao promover o fechamento das comportas, o nível da Lagoa Mangueira também é incrementado, como resultado do represamento das águas no interior da região do Banhado do Taim, o que ocasiona ainda mais descarga da Lagoa Mangueira no Banhado do Taim através dos vertedores.

Figura 38 - Cenário I: Comportas fechadas.



Fonte: Autor.

Pode-se observar que ocorre um significativo acréscimo dos níveis, com destaque para os valores mínimos, com conseqüente mudança no padrão hidrodinâmico. Esse cenário

provocaria alterações não somente nas trocas de volume de água entre o Banhado do Taim e Lagoa Mirim, mas levaria a alterações completas no hidroperíodo do Banhado do Taim. Em termos de nível médio de longo período, a média passa de 2,69 metros da série de referência para 4,16 metros, produzindo níveis 35% maior, em média, com desvio padrão 48% menor. A correlação entre as séries é moderada (0,65), indicando mudanças nos padrões temporais do nível de água.

A redução do desvio padrão indica a redução da variabilidade natural de amplitudes de níveis, às quais o Banhado do Taim conhecido na sua forma atual é adaptado. Além disso, exercendo o fechamento contínuo das comportas, as consequências poderiam ser devastadoras para o ecossistema do Banhado, já que valores acima de 3,50 metros são considerados acima dos limites dos padrões a serem mantidos para a conservação do ecossistema, conforme demonstrados por Tassi (2008).

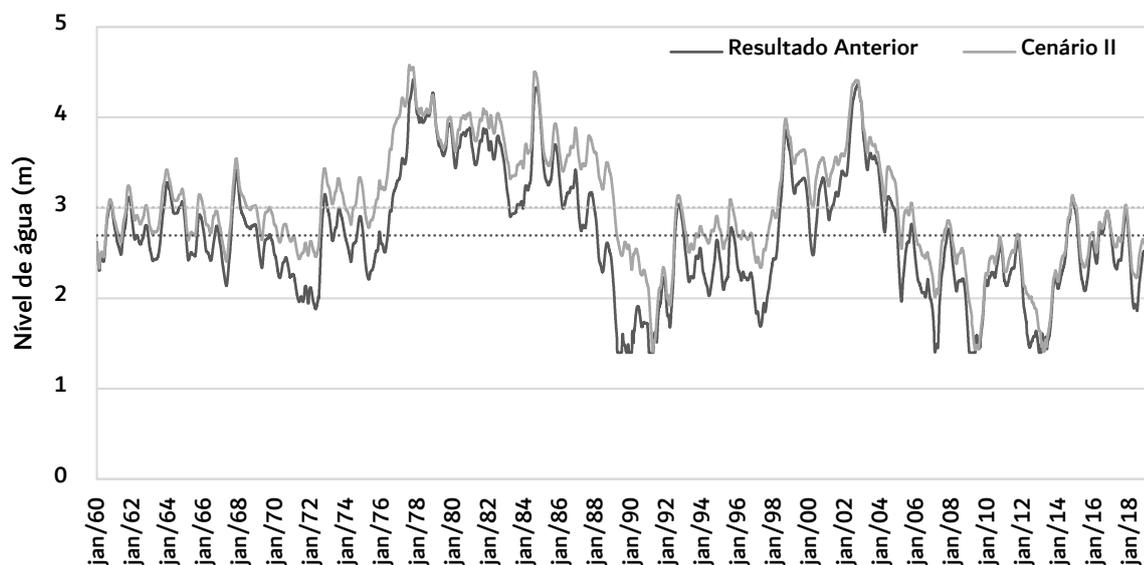
Neste cenário, a manutenção de níveis de água muito elevados por um longo período, levaria a uma descaracterização do ecossistema, alterando a distribuição espacial das áreas secas, temporariamente e permanentemente inundadas. A região seria potencialmente transformada em um ambiente lacustre, inundando regiões vizinhas utilizadas para pecuária e orizicultura (VILLANUEVA, 1997). Além disso, condições hidrológicas locais estão diretamente relacionadas aos índices de adequabilidade de habitats, por isso, determinadas espécies encontradas no Banhado poderiam não suportar lâminas de água tão elevadas por longos períodos de tempo (TASSI, 2008; XAVIER, 2015), causando prejuízos irreparáveis, promovendo a extinção de espécies animais e vegetais.

3.3.2. Cenário II: Influência da redução da irrigação na hidrodinâmica do Banhado do Taim

O cenário II (Figura 39) representa o uso mais restritivo da água captada para irrigação a partir da Lagoa Mangueira. Como consequência dessa análise, o volume de água no Banhado do Taim aumentaria em cerca de 10,3%, produzindo uma série de níveis ligeiramente superior aqueles observados na série de referência, com destaque para as maiores diferenças para os meses em que ocorrem as retiradas de água da Lagoa Mangueira (meses de verão). O desvio padrão do cenário avaliado sofre pequena alteração (65 centímetros da série original para 62 centímetros) e o coeficiente de correlação entre as séries deste cenário e a de referência é

elevado (0,94), o que demonstra que a caracterização da série se mantém semelhante, ou seja, os hidroperíodo se mantém, porém com alteração de volume.

Figura 39 - Cenário II: Redução nas taxas de irrigação.



Fonte: Autor.

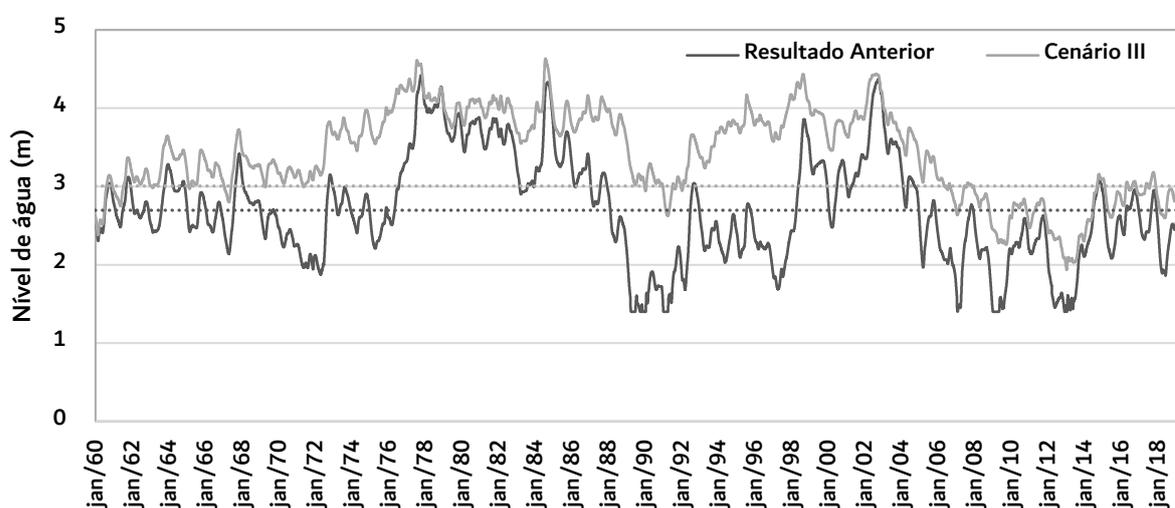
A série referência apresenta cinco períodos críticos de situação de seca (janeiro de 1990, abril de 1991, fevereiro de 2007, julho de 2009 e abril de 2013), o que poderia ter sido intensificado em função da irrigação. No entanto, quando avaliado esse cenário, verificou-se que 3 destes períodos não foram afetados pela redução nas captações, pois ocorrem nos meses de abril de 1991, julho de 2009 e abril de 2013 (meses em que não são exercidas retiradas de água para irrigação). Os demais períodos críticos da série sofreram acréscimos de nível devido à maior disponibilidade de água na Lagoa Mangueira e, por consequência, maior disponibilidade para o Banhado do Taim.

Este cenário apresenta um resultado que ainda permitiria um bom funcionamento do sistema, preservando o hidroperíodo e as funções do Banhado. Apesar de ser mais crítico em relação a irrigação, a mudança nas técnicas de plantio que conduza a redução das taxas de retirada de água para irrigação pode ser uma ferramenta útil, especialmente para anos menos chuvosos, permitindo irrigação em parte dos períodos de estiagem.

3.3.3. Cenário III: Influência da eliminação das retiradas de água para irrigação na hidrodinâmica do Banhado do Taim

O cenário III (Figura 40) demonstra que a irrigação exercida no local ajudou a moldar o sistema da maneira que é. Através da influência da ausência da irrigação de longo prazo pode-se perceber que as características do hidroperíodo poderiam ser parcialmente destruídas ou, ainda, nunca existido na região. Da mesma maneira que o fechamento total das comportas promove mudanças nos padrões de vegetações e espécies, o cessamento da irrigação também.

Figura 40 - Cenário III: Extinção da irrigação.



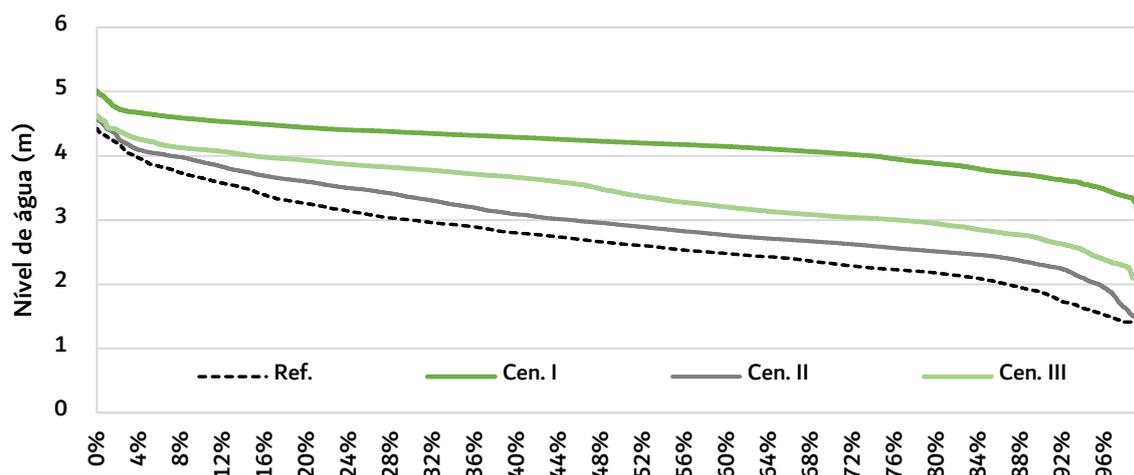
Fonte: Autor.

O nível de água médio aumenta de 2,69 metros para 3 metros, acompanhado do aumento de 21% do volume total da série e redução do desvio padrão para 0,55. Em termos de correlação, as séries mantem a correlação, com valor de 0,75 o que indica que, apesar das alterações no ecossistema, as séries simuladas ainda apresentam similaridade em seu comportamento.

Não há como definir certamente o quanto o Banhado do Taim seria afetado pela completa remoção da irrigação, por isso, para que os dois interesses locais se mantenham em harmonia, é importante que a gestão dos recursos na região seja realizada de forma abrangente e contínua.

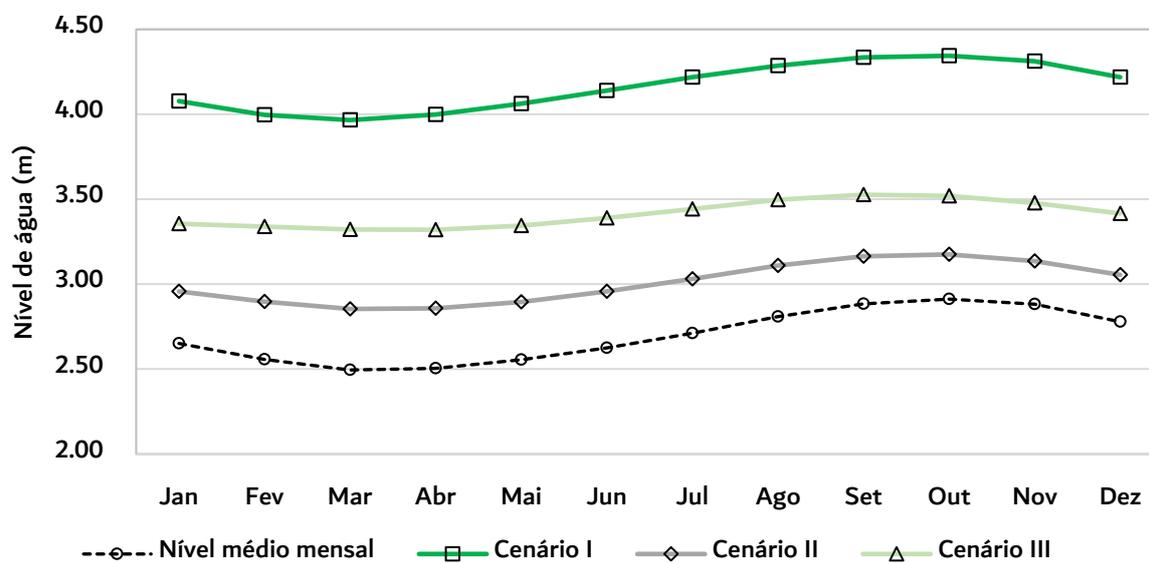
A comparação da curva de permanência (Figura 41) e do hidroperíodo (Figura 42) para os cenários demonstra manutenção de níveis de água mais elevados em comparação com a referência para todos os cenários simulados.

Figura 41 - Curva de permanência de níveis de água para os diferentes cenários.



Fonte: Autor.

Figura 42 - Hidroperíodo para os cenários analisados.



Fonte: Autor.

O pior cenário em termos de manutenção elevada de níveis é o cenário I, que representa o completo fechamento das comportas. Já o cenário II, apresenta um pequeno acréscimo de nível, com níveis mínimos e máximos muito semelhantes a referência. Em situação intermediária tem-se o cenário III, que sofre maior acréscimo de cotas de permanência mais elevada, ou seja, cotas menores se tornam mais elevadas em detrimento as maiores, que não sofrem tantas alterações, demonstrando que a irrigação tem maior capacidade de afetar níveis de água mais baixos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi calibrar e validar o modelo HEC-RAS bidimensional aos dados mensais de nível d'água do Banhado do Taim, permitindo um melhor entendimento da hidrodinâmica do local e a análise de cenários.

A escolha do HEC-RAS permite a continuidade de estudos que vêm sendo desenvolvidos para gestão dos conflitos pelo uso da água na região, incluindo a simulação de diferentes cenários, a partir de um software atual, com interface amigável e passível de ser utilizado sem grandes limitações por outros usuários.

Para a calibração, os dados hidrológicos foram explorados de forma a garantir que todos os contornos do modelo fossem determinados, e várias estratégias permitiram realizar uma boa representação da complexidade espacial existente na região interna do Banhado do Taim, como a presença de canais, macrófitas, dunas, lagoas, entre outros, que condicionam diferentemente a hidrodinâmica local. A parte dessa característica, diferentes estruturas hidráulicas existentes na região foram representadas na modelagem, objetivando uma representação mais fidedigna possível do local modelado.

A escolha assertiva dos procedimentos de calibração pôde ser confirmada na validação, podendo-se recomendar a utilização do modelo calibrado e validado para diversas situações como a análise de cenários. Para isso, três cenários hipotéticos, relacionados às práticas locais que têm impactos nos recursos hídricos locais foram avaliados, demonstrando a aplicabilidade do modelo para diferentes análises de gestão.

A utilização do modelo calibrado e validado não se limita à exploração de cenários hipotéticos ao longo de períodos passados, mas permite que o mesmo seja utilizado para a análise de cenários futuros, incluindo previsões de curto ou longo prazo para a região de estudo, com base na previsão climática.

Espera-se que o estudo desenvolvido possa servir como ferramenta de pesquisa e gerenciamento da área, permitindo que a utilização dos recursos seja realizada de forma sustentável e que atenda concomitantemente a irrigação e a conservação da biodiversidade e serviços ecossistêmicos locais.

5. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Algumas limitações foram encontradas no decorrer da pesquisa, podendo-se destacar:

O processo de modelagem da área de estudo demandou grande esforço devido a uma série de fatores, como a falta de monitoramento hidrológico de longo prazo, com dados confiáveis e recentes. Assim, muitas informações utilizadas foram obtidas através de dados históricos simulados obtidos a partir de estudos anteriores para a região, como a série de níveis d'água utilizada como referência para a calibração, o que leva a uma grande faixa de incerteza, embora o modelo de referência tenha sido validado.

Do ponto de vista computacional, muitos erros levavam o HEC-RAS a cessar as simulações sem motivo definido. O apontamento de erro pelo software não gera nenhum relatório indicativo da fonte de erro, demandando tempo, aprendizado e experiência do pesquisador para realizar essa tarefa, visto que em nenhum momento o manual disponível orienta o usuário para a solução de problemas. Como existem poucas publicações sobre a utilização do HEC-RAS 2D em modelagem de longo prazo em sistemas complexos como o Banhado do Taim, muitas vezes durante o processo de modelagem as estratégias eram de tentativa-erro, levando a uma infinidade de tentativas fracassadas e descartadas que não foram documentadas. Além disso, as simulações de longo prazo demandam tempo e esforço computacional, por isso, reduções no tempo de processamento podem ser atingidas com futuras melhorias computacionais.

Ainda, é importante destacar que a utilização de um modelo hidrológico *off-line* simplificado para representar a condição de contorno da Lagoa Mangueira, e mesmo o balanço vertical realizado no Banhado do Taim podem ser capazes de introduzir erros nas simulações. No entanto, isso foi realizado dessa maneira devido à inexistência de um módulo hidrológico próprio no software HEC-RAS 5.0.7. A atualização desse para sua versão 5.1 (informação obtida em comunicação não oficial), possibilitará realizar dos processos hidrológicos *on-line* e melhorar a confiabilidade nos resultados.

Idealmente, observações de nível ou vazão na interface dos sistemas trariam benefícios para os estudos na região, porém, dadas as condições existentes, estimar uma série de vazões com base em coeficientes de escoamento variáveis dependendo da condição antecedente pode melhorar as estimativas realizadas neste estudo.

Além disso, os efeitos de vento, especialmente na Lagoa Mangueira e importante para intervalos de tempo de análise diários, não foram considerados nesse estudo devido à falta de

um módulo que possibilitasse a inserção dessa variável. Da mesma maneira, a versão 5.1 do software tornará possível inserir a variável vento nas análises, tornando a modelagem ainda mais fiel ao sistema representado.

Os dados topográficos utilizados para definir o relevo de fundo da Lagoa Mangueira e do Banhado do Taim apresentados no artigo I foram adquiridos em campanha realizada no final da década de 90. Sabe-se da possibilidade de variabilidade do fundo desses sistemas, especialmente pela deposição de sedimentos e de biomassa verde, levando a resultados errôneos e incertezas da modelagem.

A variabilidade do leito do sistema também está relacionada com mudanças sazonais. Possivelmente os padrões de vegetação sofrem alterações significativas ao longo das estações e períodos úmidos ou secos, o que produz mudanças nos coeficientes de rugosidade ao longo do tempo. Devido as limitações de entendimento e representação, essas mudanças não foram implementadas no modelo, o que pode adicionar incerteza nessa parametrização.

Neste trabalho, apenas análises mensais concisas puderam ser realizadas, devido à limitação dos dados, especialmente aqueles relacionados aos níveis d'água no Banhado do Taim. Assim, devido ao dinamismo do sistema, podem ocorrer alterações diárias, como os forçantes do vento, que não puderam ser verificadas devido à inexistência de dados diários para calibração e validação. Por isso, é importante ressaltar que seja mantido o atual linígrafo instalado junto às comportas na região norte do Banhado do Taim, permitindo melhores análises com intervalo de tempo reduzido para futuros estudos.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para pesquisas futuras, campanhas para um novo levantamento batimétrico da região interna do Banhado do Taim beneficiariam novos estudos na região. Ainda, o monitoramento de velocidade de escoamento e reativação do monitoramento das réguas distribuídas na região também trariam avanços para as pesquisas na área, e permitiriam a validação dos modelos ajustados para períodos mais recentes.

Além disso, uma análise de sensibilidade mais apurada dos parâmetros poderia produzir melhores resultados, bem como a utilização da nova versão ainda não disponível do software para reduzir as incertezas causadas pelo modelo *off-line*.

Uma nova abordagem para representação do sistema no HEC-RAS também poderia ser testada em estudos futuros. Por exemplo, a utilização de um canal 1D em conjunto com áreas de fluxo e de acumulação para representar o resto do sistema, com estruturas hidráulicas nas áreas de conexão podem produzir resultados mais satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- ARCEMENT JR, G. J.; SCHNEIDER, V. R. **Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains: U.S. Geological Survey.** Water Supply Paper, v. 2339, p. 38, 1984.
- BAGER, A.; FONTOURA, V. **Evaluation of the effectiveness of a wildlife roadkill mitigation system in wetland habitat.** Ecological Engineering, v. 53, p. 31–38, 2013.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; CHANDRAPALA, L. **Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use.** Agricultural Water Management, v. 58, p. 171 – 192, 2003.
- BAUER, P.; GUMBRICHT, T.; KINZELBACH, W. **A regional coupled surface water/groundwater model of the Okavango Delta, Botswana.** Water Resources Research, v. 42, n. 4, p. 1–15, 2006.
- BIRDLIFE INTERNATIONAL. **Loss of intertidal habitat through land-claim in Asia.** Disponível em: <<http://www.birdlife.org>>. Acesso em 03 fevereiro de 2020, 2017.
- BRAUN, K. N.; THEUERKKAUF, E. J.; MASTERSON, A.; CURRY, B. B.; HORTON, D. E. **Modeling organic carbon loss from a rapidly eroding freshwater coastal wetland.** Scientific Reports, v. 9, n. 4204, p. 1–13, 2019.
- BULÉ, B. P. **Influência das variáveis hidrológicas e da irrigação nos níveis do Banhado do Taim por meio de modelagem hidrológica.** 2017. 53 f. Trabalho de conclusão de curso (Eng. Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- CHEN, C.; MESELHE, E.; WALDON, M. **Assessment of mineral concentration impacts from pumped stormwater on an Everglades Wetland, Florida, USA - Using a spatially-explicit model.** Journal of Hydrology, v. 452–453, p. 25–39, 2012.
- CHIN, D. A. **Water-Quality Engineering in Natural Systems: Fate and Transport Processes in the Water Environment.** 2nd Edition, John Wiley & Sons, cap 9, 2016.
- CURRAN, J. C.; HESSION, W. C. **Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system.** Journal of Hydrology, v. 505, p. 364–376, 2013.
- DA ROSA, C. N. **Influência Dos Níveis De Água Na Dinâmica De Macrófitas Aquáticas Emergentes Do Banhado Do Taim.** 2016. 174 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- DAVIDSON, N. C. **How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area.** Marine and Freshwater Research, v. 65, n. 10, p. 934–941, 2014.
- DE CAMARGO, A. P.; DE CAMARGO, M. B. P. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial.** Bragantia, v. 59, n. 2, p. 125–137, 2000.
- DE DONCKER, L.; TROCH, P.; VERHOEVEN, R.; BAL, K.; MEIRE, P.; QUINTELIER, J. **Determination of the Manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river.** Environmental Fluid Mechanics, v. 9, n. 5, p. 549–567, 2009.

- DE PAULA, S. C. **Previsão Hidroambiental Integrada do Sistema do Taim e Lagoa Mirim - RS**. 2019. 242 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2019.
- DIXON, K. R.; FLORIAN, J. D. **Calibration of the Wetland Hydrodynamic Model to the Everglades Nutrient Removal Project**. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 12, n. 12, p. 2281–2292, 1993.
- DURANEL, A. J.; ACREMAN, M.C.; STRATFORD, C. J.; THOMPSON, J. R.; MOULD, D. J. **Assessing the hydrological suitability of floodplains for species-rich meadow restoration: A case study of the Thames floodplain, UK**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, n. 1, p. 170–179, 2007.
- FATHI-MOGHADAM, M.; DRIKVANDI, K. **Manning Roughness Coefficient for Rivers and Flood Plains with Non-Submerged Vegetation**. *International Journal of Hydraulic Engineering*, v. 1, n. 1, p. 1–4, 2012.
- FEPAM. **Arquivos Digitais para uso em SIG**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp>. Acesso em: 11 outubro de 2018. 2005.
- HSU, M.; KUO, A. Y.; KUO, J.; LIU, W. **Modeling estuarine hydrodynamics and salinity for wetland restoration**. *Journal of Environmental Science and Environmental Engineering*, v. 33, n. 5, p. 891 – 921, 2008.
- IONESCU, C. S.; GOGOASE, D. E. N. **Influence of reservoir shape upon the choice of Hydraulic vs. Hydrologic reservoir routing method**. *EENVIRO*, n. 07001, p. 1–8, 2018.
- IPH. **Comportamento Hidrológico do Banhado do Taim**. Volume I – Relatório e anexos C, D, F, G e H, 166 p., Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre, 1996.
- JONES, J. W.; DESMOND, G. B.; HENKLE, C.; GLOVE, R. **An approach to regional wetland digital elevation model development using a differential global positioning system and a custom-built helicopter-based surveying system**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, n. 2, p. 450–465, 2012.
- LAI, X. J.; HUANG, Q.; JIANG, J. H. **Wetland inundation modeling of Dongting Lake using two-dimensional hydrodynamic model on unstructured grids**. *Procedia Environmental Sciences*, v. 13, p. 1091–1098, 2012.
- LES LANDES, A. A.; AQUILINA, L.; DE RIDDER, J.; LONGUEVERGNE, L.; PAGÉ, C.; GODERNIAUX, P. **Investigating the respective impacts of groundwater exploitation and climate change on wetland extension over 150 years**. *Journal of Hydrology*, v. 509, p. 367-378, 2014.
- MALTBY, E.; ACREMAN, M. C. **Ecosystem services of wetlands: pathfinder for a new paradigm**. *Hydrological Sciences Journal*, v. 56, n. 8, p. 1341–1359, 2011.
- MARTINEZ-MARTINEZ, E.; NEJADHASHEMI, A. P.; WOZNICKI, S. A.; LOVE, B. J. **Modeling the hydrological significance of wetland restoration scenarios**. *Journal of Environmental Management*, v. 133, p. 121–134, 2014.

- MILZOW, C.; BURG, V.; KINZELBACH, W. **Estimating future ecoregion distributions within the Okavango Delta Wetlands based on hydrological simulations and future climate and development scenarios.** *Journal of Hydrology*, v. 381, n. 1–2, p. 89–100, 2010.
- MIN, J. H.; PAUDEL, R.; JAWITZ, J. W. **Spatially distributed modeling of surface water flow dynamics in the Everglades ridge and slough landscape.** *Journal of Hydrology*, v. 390, n. 1–2, p. 1–12, 2010.
- MITRA, S.; WASSMANN, R.; VLEK, P. L. G. **An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock.** *Current Science*, v. 88, n. 1, p. 25–35, 2005.
- MITSCH, W. J.; GOSSSELINK, J. G. **Wetlands.** Hoboken: Wiley – 4^a ed., 2007.
- MORIASI, D. N. et al. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** *ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- MOTTA-MARQUES, D. M. et al. **O sistema Hidrológico do Taim.** PELD – CNPq. Dez anos do programa de Pesquisas de Longa Duração no Brasil: Achados, Lições e Perspectivas, p. 200-224, 2002.
- MOUSTAFA, M. Z.; HAMRICK, J. M. **Calibration of the Wetland Hydrodynamic Model to the Everglades Nutrient Removal Project.** *Water Quality and Ecosystem Modeling*, v. 1, p. 141–167, 2000.
- NERI-FLORES, I.; MORENO-CASASOLA, P.; PERALTA-PELÁEZ, L. A.; MONROY, R. **Groundwater and river flooding: The Importance of Wetlands in Coastal Zones.** *Journal of Coastal Research*, v. 92, p. 44-54, 2019.
- OECD, Organization For Economic Co-Operation and Development. **Guidelines for aid agencies for improved conservation and sustainable use of tropical and subtropical wetlands.** p. 3–69, 1996.
- OSKUYI, N. N.; SALMASI, F. **Vertical Sluice Gate Discharge Coefficient.** *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, v. 2, n. 3, p. 108–114, 2012.
- PAZ, A. R. **Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do Banhado do Taim (RS).** 176 f. Dissertação. (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- PENG, A.; LIU, F. **Flooding simulation due to Hurricane Florence in North Carolina with HEC RAS.** Cornell Library, 2019.
- PERENNOU, C. et al. **Existing areas and past changes of wetland extent in the Mediterranean region: an overview.** *Ecologia Mediterranea*, v. 38, n. 2, p. 53–66, 2012.
- PORTO, R. M. **Hidráulica Básica.** 4^a Edição, EESC-USP, São Carlos – SP, 2006.
- RAMSAR. **Ramsar Sites Information Service 2020.** Disponível em: <<https://rsis.ramsar.org/ris/2298>>. Acesso em 22 janeiro, 2020.
- SANDERCOCK, P. J.; HOOKE, J. M. **Assessment of vegetation effects on hydraulics and of feedbacks on plant survival and zonation in ephemeral channels.** *Hydrological Processes*, v. 24, n. 6, p. 695–713, 2010.

SHIELDS, F. D.; COULTON, K. G.; NEPF, H. **Representation of vegetation in two-dimensional hydrodynamic models.** *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 143, n. 8, p. 1–9, 2017.

SHINE, C.; KLEMM, K. **Wetlands, Water and the Law. Using law to advance wetland conservation and wise use.** IUCN Environmental Policy and Law Paper, n. 38, f. 332, 1999.

SRIWONGSITANON, N.; TAESOMBAT, W. **Effects of land cover on runoff coefficient.** *Journal of Hydrology*, v. 410, n. 3-4, p. 226 – 238, 2011.

TASSI, R. **Gerenciamento hidroambiental de terras úmidas.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2008.

TASSI, R.; MOTTA-MARQUES, D.; COLLISCHONN, W. **Advances in water management of southern Brazilian sub-tropical wetlands using bio-indicators.** IAHS Publication, v. 315, p. 1 – 8, 2007.

THOMPSON, J. R.; SØRENSEN, H. R.; GAVIN, H.; REFSGAARD, A. **Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England.** *Journal of Hydrology*, v. 293, n. 1–4, p. 151–179, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 1, p. 61–68, 2000.

UFSM. **Cartas topográficas do Rio Grande do Sul – 1:50.000.** Laboratório de Cartografia. 2020. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/cartografia/>> Acesso em 07 janeiro 2020.

USACE (a). **HEC-RAS 5.0 Users Manual**, p. 960, 2016.

USACE (b). **HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User’s Manual**, 2016.

VILLANUEVA, A. O. N. **Simulação de áreas de inundação dinâmicas: canais compostos e wetlands.** 164 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 1997.

XAVIER, R. A. **Índices de adequabilidade de habitat como subsídio ao gerenciamento dos recursos hídricos do Banhado do Taim.** 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

WEN, L. et al. **From hydrodynamic to hydrological modelling: Investigating long-term hydrological regimes of key wetlands in the Macquarie Marshes, a semi-arid lowland floodplain in Australia.** *Journal of Hydrology*, v. 500, p. 45–61, 2013.

WESTON, N. B.; NEUBAUER, S. C.; VELINSKY, D. J.; VILE, M. A. **Net ecosystem carbon exchange and the greenhouse gas balance of tidal marshes along an estuarine salinity gradient.** *Biogeochemistry*, v. 120, n. 1–3, p. 163–189, 2014.

WINKLER, M. G.; DEWITT, C. B. **Environmental Impacts of Peat Mining in the United States: Documentation for Wetland Conservation.** *Environmental Conservation*, v. 12, n. 4, p. 317–330, 1985.

WOLDEMICHAEL, A. T. et al. **Role of Land-Water Classification and Manning’s Roughness Parameter in Space-Borne Estimation of Discharge for Braided Rivers: A**

Case Study of the Brahmaputra River in Bangladesh. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 3, n. 3, p. 395–403, 2010.

WU, F.; SHEN, H. W.; CHOU, Y. **Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation.** Journal of Hydraulic Engineering, v. 125, p. 934–942, 1999.

ZHANG, Y.; LI, C.; TRETTIN, C. C.; LI, H.; SUN, G. **An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems.** Global Biogeochemical Cycles, v. 16, n. 4, p. 9-1-9-17, 2002.

3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS

Em regiões alagadiças de importância mundial como o Banhado do Taim é necessário que se desenvolvam pesquisas e monitoramento contínuo para promover uma gestão eficiente dos recursos hídricos, considerando ainda os conflitos locais. As ferramentas computacionais surgem dessa necessidade de se gerir e entender as condições hidrológicas e hidrodinâmicas principalmente se locais com escassez de dados, como o caso da área de estudo.

Nesse estudo, os objetivos foram divididos em dois grandes grupos, onde o primeiro possui como resultado uma informação que subsidia o segundo. Primeiramente, foi necessário desenvolver um modelo digital de elevação completo para a região de estudo, já que as informações anteriormente disponíveis eram versões simplificadas das características locais.

Algumas questões relacionadas ao desenvolvimento do MDE podem ser ressaltadas: Imagens de satélite são boas para definição de cotas de elevação de áreas secas, porém devem ser utilizadas com cautela já que muitas vezes há informação que não corresponde ao relevo em si, mas a objetos posicionados na superfície. Áreas alagadas não são representadas por imagens de satélite devido a presença de lâmina de água, o que levou a utilização de batimetrias e informações numéricas sobre canais para definir o relevo de fundo desses sistemas. Além disso, informações de projetos de drenagem e construção de estradas foram úteis na caracterização do sistema e forneceram pontos cruciais a serem adicionados ao relevo.

Os resultados da primeira etapa mostraram bom desempenho nas análises realizadas. A informação completa do terreno contempla não somente os dois sistemas mais relevantes nesse estudo (Lagoa Mangueira e Banhado do Taim), mas também a sua área de entorno e as feições existentes no local que tem capacidade de afetar o regime hidrológico local.

A segunda subdivisão deste estudo contempla a calibração e validação de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a área. Apesar de existirem modelos com funções semelhantes desenvolvidos para o local, a utilização deles é limitada nos dias de hoje devido a falta de compatibilização dos sistemas computacionais utilizados na época. Por isso, o desenvolvimento de um produto utilizando uma ferramenta computacional mais avançada, permite a utilização desse por diferentes usuários, possibilitando a extração de informações avançadas e detalhadas.

A utilização de um *software* de análise de rios para estudar uma região de relevo plano, com baixas velocidades e hidrodinâmica complexa foi uma tarefa que demandou grande esforço. As informações de literatura para montagem do sistema no software, calibração de parâmetros, definição de passo de tempo das simulações e todos os outros passos para atingir o

objetivo não são voltadas para esse tipo de ecossistema, por isso, muitas vezes foi necessário buscar informação em fontes não acadêmicas a fim de resolver problemas e avançar no estudo. Apesar de algumas limitações em reproduzir certos tipos de comportamento no Banhado do Taim, os resultados obtidos foram muito bons e atenderam às expectativas e objetivos propostos.

É esperado o lançamento de uma nova versão do *software* utilizado que permitirá a incorporação das informações do modelo hidrológico desenvolvido a parte. Entre suas novas capacidades está a melhoria das informações de precipitação e adição de função de infiltração, bem como trabalhar com retiradas de água de sistemas e aplicar forças relacionadas ao vento, trazendo melhorias na aplicabilidade da modelagem.

REFERÊNCIAS GERAIS

BOLSTER, C. H.; SAIERS, J. E. **Development and evaluation of a mathematical model for surface-water flow within the Shark River Slough of the Florida Everglades.** Journal of Hydrology, v. 259, p. 221-235, 2002.

BRASIL. **Decreto de 05 de junho de 2017.** Amplia a Estação Ecológica do Taim, localizada nos Municípios de Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, Estado do Rio Grande do Sul. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 05 jun. 2017. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/biodiversidade/UC-RPPN/Decreto_sn_de_5_de_junho_2017_amplia_esec_do_taim.pdf>. Acesso em: 06 de junho de 2019.

BRASIL. **Decreto nº92.963 de 21 de julho de 1986.** Cria a Estação Ecológica do Taim, em áreas de terra que indica, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 jul. 1986. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1985-1987/D92963.htm>. Acesso em: 06 de junho de 2019.

BRAVO, J. M.; MOTTA-MARQUES, D. M. L.; TASSI, R.; CARDOSO, M. A. G. **Avaliação preliminar do efeito de projeções do clima em cenários climáticos futuros sobre os níveis d'água do Banhado do Taim/RS.** Simpósio Regional de Recursos Hídricos. Nordeste. Anais, João Pessoa, PB-Brasil, 2012.

BRAVO, J. M.; MOTTA-MARQUES, D. M. L.; TASSI, R.; CARDOSO, M. A. G. **Precipitação Em Cenários Climáticos Futuros Na Região Do Sistema Hidrológico Do Taim, Rs.** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1–18, 2011.

BURGER, M. I. **Situação e ações prioritárias para a conservação de banhados e áreas úmidas da zona costeira.** Porto Alegre: Fundação Zoobotânica RS, 2000. 60 p. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/brnd/round6/guias/perfuracao/perfuracao_r6/refere/banhados.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018.

CHUNG, E.; SEONG, K. **Prioritization of water management for sustainability using hydrologic simulation model and multicriteria decision making techniques.** Journal of Environmental Management, v. 90, n. 3, p. 1502–1511, 2009.

DAVIS, S. M.; OGDEN, J. C. **Everglades – The ecosystem and its restoration.** Library of congress. 1 ed., p.11-32, 1994.

DNOS 1968 Departamento Nacional de Obras de Saneamento. **Projeto de Irrigação e Drenagem da Região do Taim (RS).** V. 25, Brasília, 1968.

FOTI, R.; DEL JESUS, M.; RINALDO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. **Hydroperiod regime controls the organization of plant species in wetlands.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States, v. 109, n. 48, p. 19596 - 19600, 2012.

GALDINO, C. H. P. A. **Previsão de longo prazo de níveis no sistema hidrológico do Taim.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2015.

GIRAUD, F. **Modélisation hydrologique d'un marais agricole: perspectives pour l'étude du transport d'azote et de phosphore. Cas du marais de Moëze, Charente-Maritime, France.** Tese de Doutorado, Universidade de Rene, Rene, França – 1992.

GIRAUD, F.; FAURE, J. B.; ZIMMER, D.; LEFEUVRE, J. C.; SKAGGS, R. W. **Hydrologic Modeling of a Complex Wetland.** Journal of irrigation and drainage engineering, v. 123, n. 5, p. 344-353, 1997.

GUASSELLI, L. L. **Dinâmica da vegetação no Banhado do Taim, RS.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2005.

GUSWA, A. J. et al. **Ecosystem services: Challenges and opportunities for hydrologic modeling to support decision making.** Water Resources Research, p. 4535–4544, 2014.

IVAJNŠIČ, D.; KALIGARIČ, M. **How to Preserve Coastal Wetlands, Threatened by Climate Change-Driven Rises in Sea Level.** Environmental Management, 54(4), p. 671-684, 2014.

JANSE, J. H. et al. **Towards a global model for wetlands ecosystem services.** Current Opinion in Environmental Sustainability, v. 36, p. 11–19, 2019.

JUNK, W. J. et al. **Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: A synthesis.** Aquatic Sciences, v. 75, n. 1, p. 151–167, 2013.

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. **The flood pulse concept in river-floodplain systems.** Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 106, p. 110–127, 1989.

KEFELEGN, H. **Mathematical Formulations for Three Components of Hydroperiod in Tidal Wetlands.** Wetlands, v. 39, n. 2, p. 349–360, 2019.

KLØVE, B.; ALA-AHO, P.; BERTRAND, G.; GURDAK, J. J.; KUPFERSBERGER, H.; KVÆRNER, J.; MUOTKA, T.; MYKRÄ, H.; PREDÄ, E.; ROSSI, P.; UVO, C. B.; VELASCO, E.; PULIDO-VELAZQUEZ, M. **Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems.** Journal of Hydrology, v. 518, p. 250-266, 2014.

LEE, S.; YEO, I. Y.; LANG, M. W.; MCCARTY, G. W.; SADEGHI, A. M.; SHARIFI, A.; JIN, H.; LIU, Y. **Improving the catchment scale wetland modeling using remotely sensed data.** Environmental Modelling & Software. Elsevier. p. 1 – 19, 2017.

LESAFFRE, B.; ZIMMER, D. **Subsurface drainage peak flows in shallow soil.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 114, n. 3, p. 387-406, 1988.

LES LANDES, A. A.; AQUILINA, L.; DE RIDDER, J.; LONGUEVERGNE, L.; PAGÉ, C.; GODERNIAUX, P. **Investigating the respective impacts of groundwater exploitation and climate change on wetland extension over 150 years.** Journal of Hydrology, v. 509, p. 367-378, 2014.

MACKLIN, M. G.; LEWIN, J. **The rivers of civilization.** Quaternary Science Reviews, v. 114, p. 228-244, 2015.

MCKILLOP, R.; KOUWEN, N.; SOULIS, E. D. **Modeling the rainfall-runoff response of a headwater wetland.** Water resources research, v. 35, n. 4, p. 1165-1177, 1999.

- MEYER, J. L. **Impacts of Climate Change on Aquatic Ecosystem Functioning and Health**. Journal of the American Water Resources Association, v. 35, n. 6, 1999.
- MITSCH, W. J.; GOSSELINK, J. G. **Wetlands**. Hoboken: Wiley – 4ª ed., 2007.
- MOTTA-MARQUES, D. M. et al. **O sistema Hidrológico do Taim**. PELD – CNPq. Dez anos do programa de Pesquisas de Longa Duração no Brasil: Achados, Lições e Perspectivas, p. 200-224, 2002.
- NERI-FLORES, I.; MORENO-CASASOLA, P.; PERALTA-PELÁEZ, L. A.; MONROY, R. **Groundwater and river flooding: The Importance of Wetlands in Coastal Zones**. Journal of Coastal Research, v. 92, p. 44-54, 2019.
- ÖZTÜRK, M.; COPTY, N. K.; SAYSEL, A. K. **Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed**. Journal of Hydrology, v. 497, p. 97-109, 2013.
- PAZ, A. R. **Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do Banhado do Taim (RS)**. 176 f. Dissertação. (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- PENMAN, H. L. **Weather, plant and soil factors in hydrology**. Weather, Wiley Online Library, v. 16, n. 7, p. 207–219, 1961.
- QUINTELA, F. M. et al. **High arsenic and low lead concentrations in fish and reptiles from Taim wetlands, a Ramsar site in southern Brazil**. Science of the Total Environment, v. 660, p. 1004–1014, 2019.
- SINGH, V. P. **Watershed modeling: Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications, p. 1–22, 1995.
- TAMISNKAS, J.; PILECKAS, M.; SIMANAUSKIENE, R.; LINKEVICIENE, R. **Wetland classification and inventory in Lithuania**. Baltica: The International Journal on Geosciences, v. 25, n. 1, p. 33-47, 2012.
- TASSI, R. **Gerenciamento hidroambiental de terras úmidas**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2008.
- THOMPSON, J. R. **Simulation of Wetland Water-Level Manipulation Using Coupled Hydrological/Hydraulic Modeling**. Physical Geography, v. 25, n. 1, p. 39-67, 2004.
- THOMPSON, J. R.; GREEN, A. J.; KINGSTON, D. G.; GOSLING, S. N. **Assessment of uncertainty in river flow projections for the Mekong River using multiple GCMs and hydrological models**. Journal of Hydrology, v. 480, p. 1-30, 2013.
- TINER, R. W. **Ecology of Wetlands: Classification Systems**, In **Encyclopedia of Inland Waters**. Edited by Gene E. Likens, Academic Press, Oxford, p. 516-525, 2009.
- USACE. Website disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/>> - acesso em 04 de junho de 2018, (2018).
- VERONES, F.; BARTL, K.; PFISTER, S.; VÍLCHEZ, R. J.; HELLWEG, S. **Modeling the Local Biodiversity Impacts of Agricultural Water Use: Case Study of a Wetland in the**

Coastal Arid Area of Peru. Environmental Science and Technology, v. 46, n. 9, p. 4966-4974, 2012.

VILLANUEVA, A. O. N. **Simulação de áreas de inundação dinâmicas: canais compostos e wetlands.** 164 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 1997.

VILLANUEVA, A. O. N.; MOTTA-MARQUES, D. M.; TUCCI, C. E. M. **The Taim Wetland Conflict: A Compromise Between Environment Conservation and Irrigation.** Water International, v. 25, n. 4, p. 610-616, 2000.

WILCOX, D. A.; XIE, Y. **Predicting Wetland Plant Community Responses to Proposed Water-level-regulation Plans for Lake Ontario: GIS-based Modeling.** Journal of Great Lakes Research, v. 33, p. 751-773, 2007.

YU, Y. et al. **Large-Scale Hydrological Modeling and Decision-Making for Agricultural Water Consumption and Allocation in the Main Stem Tarim River, China.** Water, v. 7, p. 2821–2839, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Figura A 1 - MDE integrado resultante para a região de interesse.



Fonte: Autor.