MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

ESTUDO NUMÉRICO DE INUNDAÇÕES NO ALTO VALE DO ITAJAÍ - SC

por

Aldair Forster

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, Agosto, 2019

Aldair Forster

“Estudo numérico de inundações no Alto Vale do Itajaí - SC”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área concentração: Modelagem Computacional.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Wiliam Correa Marques
Orientador – FURG

_____

Profª. Drª. Juliana Costi

Coorientadora - FURG

_____

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
FURG

_____

Prof. Dr. Samuel Beskow
UFPel

Rio Grande - RS
2019

AGRADECIMENTOS

O dia mais feliz da minha jornada nesse curso é, com toda a certeza, o dia em que escrevo esses agradecimentos, revendo minha trajetória, o quanto cresci e tudo que conquistei durante esses anos.

Inicio agradecendo a meus professores, desde os da infância até os do ensino superior, que sempre me incentivaram, ajudaram, motivaram, e por quem serei sempre grato por tudo o que aprendi com eles.

Aos meus pais, pelo estrutura, pelo apoio emocional e também financeiro. Sem o amparo de vocês nada disso seria possível.

Ao meus orientadores, Juliana e Wiliam, por aceitarem a desafio de orientar um projeto que eu mesmo não havia projetado.

Ao Raphael, que foi fundamental durante toda a minha estadia em Rio Grande, que me apoiou e suportou durante todos o tempo que estivemos juntos e a quem devo os melhores momentos durante os últimos 20 meses.

Aos colegas e amigos do LANSD por toda a assistência emocional e técnica durante o curso.

Às todas as novas amizades construídas em Rio Grande.

À FURG e ao PPGMC por toda a qualidade, estrutura e receptividade disponibilizados.

Agradeço também CAPES pela concesão da bolsa de estudos, ao CESUP pela disponibilidade dos cluster para rodagem das simulações, à ANA pelos dados fluviométricos e pluviométricos, ao Sistema de Informação Geográficas de Santa Catarina pela disponibilização do modelo de terreno, à defesa civil de SC pela batimetria dos rios. Ao André pelo excelente trabalho na identificação das inundações de 2013 e disponibilização do polígono usado na calibração do modelo e a ESA/Copernicus pelo provimento das imagens do satélite Sentinel-1 e aos reponsáveis pela criação e operacionalização do modelo TELEMAC2D.

E por último agradeço a todos que de alguma forma estiveram ligados às políticas direcionadas à criação e ao fortalecimento das instituições públicas de ensino brasileiro. Quem realmente vive a educação pública superior neste país entende a importância e a diferença dela inserida na sociedade enquanto instituição democrática, livre e autônoma.

RESUMO

Inundações são recorrentes em todo o mundo, e dentre os desastres naturais é o que mais causa perdas e danos. Em determinadas regiões, devido a alguns fatores como ocupação desordenada do solo ou alta incidência de tempestades, as inundações têm ocorrido com maior frequência, e mesmo a utilização de medidas estruturais como construção de diques e barragens ou desvios de cursos d'água muitas vezes não são suficientes para proteger a população e as propriedades. Diante desse cenário, é evidente que outras alternativas de prevenção precisam ser encontradas. Uma delas é a modelagem numérica das inundações, que tem se mostrado uma ferramenta eficiente para esse contexto, servindo de auxiliar para os sistemas de alerta e gerenciamento desses desastres assim como atuando no mapeamento e previsão de eventos. Nas cidades da microrregião do Alto Vale do Itajaí, em Santa Caarina, as cheias são recorrentes, e desde os períodos iniciais de colonização são presentes, logo um sistema para gerenciamento dos desastres, atuando na redução de danos, é indispensável. Procurando atender a essa demanda este trabalho tem como objetivo principal o estudo numérico da hidrodinâmica da região usando o modelo hidrodinâmico TELEMAC2D, que simula o escoamento superficial resolvendo as equações das águas rasas pelo método de elementos finitos, para simular a dinâmica de parte dos rios Itajaí do Sul, Itajaí do Oeste e Itajaí-Açú, com vistas à implementação deste como um sistema auxiliar no gerenciamento de recursos hídricos. O modelo foi calibrado utilizando medidas de extensão de inundação confiáveis, recolhidas em solo após a inundação ocorrida em 2013. A extensão da inundação foi simulada com com ajuste F de 0.80 aos dados observados e as vazões apresentaram coeficiente de Nash e Sutcliffe de 0.63, demonstrando grande acurácia. A validação da extensão ocorreu com o evento de 2017 e foi realizada com 50 imagens do sensor Sentinel-1, processadas com metodologias reconhecidas e amplamente utilizadas. Os resultados da validação dessa modelagem de inundação mostraram-se promissores e apresentam uma aplicação em escala local, numa região montanhosa, estudada com acurácia e detalhes não encontrados na literatura. Com o modelo calibrado e validado, as inundações de 2011 e 2013 foram mais detalhadamente estudadas, identificando padrões de extensão, duração e profundidade dos alagamentos nas áreas próximas da cidade de Rio do Sul, indicando as áreas mais ou menos propensas à desastres, de acordo com essas medidas. Os resultados encontrados apontam também que a utilização de um modelo digital de terreno com alta resolução é necessário para estudo de caso em pequena escala, e que mesmo com poucos dados batimétricos, a metodologia aliada a qualidade dos dados utilizados apresentou resultados precisos. Com as simulações realizadas e os resultados encontrados foi mostrado que o sistema pode ser base para o planejamento de uso ou ocupação do solo, como ferramenta para avaliação de danos e ainda apresenta a possibilidade de implementação como sistema de alerta na previsão de eventos.

Palavras-chaves: Modelagem de Inundação, TELEMAC2D, Hidrodinâmica, Gerenciamento,

Recursos Hídricos.

ABSTRACT

Floods are recurring all over the world, and among natural disasters is the most damaging. In certain regions, due to some factors such as disordered land occupation or high incidence of storms, floods have occurred more frequently, and even using structural measures such as levee and dam construction or watey way deviation may not be sufficient to protect the population and property. Given this scenario, it is evident that other alternatives of prevention need to be found. One of them is the numerical modeling of floods, which has proved to be an efficient tool for this context, serving as an auxiliary to the disaster warning and management systems, acting in the mapping and prediction of events. In the cities of the Upper Vale do Itajaí microregion, in Santa Catarina state, Brazil, floods are recurrent, and since the initial colonization periods are present and recurrent, a system for disaster management, acting to reduce damages, is indispensable. In order to meet this demand, this work has as main objective the numerical study of the hydrodynamics of the region using the hydrodynamic model TELEMAC2D, which simulates surface runoff by solving shallow water equations by the finite element method to simulate the dynamics of the rivers Itajaí do Sul, Itajaí do Oeste and Itajaí-Açú aiming to implement this as a water resources management system. The model was calibrated using reliable flood extension measures collected in soil post flood occurring in 2013. The extent of flooding was simulated with F adjustment of 0.80 to the observed data and flow rates showed a Nash and Sutcliffe coefficient of 0.63, demonstrating great accuracy. Extension validation occurred with the 2017 event and was performed with 50 Sentinel-1 sensor images, processed with widely used and recognized methodologies. The results of the validation of this flood modeling were promising and present an application on a local scale in a mountainous region, studied with accuracy and details not found in the literature. With the calibrated and validated model, the 2011 and 2013 floods were further studied, identifying patterns of flood length, duration and depth in the areas near the city of Rio do Sul, indicating areas more or less prone to disasters, according to with the measures described. The results also indicate that the use of a high resolution digital terrain model is necessary for small scale case studies and that even with few bathymetric data, the methodology combined with the quality of the other data used presented accurate results. With the simulations carried out and the results found it was shown that the system can be the basis for land use or land use planning as a tool for damage assessment and also presents the possibility of implementation as an alert system in the event forecast.

Palavras-chaves: Flood Modelling, TELEMAC2D, Hydrodynamics, Management, Water resources.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO **16**

1.1 Justificativa 18

1.2 Objetivo geral 19

2 REVISÃO DE LITERATURA **21**

2.1 Inundações 21

2.2 Modelos Numéricos 24

2.2.1 Modelos Hidrológicos 25

2.2.2 Modelos Hidrodinâmicos 26

2.2.3 Vantagens, limitações e avanços recentes nos modelos hidrodinâmicos . . 30

2.3 Modelagem de inundação em alguns países 34

2.3.1 Inundações na Austrália 34

2.3.2 Inundações na China 35

2.3.3 Inundações no Congo 36

2.3.4 Inundações na Alemanha, cooperação regional e internacional 37

2.3.5 Modelagem de inundações em Israel 38

2.3.6 Grã-Bretanha 39

2.3.7 Sistema Europeu para Inudação 40

2.3.8 Aplicações do TELEMAC2D 47

3 REGIÃO DE ESTUDO **49**

4 METODOLOGIA **53**

4.1 O TELEMAC2D 53

4.2 Dados 54

4.2.1 Delimitação do domínio 54

4.2.2 Dados Fluviométricos 55

4.2.3 Cenários de simulação 55

4.2.4 Dados Topográficos 56

4.2.5 Tratamento dos dados topográficos 58

4.3 Condições iniciais e de contorno 59

4.4 Calibração do modelo 59

4.5 Metodologia de análise dos resultados 61

4.5.1 Período de retorno 62

4.5.2 Padrões de Inundação 63

4.6 Imagens de sensoriamento remoto 63

4.6.1 Processamento das Imagens 64

5 RESULTADOS **67**
5.1 Calibração 67
5.1.1 Discussões dos resultados da calibração 68
5.2 Contribuições a respeito do Modelo Digital do Terreno 70
5.3 Validação do modelo 74
5.3.1 Extensão das inundações por imagens SAR 75
5.3.2 Resultados do modelo *versus* resultados das imagens SAR 76
5.3.3 Discussão dos resultados da validação do modelo 78
5.4 Mapeamento e estudo de padrões no escoamento 81
5.4.1 Mapeamento das áreas de inundação no ano de 2011 82
5.4.2 Mapeamento das áreas de inundação no ano de 2013 84
5.4.3 Contraste entre os eventos de 2011 e 2013 e análise padrões observados . 88
5.4.4 Períodos de retorno 90

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS **91**

7 Referências **94**

LISTA DE FIGURAS

1.1 Pessoas afetadas por inundações por continentes em 2010. (Di Baldassarre, 2012) 16
1.2 Número de inundações por continente Fonte: Miguez et al. (2017) 17

2.1 Esquema representativo de enchente e inundação. Fonte: Defesa civil de São Bernardo do Campo. 22
2.2 Representação do escoamento em um modelo 1D por seções transversais (Teng et al., 2017) 27
2.3 Diferentes malhas utilizadas nos modelos 2D. A: Malha estruturada. B: Malha não-estruturada. C: Malha flexível. (Teng et al., 2017) 29

3.1 Localização da Área de estudo 49
3.2 Perfil rio Itajaí Açú. Fonte: (Atlas, 1986) 50
3.3 Perfil rio Itajaí do Oeste. Fonte: (Atlas, 1986) 51

4.1 Série temporal com dados faltantes (topo) e com interpolação (base). Dados de vazão na cidade de Taió. 56
4.2 Localização das estações fluviométricas com dados coletados e finalidade de cada uma. 57
4.3 Malha de elementos finitos. Os círculos vermelhos apontam os locais de imposição das condições de contorno de vazão e no amarelo, condições de nível foram impostos. 60

5.1 Resultados das simulações de calibração *versus* polígono de verificação para o evento de 22 de setembro de 2013. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados amostrados em solo. Legenda: A representa a área simulada inundada e observada inundada. B representa omissões. C reporta as comissões. D representa a área simulada e observada seca. 69
5.2 Extensão da inundação no evento ocorrido em 2013 simulado com o DEM de alta resolução. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados amostrados em solo. Legenda: A representa a área simulada inundada e observada inundada. B representa áreas simuladas inundadas. C reporta as superestimações. D representa a área simulada seca. 71

5.3 Extensão da inundação no evento ocorrido em 2013 simulado com o DEM SRTM. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados amostrados em solo. Legenda: *A* representa a área simulada inundada e observada inundada. *B* representa áreas simuladas inundadas. *C* reporta as superestimações. *D* representa a área simulada seca. 72
5.4 Diferença entre os resultados obtidos com os dois diferentes modelos de terreno. *A*: Simulado inundado com o DEM SRTM e seco com o SCDEM. *B*: Simulado inundado com o SCDEM e seco com o SRTM. *C*: Concordância entre as simulações. 73
5.5 Vazões encontradas pelo modelo no período de 10 de outubro de 2016 até 09 de março de 2018. 74
5.6 Histograma da imagem de 06 junho de 2017 após a detecção de mudança. 76
5.7 Imagem SAR original e inudações encontradas para diferentes valores atribuídos a k. 77
5.8 Inudações encontradas para diferentes valores atribuídos a k depois da aplicação do filtro. 78
5.9 Inundação simulada *versus* observada em 06 de junho de 2017. Legenda: A reporta as comissões. B representa omissões. C representa a área simulada e observada seca. D representa a área simulada inundada e observada inundada. . 79
5.10 Vazões calculadas e observadas para o ano de 2011. As marcas coloridas representam os eventos de inundação registrados, e indicam os períodos de análise. . . 82
5.11 Resultados das extensões de inundações para os eventos ocorridos no ano de 2011. Legenda: A (azul) área simulada inundada; B (cinza) área simulada seca. 83
5.12 Dias de alagamento por região no período de inundações em 2011. 84
5.13 Profundidade máxima da água para o evento de 2011. 85
5.14 Resultados da simulação versus polígono de verificação. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados recolhidos em solo. Legenda: *A* representa a área simulada inundada e observada inundada. *B* representa omissões. *C* reporta as comissões. *D* representa a área simulada e observada seca. Detalhe das áreas com maiores comissões. 86
5.15 Vazões observadas *versus* vazões calculadas. 86
5.16 Dias de alagamento por região em no período de inundação em 2013. O polígono vermelho delimita a área de inundação. 87
5.17 Profundidade máxima atingida em cada região do domínio. 87
5.18 Diferença entre as profundidades máximas atingidas no ano 2011 e 2013. 88

LISTA DE TABELAS

1.1 Número de inundações por período 18

2.1 Resumo dos modelos hidrodinâmicos e suas aplicações. Adaptado de Pender (2006) 32
2.2 Dados de entrada e saída e estimativa do tempo computacional dos modelos hidrodinâmicos. Adaptado de Asselman et al. (2009) 33
2.3 Resumo da modelagem de inundação em alguns países. Adaptado de Adams e Pagano (2016) 44

4.1 Tabela resumo das estações da ANA utilizadas nesse trabalho 55
4.2 Períodos de estudo 56
4.3 Combinações de valores de fricção de *Manning* para cada solo. 61
4.4 Tabela de Contingência 61

5.1 Medidas de eficiência para as vazões calculadas 67
5.2 Medidas de extensão de inundação: Áreas de omissão, comissão e acerto. Medidas de eficiência para simulação da extensão. 68
5.3 Comparação das áreas simuladas com os dois diferentes DEMs 71
5.4 Estatísticas descritivas e medidas de eficiência para a simulação realizada no cenário 2. 75
5.5 Medidas de eficiência para as vazões simuladas em 2011. 82
5.6 Período de retorno para cada evento estudado. 90

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ANOVA	Analysis of variance.
CESUP	Centro Nacional de Supercomputação.
DEM	*Digital Elevation Model.*
DWD	*Deutscher Wetterdienst.*
EFAS	*European Flood Awareness System.*
ERCC	*Emergency Response Coordination Centre.*
FFC	*Flood Forecasting Centre.*
G2G	*Grid-to-Grid.*
HEC	*Hydrologic Enginering Center.*
HMS	*Hydrologic Modelling System.*
IHS	*Israel Hydrological Service.*
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
LANSD	Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos.
LiDAR	*Light Detection And Ranging.*
LNCC	Laboratório Nacional de Computação Científica.
MCSUL	Conferência Sul em Modelagem Computacional.
MGB-IPH	Modelo de Grandes Bacias - Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
MG	Minas Gerais.
MHD	Modelo Hidrológico Distribuído.
MOGREPS-UK	Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System.
ONS	Operador Nacional do Sistema.
PI	Piauí.
RAS	River Analyses System.
RJ	Rio de Janeiro.
RMSE	Root Mean Square Error.
RS	Rio Grande do Sul.
SAR	Synthetic Aperture Radar.
SC	Santa Catarina.
SCS - CN	*Soil Conservation Service - Curve Number.*
SHE	Systeme Hidrologique European.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
SISPSHI	Sistema de Previsão e Simulação Hidrológica do Iguaçú.
SPATSIM	*SPatial and Time Series Information Modelling.*
SRTM	*Shuttle Radar Topography Mission.*

SWAT	*Soil and Water Assesment Tool.*
SWFDST	*Surface Water Decision Support Tool.*
SWHIM	*Surface Water Hazard Impact Model.*
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
WAVOS	*Water Level Forecast System.*
WRF	*Weather Research and Forecasting.*

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos gregos

Δx	Distância entre seções transversais.
ϵ	Coeficientes de dissipação turbulenta.
$\vec{\nabla}$	Operador gradiente.
μ	Viscosidade cinamática (Pas).
ρ	massa específica do fluido (kg/m^3).

Outros Símbolos

a	Área de seção transversal (m).
A	Área observada e simulada inundada.
B	Área observada seca e simulada inundada.
C	Área observada inundada e simulada seca.
D	Área observada e simulada seca.
div	Operador divergente.
E	Medida de eficiência da modelagem de vazão.
F_1 e F_2	Medidas de eficiência.
g	Acelaração da gravidade (m^2/s).
h	altura (m).
k	Energia cinética turbulenta.
p	Pressão atmosférica (Pa).
Q	Vazão (m^3/s).
Q_m	Vazão média da amostra observada (m^3/s).
$Q_o(t)$	Vazão observada no tempo t (m^3/s).
$Q_s(t)$	Vazão simulada no tempo t (m^3/s).
R$	Reais.
S_0	Inclinação do leito.
S_f	Inclinação da fricção.
S_h	Fonte ou sumidouro do fluido (m/s).
S_T	Fonte ou sumidouro do traçador (g/l/s).
T	Temperatura (^{o}C).
t	Tempo (h ou s).
U	Velocidade média na seção transversal (m/s).
u	Velocidade na direção do vetor x (m/s).
v	Velocidade na direção do vetor y (m/s).
x	Dimensão espacial.
y	Dimensão espacial.

Z	Elevação da superfície livre (m).

1. INTRODUÇÃO

Desde o tempo em que as civilizações deixaram de ser nômades, os humanos têm se assentado majoritariamente em áreas próximas a corpos de água, que geralmente são propensas a inundações, como os conhecidos historicamente, povos da Mesopotâmia e do Egito, que se instalaram às margens dos rios Tigres e Eufrates, e Nilo, respectivamente. Isso é justificável, já que essas regiões apresentam boas condições para o desenvolvimento econômico, se forem consideradas, por exemplo, a agricultura e as navegações. Contudo, uma população se instalando em uma planície de inundação torna-se predisposta a desastres, que podem gerar vários danos econômicos com perdas materiais, do meio ambiente, e mesmo perda de vidas humanas.

Com a grande crescente populacional, áreas com risco de inundação continuam sendo ocupadas e mais pessoas vêm sendo atingidas. O estudo publicado pelo*Darthmouth Flood Observatory* [1] mostrou que existe uma forte relação entre o crescimento populacional e o aumento do número de inundações nessas áreas.

De acordo com Ohl e Tapsell (2000), desastres causados por inundações são responsáveis por metade das mortes causadas por catástrofes naturais. Em 2010, por exemplo, as inundações foram responsáveis pela perda de 8.000 vidas humanas e afetaram cerca de 180 milhões de pessoas ao redor do mundo (EM-DAT, 2010). A quantidade de pessoas afetadas nesse ano, em cada continente pode ser vista na Fig. 1.1.

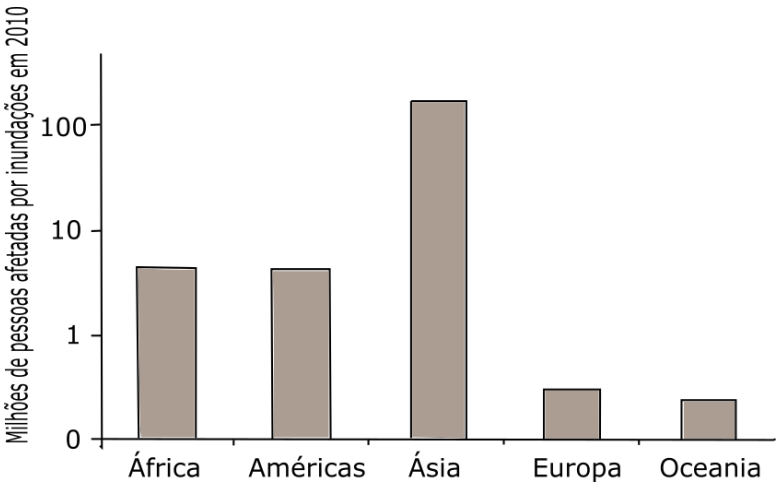


Figura 1.1 – Pessoas afetadas por inundações por continentes em 2010. (Di Baldassarre, 2012)

Segundo os dados históricos e a comunidade científica, essa situação tende a piorar. A emissão continuada de gases de efeito estufa causará mais aquecimento e mudanças duradouras em todos os componentes do sistema climático, aumentando a probabilidade de impactos severos, generalizados e irreversíveis para as pessoas e os ecossistemas (IPCC, 2014). Mujumdar e Na-

[1] *Dartmouth Flood Observatory (2010). Global Archive of Large Flood Events.* Disponível em: `www.dartmouth.edu/~floods`

gesh Kumar (2012) apontaram que a variabilidade nos padrões de precipitação é um dos três principais efeitos das mudanças climáticas. Na Fig. 1.2, por exemplo, é evidente o aumento no número de inundações em todos os continentes. Há um consenso global de que perdas com inundações podem crescer nos próximos anos por conta de muito fatores, como mudanças demográficas, condições tecnológicas e socioeconômicas, desenvolvimento industrial, expansão urbana, assentamento humano não planejado em áreas propensas a inundações, variabilidade e mudanças climáticas (Di Baldassarre, 2012).

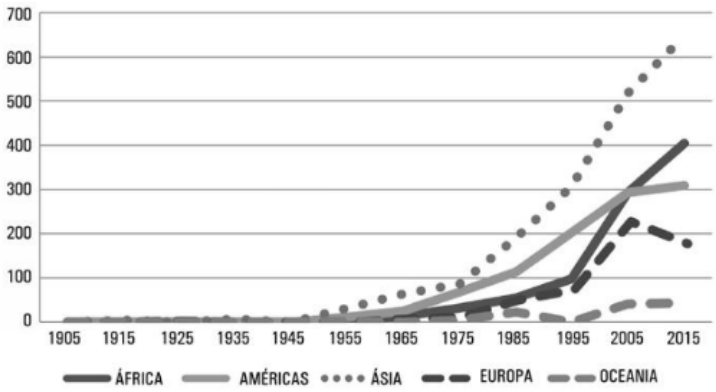


Figura 1.2 – Número de inundações por continente Fonte: Miguez et al. (2017)

Com toda essa demanda decorrente dos eventos de inundação, algumas ferramentas foram criadas para prever desastres com inundações, gerenciar os riscos e avaliar danos, dentre elas, os modelos numéricos.

Os modelos numéricos são ferramentas capazes de simular a hidráulica dos rios e processos de inundação de planícies (Horritt et al., 2007). Segundo Di Baldassarre (2012), esses modelos têm provado ser ferramentas úteis na previsão de desastres em tempo real, no gerenciamento de planícies de inundação, entendimento da dinâmica de sedimentos e mitigação de riscos. A habilidade de predição de extensão de inundação, por exemplo, pode ser usada para reduzir os danos potenciais das inundações: (i) apoiando um uso mais apropriado dos terrenos e o planejamento urbano, (ii) aumentando a consciência das pessoas que vivem em áreas propensas à inundação; (iii) desencorajando novos assentamentos humanos em planícies de inundação.

No Alto Vale do Itajaí, localizado no estado de Santa Catarina, os problemas com inundações são recorrentes, devido a paisagem da região formada por um relevo acidentado e encostas muito inclinadas, que formam pequenas várzeas em torno de ribeirões e rios, estão assim sujeitas a frequentes inundações. Tais características são resultantes de processos geológicos e climáticos (Aumond et al., 2008). Na tentativa de amenizar as perdas com inundações na região, foram construídas três barragens para contenção do escoamento de água. Contudo, as inundações continuam a atingir a população com frequência.

A modelagem hidrodinâmica é, atualmente, uma das melhores ferramentas para o estudo de inundações. Com dados de apenas um evento é possível que o modelo seja calibrado e com isso eventos de qualquer magnitude podem ser estudados com confiabilidade (Monteiro et al.,

2015). Diante disso, nesse trabalho procurou-se replicar eventos de inundação com o modelo numérico TELEMAC2D, que consite na simulação do escoamento superficial, calculado pela resolução numérica das equações das águas rasas através do método de elementos finitos.

Na maioria dos estudos de modelagem de inundações, há poucos dados para calibração e muitas vezes nenhum para validação do modelo. Este trabalho conta com uma aplicação de uma grande quantidade e qualidade de dados. As vazões e níveis utilizadas nas condições de contorno foram obtidas em intervalos horários. E com os recentes avanços no sensoriamento remoto, há uma maior quantidade de dados que podem ser utilizados na validação e avaliação dos modelos. Esse trabalho apresenta uma das primeiras aplicações das imagens de radar de abertura sintética do sensor Sentinel-1 para mapeamento de inundação e validação de um modelo hidrodinâmico, onde 50 imagens puderam ser processadas para detecção remota de áreas alagadas, o que era impensável antes da disponibilização dessas imagens.

Somado a isso, as contribuições de um modelo digital de terreno com alta resolução e dados batimétricos, permitiram que inundações em áreas montonhosas, em escala local, fossem modeladas e estudadas com riqueza de detalhes não encontrados na literatura científica.

Desta forma, algumas inundações dos rios que cruzam o Alto Vale do Itajaí nas cidades de Ituporanga, Aurora, Taió, Rio do Oeste, Laurentino e Rio do Sul foram estudadas, mostrando a aplicabilidade da metodologia e dados apresentados no trabalho, podendo auxiliar as autoridades locais no gerenciamento dos recursos hídricos e planejamento de uso de solo visando a tomada de decisões para a redução de danos.

1.1. Justificativa

A cidade de Rio do Sul, no estado de Santa Catarina, tem inundações registradas desde que os primeiros moradores da região se instalaram às margens dos rios que cruzam a cidade (Aumond et al., 2008). Com o passar dos anos essas inundações na região passaram a apresentar uma maior frequência, como observado na Tab. 1.1[2].

Tabela 1.1 – Número de inundações por período

Período	Número de Inundações
1910 a 1944	8
1945 a 1979	19
1980 a 2017	32

Mesmo com a construção de duas barragens de contenção de inundações, postas em operação na década de 1970, nos rios à montante da cidade (Santos et al., 2014), as inundações têm um crescimento evidente, em número, nos últimos anos. Ao analisar esse cenário, percebe-se que as medidas estruturais não estão sendo completamente efetivas. Logo, alternativas de prevenção não estruturais podem ser implementadas para a mitigação dos riscos causados pelas inundações. Uma dessas alternativas é a implementação de sistema de previsão de inundação, que

[2]Informação disponível em: `https://defesacivil.riodosul.sc.gov.br` Acesso em 29 de junho de 2018

pode ser utilizado pelos sistemas alertas como auxiliares na tomada de decisão (Organization, 2011).

Ao fazer uma análise sobre os prejuízos causados na região, foram encontrados relatórios de duas inundações, a de 2011 e 2013, com períodos de retorno de 21 e 7 anos, respectivamente. A primeira inundação teve um registro de cota do rio de 12.96 m na estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) presente na área urbana da cidade causada por uma precipitação acumulada de 306 mm[3]. Essa inundação teve prejuízos totalizando os R$ 101 423 824.00. Dos aproximados 60 000 habitantes, 50 000 foram atingidos, 10 320 ficaram desalojados e 2 580 desabrigados, com isso foi decretado estado de calamidade pública no munícipio. A inundação de 2013 alcançou a cota de 10.39 m, com uma precipitação de 131.1 mm. Nessa ocasião 690 pessoas ficaram desabrigadas, 8.010 desalojadas e foi decretado estado de emergência (da Silva e de Souza, 2016).

Diante disso, vê-se que a modelagem de inundação pode ser parte importante de um sistema de alerta e gerenciamento, que vem se mostrando uma boa alternativa para mitigação de riscos em vários locais do mundo (Adams e Pagano, 2016). Com as mudanças climáticas que vêm acontecendo, há ainda uma necessidade de que esses modelos sejam capazes de prever com acurácia e rapidez os fenômenos, para que alertas possam ser emitidos, e que as devidas providências preventivas possam ser tomadas (Di Baldassarre, 2012).

Portanto, esse trabalho foi conduzido com o intuito de modelar numericamente, com o modelo hidrodinâmico TELEMAC2D, a drenagem dos rios Itajaí do Sul e Itajaí do Oeste, à jusante das barragens que neles se encontram, até a cidade de Rio do Sul, onde é formado o rio Itajaí-Açú, visando o mapeamento da áreas propensas a inundação, avaliando padrões de inundação em diferentes eventos, analisando a suscetibilidade de ocorrência de alagamentos em diferentes partes do domínio estudado, auxiliando assim o gerenciamento local com informações que poderão ter impactos na redução das perdas ocasionadas por eventos de inundação na região. Com isso foram delineados os seguintes objetivos.

1.2. Objetivo geral

Estudar numericamente eventos históricos de inundação de rios da região do Alto Vale do Itajaí, em Santa Catarina, visando a calibração e validação do modelo para mapeamento de áreas inundáveis, provimento informações sobre a dinâmica fluvial que possa ser utilizada no gerenciamento dos recursos hídricos e planejamento de uso e ocupação do solo.

Objetivos Específicos

- Calibrar parâmetros do modelo TELEMAC2D específicos para a área de estudo;
- Modelar a hidrodinâmica local em diferentes ocasiões de inundação;
- Mapear as áreas propensas à inundação;

[3]Informações disponíveis em: `http://www.snirh.gov.br/hidroweb` Acesso em 01 de novembro de 2018.

- Analisar os padrões de diferentes eventos;
- Validar a modelagem com imagens do satélite Sentinel-1.

Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em capítulos, sendo que o primeiro contempla esta introdução, a justificativa e os objetivos da pesquisa. O segundo traz uma revisão bibliográfica onde aborda alguns conceitos que serão tratados durante o texto, um estudo do estado da arte sobre modelos que simulam inundações, focando nos modelos hidrodinâmicos. Na seção seguinte é apresentada uma visão geral da modelagem de inundação em alguns países, apontando diferentes abordagens e mostrando possibilidades em diferentes contextos. O terceiro capítulo apresenta a área de estudo, sua importância econômica para o estado e descreve as características físicas do local, enfoca a temática das inundações e termina abordando o regime pluviométrico e sua variabilidade. O quarto capítulo apresenta a metodologia do trabalho, apresenta o equacionamento do TELEMAC2D, a forma como foi realizada a calibração e validação do modelo, assim como como foram estudados os padrões de inundações. No quinto capítulo são apresentados os resultados e discussões acerca do desempenho do modelo, seguido pela seção de considerações finais. Na última seção encontra-se o referencial bibliográfico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão de literatura, conceituando e definindo alguns termos recorrentes no texto, tratando dos diferentes tipos de modelos de numéricos utilizados no gerenciamento de eventos de inundação encontrados na literatura, e enfocando no estado da arte dos modelos hidrodinâmicos. Na seção 2.3 é apresentada a pesquisa em relação ao tema no Brasil e em outros países, e ao final do capítulo são resumidos alguns resultados já encontrados pelo modelo em aplicações em rios de diferentes cenários.

2.1. Inundações

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (Organization, 2011), as inundações podem ser definidas como:
i) aumento, geralmente breve, do nível de água em um escoamento para um pico a partir do qual o nível de água recua em uma taxa mais lenta.
ii) escoamento relativamente elevado conforme medido por estágios de altura ou descarga,
iii) maré alta, ou ainda,
iv) transbordamento de água dos limites normais de uma corrente ou outro corpo de água em áreas que não são normalmente submersas.

Muitas vezes inundações e enchentes são tratadas como sinônimos, mas nesse trabalho elas serão conceituadas de acordo com Carvalho et al. (2007) que definem enchente como a elevação temporária do nível de água em um canal de drenagem devida ao aumento da vazão ou descarga, por outro lado, estes autores definem a inundação como sendo o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundação, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge uma cota acima do nível máximo da calha principal do rio. Além disso, alagamentos são aqui tratados como acúmulo de água em algum local devido a falta de drenagem. A Fig. 2.1[1] aponta essas diferenças. Assim pode ser percebido que uma enchente pode afetar pessoas que se alojaram na área pertencente ao leito do rio, mesmo que essa área não esteja sempre alagada.

No decorrer do texto alguns outros termos serão recorrentes, e suas definições aqui utilizadas também estão de acordo com Carvalho et al. (2007)

PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO: áreas marginais que recebem episodicamente os excessos de água que extravasam do canal de drenagem.

ENXURRADA: escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte.

ÁREA DE RISCO DE ENCHENTE E INUNDAÇÃO: terrenos marginais e cursos de água ocupados por assentamentos habitacionais precários, que estão sujeitos ao impacto direto de processos de enchentes e inundações.

[1]Fonte: Defesa civil de São Bernardo do Campo. Disponível em: `http:\//dcsbcsp.blogspot.com`. Acesso em 17 de agosto de 2018.



Figura 2.1 – Esquema representativo de enchente e inundação. Fonte: Defesa civil de São Bernardo do Campo.

VAZÃO: quantidade de água que passa por uma dada seção em um canal de drenagem num período de tempo.

As inundações podem ocorrer por diversos fatores, e de acordo com esses fatores, recebem diferentes classificações. De acordo com o *International Glossary of Hydrology* WMO (2012), suas classificações são:

- INUNDAÇÃO REPENTINA (*Flash Floods*): são inundações de curta duração, com pico de descarga relativamente alto. Ocorrem frequentemente associadas com tempestades de curta duração em pequenas áreas. Esse tipo de inundação geralmente destrói casas, pontes e estradas. Elas podem ocorrer também em áreas que passaram por longos períodos de seca.
- INUNDAÇÃO FLUVIAL: pode ocorrer em diversos rios e sistemas de captação. Em rios em vales, elas ocorrem, na maioria das vezes em planícies de inundação, como resultado do escoamento que excede a capacidade do canal, se espalhando sobre os bancos naturais ou artificiais.
- EVENTO ISOLADO DE INUNDAÇÃO (*Single Event Flood*): é o tipo mais comum e ocorre quando há chuva intensa durante várias horas, ou alguns dias sobre uma bacia. Tipicamente essas chuvas intensas estão associadas com ciclones ou tempestades de latitude média.
- EVENTOS MÚLTIPLOS DE INUNDAÇÃO: resultam de fortes precipitações associados com sucessivos distúrbios climáticos.
- INUNDAÇÃO SAZONAL: ocorre com regularidade como resultado de maior aluvidade de precipitação sazonal.
- INUNDAÇÕES COSTAIS: são causadas tipicamente por tempestades e ventos fortes associados com maré alta.
- INUNDAÇÃO URBANAS: ocorre devido a grandes precipitações em cidades, quando o sistema não é suficiente para drenar a água. Mais detalhes desse tipo de inundação são dados na próxima seção.
- INUNDAÇÃO POR DERRETIMENTO DE NEVE: em planaltos, ou áreas de altas latitudes, a neve acumula durante o inverno, e o degelo da primavera produz o escoamento de

água devido ao derretimento. Se a temperatura aumentar rapidamente, o derretimento pode produzir inundações que podem se estender para as áreas mais baixas do sistema.

Como visto, as inundações podem ocorrer por causa de diversos fatores, e geralmente causam perdas onde acontecem. Para que esses riscos sejam minimizados, a previsão de inundações se mostra um importante instrumento para órgãos governamentais atuarem de forma mais eficaz na mitigação dos danos causados, considerando que nem sempre as medidas preventivas ou de defesa (como construção de barragens) existam ou sejam completamente efetivas.

De acordo com Organization (2011), o gerenciamento de inundação requer respostas das agências de gestão de águas, autoridades locais ou municipais, onde são requisitadas operações de transporte, comunicação e serviços de emergência. A previsão de inundação tem como prover informações para esses usuários, na preparação para níveis de risco mais extremos, portanto a previsão de inundação é parte indispensável no gerenciamento de desastres. Além disso, é uma medida não-estrutural, considerada barata, e que integrada a um sistema de alerta pode ter consideráveis resultados na mitigação perdas.

Inundações Urbanas

As inundações em áreas urbanas estão tendo um aumento no número de ocorrências e são devidas principalmente à ocupação indevida de planícies alagáveis. Com as projeções populacionais para os próximos anos, esses números tendem a aumentar. De acordo com *Departament of Economic and Social Affairs* (Division, 2018), espera-se que em 2050 a população mundial ultrapasse os 9.7 bilhões, e que a população urbana, que hoje representa cerca de 55% do total, venha a ser 68%[2].

A urbanização continuada de planícies de inundação naturais têm causado perdas de vidas e danos a propriedades, além disso, com essa tendência de aumento alarmante de ocupação desses locais, a necessidade de avanços no gerenciamento de recursos hídricos urbanos é evidenciada.

A hidrologia urbana tem características particulares, dentre elas, a existência de grandes áreas impermeáveis, ou semi-impermeáveis, e a coexistência de sistemas de drenagem natural e artificial (por exemplo, esgotos, diques e bacias de detenção). Como consequência dessas características, a produção de escoamento superficial por precipitação é altamente variável e não homogênea, aumentando o escoamento de água e acelerando a difusão de contaminantes. As precipitações em áreas urbanas geram escoamentos altamente variáveis no tempo e espaço, estes espaços não "amortecem" significativamente essas flutuações (Organization, 2011).

Em geral, as inundações urbanas podem resultar de duas causas. Primeiro, áreas urbanas podem ser inundadas pelos rios que às cruzam, e estas podem ser antecipadas por previsões advindas das estações hidrométricas a montante da cidade no rio. Em segundo plano, inundações urbanas podem ocorrer de enxurradas localizadas. Nesse último caso, precipitações intensas em áreas urbanas podem causar inundações repentinas em estradas e propriedades em áreas

[2]Informação também disponível em `https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html` Acesso em 17 de agosto de 2018.

baixas, em córregos ou áreas abaixo do nível do solo, como metrôs, e geralmente tais inundações são agravadas por acúmulo de detritos (Organization, 2011).

Para a utilização de modelos hidrodinâmicos em áreas urbanas, são necessários três fontes de dados essenciais. São eles, topografia, fricção superficial e condições de contorno com referências específicas para áreas urbanas (Di Baldassarre, 2012).

A modelagem hidrodinâmica em áreas urbanas exige uma qualidade de dados topográficos maior do que em áreas rurais. Mas é passível de serem realizadas atualmente devido aos recentes avanços na tecnologia de obtenção de Modelos Digitais de Elevação (DEM), obtidos de altimetria laser (LiDAR) e uso de sonar para obtenção da batimetria do canal, e com estes muitas incertezas inerentes ao processo de modelagem de inundação vêm sendo reduzidas (Di Baldassarre, 2012).

Devido ao desenvolvimento urbano, à remoção de árvores, e ocupação do solo com superfícies impermeáveis, como já exposto, há alguns impactos na superfície hidráulica como aumento da velocidade de escoamento, além disso, os valores de fricção podem ser diferentes dos valores de áreas rurais. Em áreas rurais, LiDAR detalhados retornam informações que podem ser usadas para a parametrização da fricção para os modelos, que pode ser estendida para toda a grade, e com isso é reduzida a necessidade de calibração do modelo hidráulico. Di Baldassarre (2012), considera que esse procedimento pode ser realizado em áreas urbanas com informações detalhadas de uso de solo obtidas de mapeamento digital. Contudo, conforme apontou o autor, tal método assume que a fricção média (área/matéria) é a única resistência friccional significante para a vazão em escala de grade, o qual pode não ser o caso.

Ainda estudando valores de fricção, outros autores (Hughes et al., 2006a) notaram que valores de fricção em escalas grosseiras podem não ser fisicamente baseados, mas podem ser parâmetros efetivamente verdadeiros que não são facilmente determinados a priori. Mais ainda, a classificação de uso de solo e valores empiricamente determinados da literatura para atribuir valores de fricção, podem não ter significado, se as formulações de fricção, como os coeficientes de Manning ou de Chezy, forem derivados de rios específicos, desta forma, estes valores não devem ser usados fora desse contexto.

Portanto, apesar de dados de topografia e topologia poderem prover uma direção para os valores de fricção, esses valores são inerentemente parâmetros de calibração, e segundo Hughes et al. (2006a), onde for possível, devem ser tratados como tal em qualquer abordagem de modelagem.

2.2. Modelos Numéricos

Devido às casualidades ocorridas na história humana, há um esforço para se entender e prever eventos de inundação e seus impactos. A partir dessa premissa, modelos foram e estão sendo desenvolvidos para atender a esse propósito. Esses modelos são amplamente utilizados para a criação de mapas de risco de inundação, avaliação de danos, previsão de enchente e inundação em tempo real, planejamento de recursos hídricos, e além disso, estes modelos têm

sido utilizados como pré-requisitos para investigar a erosão costeira, o transporte de sedimentos, a ecologia de planícies de inundação, a qualidade da água, entre outros (Teng et al., 2017).

Diferentes modelos atendem a diferentes propósitos, exigem dados diferenciados, têm formas diversas de serem apresentados, e além disso apresentam resultados diferenciados. Existe uma gama de modelos numéricos e eles são geralmente classificados como modelos hidrológicos ou hidrodinâmicos/hidráulicos[3].

Os modelos com rotinas hidrológicas são amplamente empíricos e focados na relação entre os hidrogramas em seções a montante e a jusante de um trecho de um canal, já rotinas hidráulicas ou hidrodinâmicas geram uma descrição mais fisicamente baseada da dinâmica do escoamento, por exemplo, a velocidade e a profundidade como funções da distância e do tempo (Organization, 2011). Mais detalhes sobre as duas formas de modelagem seguem nas seções seguintes.

2.2.1. Modelos Hidrológicos

Atualmente vários modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos para avaliar o impacto do clima e propriedades do solo nos recursos hídricos. Para esses modelos, as entradas geralmente são a precipitação, a temperatura do ar, as características do solo, a topografia, os dados referentes a cobertura vegetal, dentre outros parâmetros físicos (Mujumdar e Nagesh Kumar, 2012).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados como modelos distribuídos ou modelos concentrados, baseando-se nos parâmetros de espaço. Se o modelo considera o espaço como derivado, então é classificado como distribuído, se não, são considerados como modelos concentrados (Mujumdar e Nagesh Kumar, 2012).

Os modelos hidrológicos geralmente operam em escala de bacia e desempenham um papel importante no entendimento de uma série de problemas que lidam com recursos hídricos, e extremos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Esses problemas podem ser, por exemplo, a magnitude e a duração de descargas para precipitações em intensidades e durações específicas, movimento de uma onda de inundação ao longo da extensão de um rio, depósito de sedimentos, erosão de costa, etc (Mujumdar e Nagesh Kumar, 2012).

Devia et al. (2015) classificaram os modelos hidrológicos como modelos determinísticos ou estocásticos. Modelos determinísticos fornecem a mesma saída para um único conjunto de valores de entrada, enquanto que nos modelos estocásticos, podem ser produzidos diferentes valores de saída para um único conjunto de entradas.

Existem várias outras classificações para os modelos hidrológicos como as apontadas por Devia et al. (2015) ou ainda as definidas por Mujumdar e Nagesh Kumar (2012). Mas, a classificação mais recorrente dos modelos hidrológicos, e que será mais discutida, é a classificação em modelos empíricos, modelos conceituais e modelos fisicamente baseados, conforme pontuado por Devia et al. (2015).

[3]Os modelos hidrodinâmicos e hidráulicos são tratados como sinônimos neste texto.

Os modelos empíricos são modelos orientados pela observação, que levam apenas a informação dos dados existentes, sem considerar os recursos e processos do sistema hidrológico. Para a construção desse tipo de modelo, são usadas equações matemáticas, derivadas de séries temporais de entrada e saída, e não de um processo físico de captação. Métodos estatisticamente baseados usam modelos de regressão e correlação e são utilizados para encontrar uma relação funcional entre as entradas e saídas. Redes neurais artificiais e regressão Fuzzy são algumas das técnicas de aprendizagem de máquina, usadas nesse contexto e que vêm tendo resultados mais satisfatórios devido a evolução da hidroinformática[4].

Os métodos conceituais ou modelos paramétricos descrevem todos componentes do processo hidrológico. Ele consiste em um número de reservatórios interconectados que representam os elementos físicos em uma bacia, onde são recarregados pela chuva, infiltração e percolação, e são esvaziados pela evaporação, vazão, drenagem, etc. Equações semi-empíricas são utilizadas nesse método e os parâmetros do modelo são avaliados não somente por dados de campo, mas também de calibração. A calibração envolve o ajustamento da curva, fato que dificulta a interpretação, e portanto, o efeito da mudança de uso de solo não pode ser prevista com muita confiança (Mujumdar e Nagesh Kumar, 2012).

Os modelos fisicamente baseados são uma representação matemática idealizada de um fenômeno real. Eles também são chamados de modelos mecânicos, pois incluem os princípios dos processos físicos. Eles usam variáveis de estado que são mensuráveis e são funções de tempo e espaço. Os processos hidrológicos do movimento da água podem ser representados por equações diferenciais. Esses modelos não requerem dados hidrológicos ou meteorológicos extensivos para sua calibração, mas a estimativa de um grande número de parâmetros descrevendo as características físicas da bacia são necessários. Nesse método, grande quantidade de dados como: teor de umidade do solo, profundidade inicial da água, topografia, topologia, dimensão da rede fluvial, são necessários. Modelos físicos podem superar muitos defeitos dos outros modelos hidrológicos, por causa do uso dos parâmetros tendo interpretação física. Eles podem fornecer uma grande quantidade de informação, mesmo fora dos limites, e podem ser aplicados à uma ampla gama de situações (Mujumdar e Nagesh Kumar, 2012).

Alguns exemplos de modelos fisicamente baseados, já operacionais, são o SWAT *(Soil and Water Assesment Tool)* e o modelo MIKE SHE *(Systeme Hidrologique European)*. Detalhes, formas de uso e resultados obtidos por esses modelos podem ser encontrados respectivamente em Gassman et al. (2007) e Graham e Butts (2005).

2.2.2. Modelos Hidrodinâmicos

São modelos matemáticos que tentam replicar o movimento de fluidos e requerem solução computacional. Esses modelos simulam o movimento da água resolvendo equações formuladas pela aplicação de leis da física. Dependendo da resolução espacial do escoamento na planície

[4]"integração de hidráulica computacional com a inteligência artificial" fonte: `http://www.hidroinformatica.org/index.php/es/base-de-archivos/publicaciones-y-articulos/169-o-que-e-hidroinformatica` acesso em 04 de junho de 2018

de inundação os modelos podem ser agrupados por dimensionalidade, em unidimensional (1D), bidimensional (2D) ou tridimensional (3D).

Modelos 1D

A representação mais simples do escoamento nas planícies de inundação é tratar o escoamento como unidimensional ao longo de uma linha central do canal do rio (Brunner, 2016). Modelos 1D podem ser usados em sistemas em que não é necessária uma solução detalhada, ou seja, não são requeridos conhecimentos das outras dimensões. Eles podem ser usados para modelar o escoamento em planícies de inundação nos casos em que o escoamento da planície é parte do escoamento do canal unidimensional assumido para estar em uma direção paralela ao canal principal. Nestes casos, uma velocidade média em uma seção transversal é usada para representar grandes variações na velocidade através da inundação. A Fig. 2.2 mostra um exemplo da representação do escoamento em um modelo 1D por uma série de seções transversais.

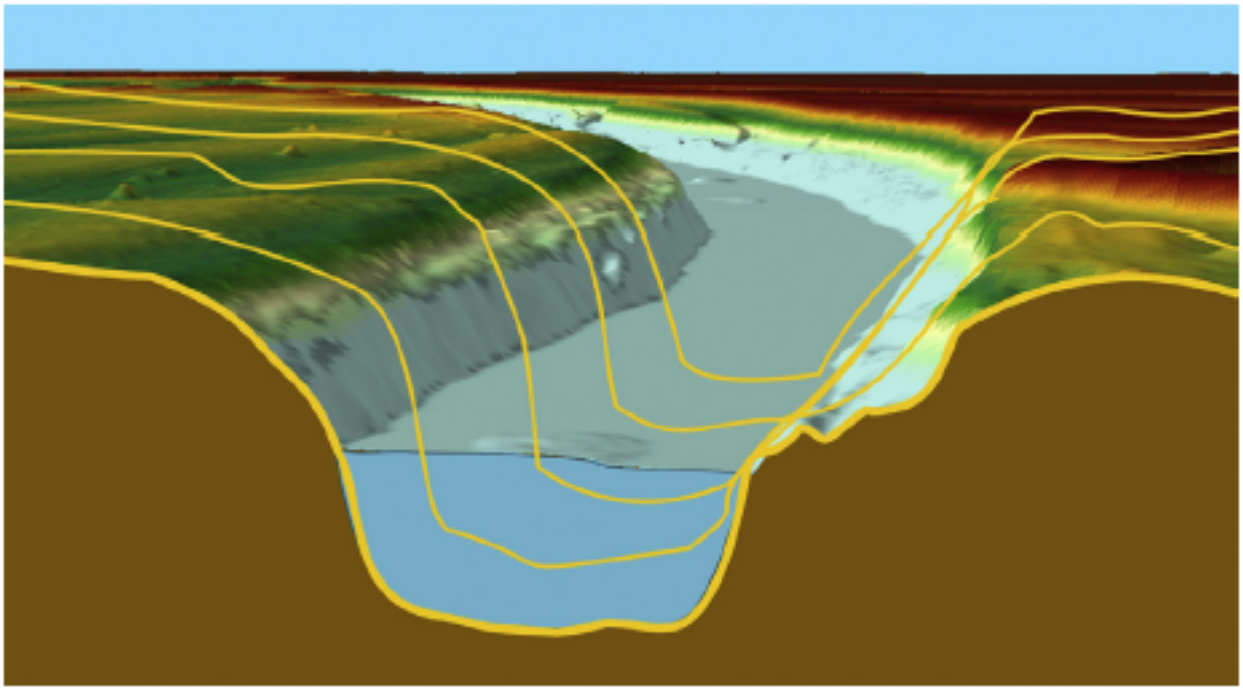


Figura 2.2 – Representação do escoamento em um modelo 1D por seções transversais (Teng et al., 2017)

Geralmente, os modelos 1D resolvem equações garantindo a conservação da quantidade de movimento (Eq. (2.2)) e a equação de continuidade (Eq. (2.1)), entre duas seções transversais Δx separadas, que produzem as equações de Saint-Venant unidimensionais. (Di Baldassarre, 2012).

$$\text{Equação de continuidade} \qquad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial t} = 0 \tag{2.1}$$

$$\text{Conservação da quantidade de movimento} \quad \frac{1}{a}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{a}\frac{\partial (Q^2/a)}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.2)$$

onde Q (m^3/s) é a descarga do escoamento, com $Q = Ua$, onde u (m/s) é a velocidade média na seção transversal e $a(m^2)$ é a área da seção transversal. t (s) é o tempo, h (m) a profundidade da água, g (m/s^2) é a aceleração da gravidade, s_f é o coeficiente de fricção e S_0 é a inclinação do leito. As equações 2.1 e 2.2 não tem solução analítica, mas podem ser resolvidas usando técnicas numéricas. A solução dessas equações compreende estimativas de Q e h para cada seção transversal em cada passo de tempo.

Modelos 2D

Os modelos 2D representam o escoamento na planície de inundação como um campo bidimensional com a suposição de uma terceira dimensão (profundidade da água), que deve ser rasa se comparada às outras duas dimensões. Muitas abordagens resolvem as equações de águas rasas bidimensionais, as quais representam conservação da quantidade de movimento (Eq. (2.4)) e (Eq. (2.5)) e de continuidade (Eq. (2.3)) em um plano e pode ser obtida pela média de profundidade das equações de Navier-Stokes. (Teng et al., 2017)

$$\text{Equação de continuidade} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{Conservação da quantidade de movimento} \quad \frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + \frac{\partial (uhv)}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t} + \frac{\partial (huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) = 0 \quad (2.5)$$

Onde x e y são as duas dimensões espaciais e o vetor (u, v) é a velocidade média horizontal na coluna de água. As soluções dessas equações compreendem estimativas de u, v e h ao longo do espaço e do tempo, e assim como na abordagem unidimensional, as equações de águas rasas bidimensional, não tem solução analítica.

Dependendo da estratégia de discretização numérica, esses modelos podem ser classificados em métodos de elementos finitos, diferenças finitas ou volumes finitos. De acordo com a discretização no tempo, os modelos podem ser divididos em implícitos ou explícitos. Em termos de resolução espacial, os modelos podem usar malhas estruturadas ou não estruturadas, e mais recentemente malhas flexíveis. Essas diferenças na discretização do espaço podem ser vistas na Fig. 2.3.

Os modelos hidrodinâmicos 2D são, talvez, os mais utilizados em mapeamento de extensão

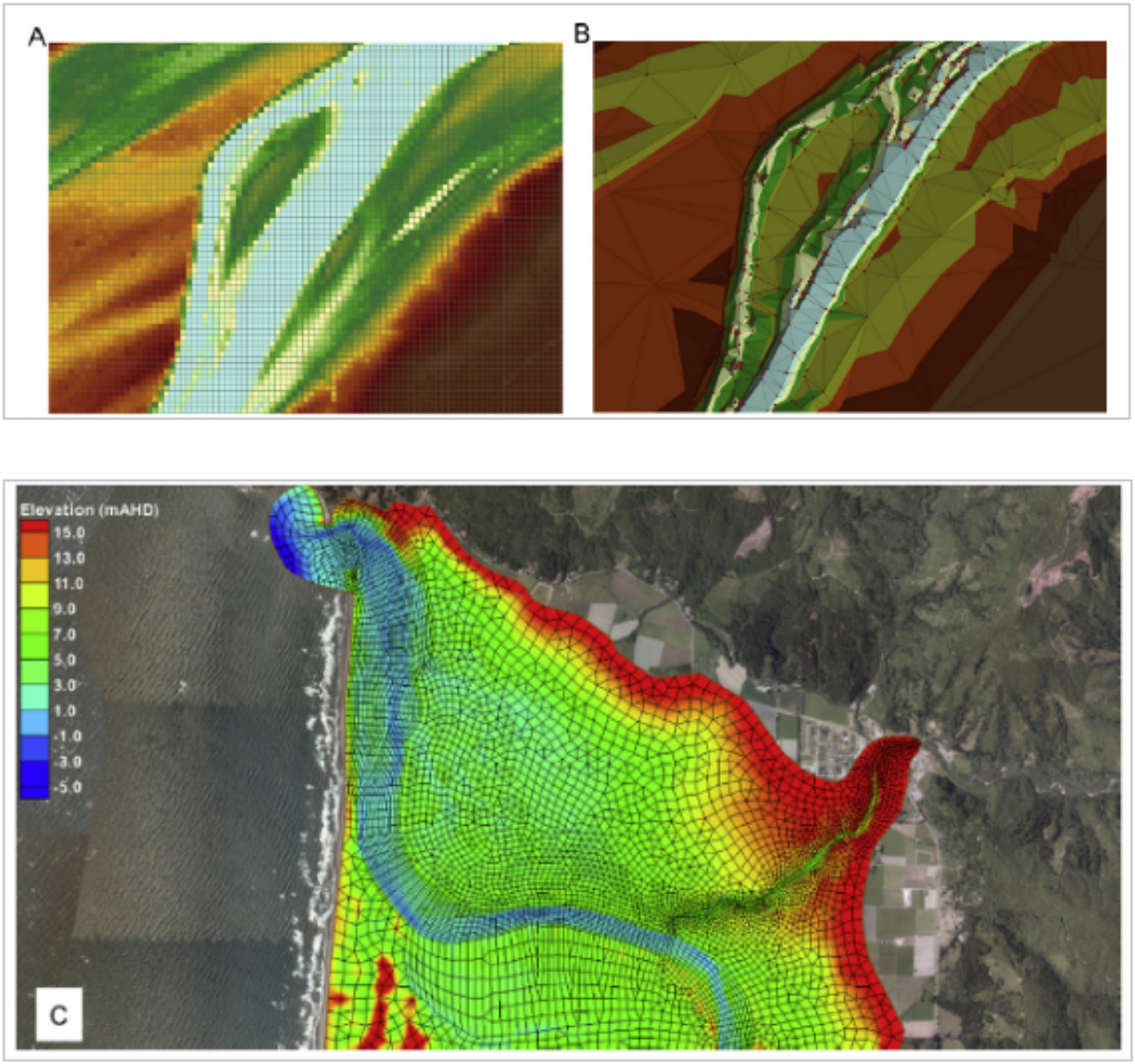


Figura 2.3 – Diferentes malhas utilizadas nos modelos 2D. A: Malha estruturada. B: Malha não-estruturada. C: Malha flexível. (Teng et al., 2017)

e estudos de estimativa de riscos de inundação. Estudos mais detalhados (Néelz e Pender, 2013) dos modelos 2D foram realizados recentemente e contém mais detalhes acerca desses modelos.

Modelos 3D

Para muitas escalas de escoamento em planícies de inundação, representações tridimensionais complexas da dinâmica dos fluidos têm sido consideradas desnecessárias, já que as aproximações bidimensionais das águas rasas se mostraram mais adequadas, especialmente dado o tipo e qualidade dos dados disponíveis para a construção e validação do modelo (Alcrudo, 2002).

Contudo, modelagem de turbulência vertical, vórtices, e escoamento espiral em curvas são importantes durante catástrofes com inundações, tais como as ocorridas pela quebra de bar-

ragens, enchentes repentinas, e rupturas de diques. Modelos 3D são, portanto, desenvolvidos para permitir a representação de características verticais. Alguns modelos 3D resolvem as equações 2D de águas rasas e incluem uma extensão semi-3D para modelar a velocidade vertical. Outros modelos são derivados das equações tridimensionais de Navier-Stokes, que descrevem o movimento de substâncias fluidas e são geralmente escritas como (Teng et al., 2017):

$$\text{Equação da continuidade} \qquad \nabla \cdot u = 0 \tag{2.6}$$

$$\text{Conservação da quantidade de movimento} \qquad \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u + \frac{1}{\rho}\nabla p = g + \mu \cdot \nabla u \tag{2.7}$$

Onde $u(m/s)$ é a velocidade, $\rho(kg/m^3)$ é a massa específica do fluido, $p(Pa)$ é a pressão, $g(m/s^2)$ é a aceleração da gravidade, $\mu(Pas)$ é a viscosidade cinemática.

A aplicação de modelos 3D na modelagem de inundação não é considerada viável em grande escala *(>1 km)* sendo limitada pela viabilidade computacional e a problemas de representação precisa de escoamentos livres em superfícies de turbulência de ordem alta. Contudo, essa limitação tem sido diminuída nos anos recentes devido aos avanços nas técnicas computacionais (Teng et al., 2017).

2.2.3. Vantagens, limitações e avanços recentes nos modelos hidrodinâmicos

Os modelos 1D são computacionalmente eficientes, mas sofrem por desvantagens incluindo: *i)* falta de capacidade de simular a difusão lateral da onda de inundação; *ii)*: a discretização da topografia como seções transversais ao invés de uma superfície contínua; e *iii)*: com a subjetividade da localização e orientação das seções transversais (Teng et al., 2017).

Os avanços encontrados nos modelos 1D são, principalmente, sua capacidade de serem acoplados com modelos 2D, melhorando assim o tempo computacional deste último. Liu et al. (2015) mostraram que acoplando um modelo 1D para simular o escoamento dentro do canal e um modelo 2D para a planície de inundação em uma região de topografia acidentada, foram obtidos mapas de extensão de inundação com boa acurácia para o estudo de caso feito.

Os modelos 2D são capazes de simular o tempo e a duração da inundação com alta precisão, mas são computacionalmente intensivos e são considerados inviáveis para áreas maiores que 1.000 km^2 quando a resolução requerida é menor que 10 m e/ou em uma abordagem probabilística requerendo múltiplas simulações, onde o tempo para realizar cada uma das simulações será provavelmente longo (Teng et al., 2017).

Com relação aos modelos 2D (Néelz e Pender, 2013) e (Néelz et al., 2010) mostraram que eles são capazes de prever adequadamente variáveis como velocidade, extensão da inundação e nível de água, sobre as quais o gerenciamento de risco se baseia, mas os mesmos estudos mostraram grandes diferenças nos resultados dos modelos, especialmente para previsões feitas usando acoplamento de um modelo 1D para o rio e 2D para a planície de inundação. Isso

traz incertezas dos resultados dos modelos para o foco das discussões. Com relação à essas diferenças alguns fatores já podem ser preliminarmente avaliados.

Conforme apontado por Di Baldassarre et al. (2009), diferentes modelos podem requerer diferentes parâmetros, como os termos de fricção por exemplo, que não precisam ter necessariamente um sentido físico, mas podem ser calibrados para cada modelo. Então se valores iguais são usados para diferentes modelos, essa já pode ser uma das causas de divergência. Obviamente essa é apenas uma suposição inicial e estudos de incertezas, dos modelos e dos dados iniciais, devem ser focalizados pelos usuários dos modelos.

Os modelos 2D têm recebido muita atenção nas pesquisas das últimas décadas. Muitos trabalhos se dedicaram a desenvolver modelos numéricos bidimensionais para escoamentos rasos instáveis através de várias técnicas usando diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos. Para reduzir a complexidade e o tempo de simulação, algumas simplificações das equações de águas rasas estão sendo feitas em alguns modelos, onde são omitidos alguns termos, resultando em aproximações de onda cinemática ou difusiva (Teng et al., 2017).

Em síntese, os modelos hidrodinâmicos apresentam vantagens de ter conexão direta com a hidrologia, produz mapas detalhados de risco de inundação, considera as estruturas hidráulicas, quantifica o tempo e a duração da inundação com alta precisão. Entretanto são limitados pela alta necessidade de dados, além disso, são computacionalmente intensivos, e erros nas entradas do modelo podem se propagar no tempo. Desta forma os modelos hidrodinâmicos são aptos a fazer avaliações dos riscos e danos de inundação, fazer previsão em tempo real, prover recursos para planejamento hídrico, avaliar erosão e transporte de sedimentos e contaminantes.

Como visto anteriormente, os modelos hidrodinâmicos são agrupados por dimensionalidade e são utilizados de acordo com a necessidade ou selecionados pela disponibilidade de dados, além disso, fornecem resultados diferenciados e tem tempo de simulação diferentes. A seguir, as tabelas 2.1 e 2.2 apresentam um resumo dos modelos hidrodinâmicos e suas aplicações, assim como os dados de entrada necessários para cada um, os produtos do modelo e uma estimativa do tempo computacional.

Tabela 2.1 – Resumo dos modelos hidrodinâmicos e suas aplicações. Adaptado de Pender (2006)

Modelo Hidrodinâmico	**Descrição**	**Exemplos de software**	**Potencial aplicação**
1D	Solução das equações 1D	Mike 11, HEC-RAS	Modelagem em larga escala que pode variar de a centenas de km dependendo da área de captação. Também tem potencial para utilização em larga escala se usado com seções transversais esparsas.
2D	Solução das equações das águas rasas	LISFLOOD-FP, CA model TUFLOW, Mike 21, TELEMAC2D	Modelagem de inundação urbana. Pode ter uso em larga escala, se aplicado em grades com resolução grosseira.
3D	2D mais a solução de velocidade vertical usando somente continuidade ou Solução das equações 3D Reynolds e Navier-Stokes	TELEMAC3D, CFX, FLUENT, PHOENIX	Predominantemente usado aplicações em modelagem costeira, onde os perfis de velocidade são importantes. Tem sido aplicado também em projetos de pesquisa em trechos de rios. Pode fazer predições dos campos de velocidade 3D nos canais e nas planícies de inundação.

Tabela 2.2 – Dados de entrada e saída e estimativa do tempo computacional dos modelos hidrodinâmicos. Adaptado de Asselman et al. (2009)

Modelo	**Dados de entrada**	**Dados de saída**	**Tempo Computacional**
1D	Seções transversais de batimetria do canal Descarga a montante Níveis a jusante	Profundidade da água e velocidade média em cada seção transversal Extensão da inundação pela intersecção de profundidade da água prevista com DEM Escoamento de saída a jusante	Minutos a horas
2D	DEM Descarga a montante Níveis a jusante	Extensão da inundação Escoamento de saída Profundidade da água Velocidade média em cada nó computacional	Horas a dias
3D	DEM Descarga a montante Níveis a jusante Distribuição de velocidades	Extensão da inundação Profundidade da água Vetor de velocidade em cada nó computacional Escoamento de saída Energia cinética turbulenta em cada nó computacional	Dias

2.3. Modelagem de inundação em alguns países

Os impactos causados pelas inundações podem ser amenizados com pesquisas na área e implantação de sistemas de alerta, salvando vidas e reduzindo as perdas materiais.

Atualmente a capacidade de previsão de inundações tem melhorado muito devido ao avanço da ciência e da tecnologia. De acordo com a Adams e Pagano (2016), o melhor entendimento científico dos fenômenos e processos físicos permite produzir modelos melhores e mais realísticos, assim como melhoras nas medidas observacionais de variáveis hidrometeorológicas possibilitam melhorias nas entradas dos modelos de previsão.

Avanços em tecnologia acessível tem tornado possível a aplicação de ciência moderna hidrometeorológica e hidráulica para previsão devido a três fatores (Adams e Pagano, 2016).

- A disponibilidade de computadores muito rápidos e com capacidade de memória e armazenamento muito maiores que a dez anos atrás;
- Larga disponibilidade de dados geofísicos de alta resolução adquiridos através de sensoriamento remoto;
- Sistemas de telecomunicação altamente confiáveis para coleta de dados de solo e satélites.

Diversos países têm encontrado diferentes formas de construir e implementar sistemas de monitoramento e alerta de inundação. Países como Austrália tem colocado grande ênfase em reconhecer que monitoramento e previsão são apenas dois elementos de um sistema total de alerta de inundação. Outros elementos incluem a interpretação, tradução de previsões, construção de mensagens, comunicação, resposta protetora e revisão, garantindo a melhoria contínua.

Atualmente diversos países têm investido muito em pesquisas nas áreas de inundação. Portanto, as próximas seções descrevem a pesquisa em alguns deles, destacando os principais fatores causadores de inundações, os modelos e sistemas de alerta de inundação utilizados. Ao final, é apresentada uma tabela (Tab. 2.3), resumindo o que foi exposto e dando outras informações.

2.3.1. Inundações na Austrália

Na Austrália as inundações são predominantemente causadas por chuva intensa, através de Marés extremas, tempestades, Tsunamis ou falhas em diques. Mas recentemente houve inundações costeiras devido ao aumento do nível do mar, causado por mudanças climáticas. (Middlemann e Middelmann, 2007)

Os serviços de previsão de inundação e alertas australianos são fornecidos em nível nacional pelo Escritório de Meteorologia Australiano(*Australian Bureau of Meteorology*), onde trabalham em cooperação as agências estatais e os governos locais. Nesse país já existem inundações documentadas desde 1906. De acordo com o ofício de *Commom Wealth Meteorologist*, produzido pelo governo, foram estabelecidas atividades de distribuição de sinais de inundação na forma de boletim com níveis de rio distribuídos por telégrafo, jornal ou rádio, desde a segunda década do século XX.

Com o crescente número de cheias, principalmente nos meados do século passado, novas

legislações foram sendo estabelecidas, e desta forma, novas formas de coleta de dados foram sendo implantadas. De acordo com Pagano et al. (2016), nos dias atuais, o escritório fornece serviços de previsão de enchente e alertas em 150 bacias e conta com mais de 2000 estações hidrométricas espalhadas pelo país.

O padrão de modelagem utilizado na Austrália, são modelos hidrológicos semi-distribuídos de precipitação-escoamento, mas também são utilizados modelos estatísticos. Uma das vantagens dos modelos hidrológicos, é que eles são simples de ajustar durante o evento de inundação para ver maior equivalência entre comportamento do rio modelado e observado (Pagano et al., 2016).

Os resultados são níveis de rio em diversos pontos chaves e mapas de inundação que são enviados em tempo real para o sistema de alerta, que distribui essas informações em mídias sociais para que as devidas providências sejam tomadas pelas autoridades e pela população.

2.3.2. Inundações na China

As inundações têm sido o perigo mais grave desde os tempos mais remotos devido às condições geográficas, climáticas e socioeconômicas na China. As inundações ocorrem por diversos fatores, desde o derretimento de neve em geleiras, até tempestades locais. Contudo, a maioria das inundações na China são causadas pela combinação de intensas chuvas no continente com tempestades costeiras (Liu, 2016).

As perdas são muito graves, no ano de 1931 por exemplo, uma inundação que atingiu as bacias dos rios Huaihe e Yangtze, afetou os 51 milhões de pessoas e causou 400 mil mortes. Entretanto, a média anual de mortes vem diminuindo desde que os sistemas de alerta foram sendo implantados e melhorados. Em 1950, a média de mortes foi de 8.571, já nos anos 2000, diminuiu para 1.454. É importante ressaltar que o número de inundações teve aumentos nesse período, indicando efetividade dos sistemas preventivos (Liu, 2016).

Com o aquecimento global, mudanças climáticas e no meio ambiente, as inundações estão se tornando mais extremas, mais frequentes e mais distribuídas na China, aumentando os riscos e os custos dos desastres com inundações. Isso tem dado motivo para maior ênfase no melhoramento do sistema operacional de previsão e alerta de inundações (Zhi-Yong et al., 2013).

Até o final do século XX, os maiores esforços para controle de inundações, foram medidas estruturais como construção de reservatórios e diques. No entanto, com a crescente necessidade de predições com maior acurácia e com disponibilidade de conhecimento nesse campo devido principalmente ao desenvolvimento da ciência da computação, a China aprimorou sua capacidade tecnológica na previsão hidrológica (Liu, 2016).

Uma administração de hidrologia foi implantada no país, que providenciou melhorias significativas na coleta e transmissão de dados. Por exemplo, em todo país há 4195 Estações hidrológicas, 9330 estações de nível de água e cerca de 43028 estações pluviométricas, entre outras, com dados sendo coletados e transmitidos geralmente a cada 30 min. (Liu, 2016)

A modelagem de inundação com utilização de modelos hidrológicos e simulações matemá-

ticas iniciou na China na década de 1960. Atualmente existem dois tipos básicos de métodos previsão de inundação, o método de previsão hidrológica empírica e o método que usa modelos hidrológicos conceituais (Liu, 2016).

Os esquemas empíricos aplicam métodos tais como Índice de Precipitação Antecedente (API), método de fase de descarga correspondente, método de descarga resultante, método de correlação de escoamento de precipitação, entre outros. Já os modelos hidrológicos abrangem tanto os desenvolvidos por profissionais do país, quanto os modelos internacionais. Mais recentemente modelos hidrológicos espacialmente distribuídos têm sido gradualmente usados na China devido à disponibilidade de mapas digitais de elevação e mapas de uso de solo. Esses modelos consideram a distribuição espacial da precipitação e estão disponíveis graças as imagens de radar (Liu, 2016).

2.3.3. Inundações no Congo

Na bacia do Rio Congo, no centro da África, há uma grande falta de fontes de dados coletados em solo, como em estações pluviométricas e fluviométricas. Devido à necessidade de previsão de inundações, uma alternativa que vem sendo usada é a utilização de imagens de satélite.

Conforme indicado por Tshimanga et al. (2016), estudos baseados nos recursos de satélite incluem, entre outros: mudanças temporais no nível da água derivado de imagens de radar, tendências sazonais e de longo prazo do armazenamento de água terrestre da recuperação gravitacional e do experimento climático, mudanças temporais na superfície da água, conectividade entre o canal principal e a área de inundação avaliados por radar, avaliação de fontes para sumidouros da água em zonas úmidas usando múltiplas medidas de sensoriamento remoto, modelagem hidrológica da bacia usando várias fontes de previsão de precipitação derivadas de satélites, dados de altimetria espacial para a bacia coletados também de observações de satélite.

Os autores acima mencionados apontaram que os benefícios dos produtos derivados de satélite são muitos, no entanto, existem muitas incertezas no processo e dificuldade de validação desses dados, pois há muitos locais na bacia onde simplesmente não existem medidas observacionais de solo.

Tshimanga et al. (2016) indicaram ainda que a aplicação de modelos hidrológicos para simular a hidrologia da bacia do rio Congo tem poucos estudos recentes, e esses apresentam vários desafios devido a problemas relacionados a falta de dados apropriados, e também a falta de um entendimento completo dos processos hidrológicos e climatológicos da região. Os autores concluíram que com isso, não podem ser integrados com eficácia nos modelos.

Mas mesmo com tantas dificuldades com relação à coleta de dados e também com relação ao tamanho e complexidade da bacia, esforços na aplicação de modelos hidrológicos levaram ao desenvolvimento de dois modelos hidrológicos conceituais de precipitação-escoamento, o SPATSIM *(Spatial and Time Series Information Modelling)* (Hughes et al., 2006b) e o modelo *Water Evaluation and Planning* (Yates et al., 2005).

Esses modelos têm o objetivo de quantificar processos hidrológicos em escala de bacia e também estão sendo utilizados para avaliar os impactos que futuras mudanças no meio ambiente podem causar no local. Globalmente, os modelos apresentaram habilidade de simular respostas hidrológicas históricas e futuras com alto grau de confiança, mas para modelagem de eventos extremos, precisam de maior refinamento (Tshimanga et al., 2016).

2.3.4. Inundações na Alemanha, cooperação regional e internacional

Previsões de nível de água na Alemanha não são recentes, as primeiras datam de 1881 e vêm sendo melhoradas e ampliadas ao longo do tempo, mas inundações recentes como as do Rio Reno em 1993 e 1995, do Rio Oder em 1997 e dos Rios Danúbio e Elbe em 2002, contribuíram muito para o aumento da necessidade de um sistema de previsão(Demuth e Rademacher, 2016).

A Alemanha é uma república federativa que contém 16 estados constituintes. Cada um dos estados é responsável pela previsão de enchentes em suas áreas. O Serviço Meteorológico Alemão ou *Deutscher Wetterdienst* (DWD) presta assistência aos serviços de gerenciamento de águas dos estados. Além disso, o DWD também é requerido para questões de avisos oficiais sobre eventos extremos que poderiam representar uma ameaça à segurança ou ordem pública (Demuth e Rademacher, 2016).

Devido à localização central da Alemanha no continente europeu, grande parte dos rios e bacias não são limitados às suas fronteiras, por isso foi necessária a criação de uma cooperação internacional com países vizinhos para obtenção de dados hidrometeorológicos, como os da bacia do Rio Reno (Smith et al., 2016).

Sabendo que dados hidrológicos e meteorológicos são indispensáveis para a previsão eficiente de inundação, a Alemanha investe em implantação e manutenção de estações hidro e meteorológicas que são indispensáveis para o sucesso das previsões. Há também uma rede de compartilhamento de dados entre diferentes órgãos e até mesmo cooperação internacional, já que os rios são transfronteiriços, como supracitado.

A bacia do rio Moselle, por exemplo, envolve quase 500 estações de monitoramento hidrológico e meteorológico. O rio passa por Luxemburgo, Bélgica e três estados da Alemanha, logo a troca de dados entre os centros de prevenção de desastres é indispensável para o sucesso das previsões na bacia (Demuth e Rademacher, 2016).

Devido à estrutura administrativa do país e da grande variação da paisagem, variando de alpes a planícies, há uma diversidade de modelos que são utilizados. Um dos exemplos de modelo utilizado, é o *WAVOS (Water Level Forecast System)* que é utilizado tanto para prever inundações, quanto níveis visando a navegabilidade no interior do país, através de disponibilização de informações de níveis atuais e futuros (Burek et al., 2005).

O cálculo de predições de níveis de água é primariamente baseado em um modelo hidrodinâmico (*WAVOS-1D*), que é caracterizado pela estabilidade e velocidade de processamento. Recentemente o software comercial de modelagem numérica hidrodinâmica SOBEK tem sido utilizado em conjunto com o sistema WAVOS. Estes modelos são impulsionados por informa-

ções advindas dos afluentes, pelos rios alimentadores, e finalmente pelo nível da água (Demuth e Rademacher, 2016).

Além dos modelos citados anteriormente, existem muitos outros na Alemanha, que podem ser consultados em Demuth e Rademacher (2016), Ludwig (2006) e Meissner et al. (2014). Embora as previsões de inundação na Alemanha apresentem grandes progressos, com boas previsões que variam de 48 a 6 h de antecedência, a inclusão de previsões meteorológicas, nas previsões de inundação ainda estão dando seus primeiros passos (Demuth e Rademacher, 2016).

Com relação ao sistema de alerta de inundação, com os avanços nas tecnologias da informação, eles são disseminados por vários canais, como na internet, em mensagens nos telefones, e no rádio, além de serem disponibilizados níveis de rio nas estações de medição (Demuth e Rademacher, 2016).

2.3.5. Modelagem de inundações em Israel

Como em todo o mundo, em Israel, as inundações causam os maiores danos dentre os desastres naturais. Os danos causados por inundações são especialmente severos nas regiões áridas, onde a estimativa e previsão de precipitação é problemática. Além disso, com as mudanças climáticas, são esperados aumentos nas frequências de eventos de precipitação extrema ao redor do mundo. Na região do Mediterâneo isso pode, por um lado as ocorrências de secas, ou de outro, intensificar os eventos de inundação (Givati et al., 2016).

Em Israel, as previsões de inundação são feitas a partir das previsões meteorológicas, e é sabido que a acurácia de previsões de inundação á altamente determinada pela habilidade de prever a precipitação e pela distribuição espacial das chuvas. Muitos modelos hidrológicos modernos podem usar dados de precipitação de várias fontes como medidores de chuva, radar, sensoriamento remoto, ou precipitação simulada de modelos numéricos climáticos.

Contudo, em Israel os centros de previsão climática oferecem previsões de precipitação em escala muito grosseira (16 - 27 km) que são geralmente incapazes de resolver detalhes necessários de complexas e intensas estruturas de precipitação que são forçadas pela orografia e heterogeneidade da superfície. Na região do Mediterrâneo oriental, uma forte interação entre o mar e a atmosfera, e forças orográficas produzem gradientes de precipitação muito fortes, que são geralmente perdidos pelos modelos que operam com grades grosseiras, que é o cenário apresentado em Israel.

Com isso, foi necessário aprimorar o método de previsão de precipitação para que as ocorrências de pequena distância geográfica pudessem ser captadas. Para tal, os pesquisadores Givati et al. (2011) usaram o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) para fornecer previsões de chuva de alta resolução durante os invernos (estações chuvosas) de 2008 - 2009 e 2009 - 2010 para Israel e arredores, onde terrenos complexos são predominantes.

Utilizando grades de alta resolução (1.3 - 4 km), o modelo WRF foi capaz de prever quantidades e estruturas de precipitação diárias na região norte de Israel razoavelmente bem, e a partir disso, as previsões hidrológicas estariam aptas a serem melhoradas. Estas foram imple-

mentadas pelo *Israel Hydrological Service* (IHS) em simulações hidrológicas diárias para o rio Jordão.

O IHS é responsável pelo monitoramento de todos os recursos hídricos do país, onde operam 120 estações hidrométricas, uma rede considerada relativamente densa, se comparada com outros lugares do mundo (Givati et al., 2016). De posse das estações hidrométricas e das melhorias na previsão de precipitação, a partir de 2013, o IHS adotou e aplicou o modelo WRF-Hydro como principal modelo para previsão de inundação.

Ele foi desenvolvido para prover componentes do modelagem hidrológica para o modelo WRF atmosférico. O modelo aperfeiçoa a representação de processos hidrológicos terrestres relacionados a redistribuição espacial da superfície, do subterrâneo e dos canais ao longo do terreno. O modelo foi configurado para extrair valores de escoamento previsto em 170 locais diferentes, e destes locais, aproximadamente 100 são equipados com estações hidrométricas operadas pelo IHS, usados para calibração do modelo.

O modelo funciona operacionalmente duas vezes ao dia com período de previsão de 72 a 84 h. Os resultados do modelo são carregados pelo site do IHS, onde alertas de inundação aparecem usando uma legenda codificada por cores, sendo que cada cor representa diferentes magnitudes e períodos de retorno de inundação. O site ainda apresenta animações de precipitação esperada, e de previsão de vazão horária ao longo do domínio. Mais informações acerca do modelo e sua operacionalização podem ser encontrados em Yucel et al. (2015) e em Fredj et al. (2015).

Para a região metropolitana de Tel Aviv, o IHS e a autoridade de drenagem de Yarqom escolheram adotar um monitoramento especial para a previsão de cheias na bacia do Rio Aylon. Quando inundações são esperadas, o IHS cria previsões de inundação no *Hydrologic Modelling System* (HEC-HMS) somente para o pequeno domínio que inclui a bacia do Aylon.

O HEC-HMS é capaz de representar as condições hidráulicas do canal, e leva em conta operações dinâmicas na bacia, como barragens, reservatórios e outros fatores que afetam o escoamento, além da relação precipitação-escoamento. A entrada para o HEC-HMS é a precipitação simulada de uma grade de 3 km extraída do modelo WRF-Hydro, ou de precipitações observadas em estações de medição, neste último caso, para previsões de poucas horas (Givati et al., 2016).

2.3.6. Grã-Bretanha

Pilling et al. (2016) realizaram uma pesquisa sobre as abordagens tomadas com relação à inundações na Grã-Bretanha, que é sumarizada nessa subseção. A Grã-Bretanha também têm sido largamente afetada por inundações, que são em maioria fluviais, causadas por chuvas intensas e/ou duradouras, ou ainda costeiras, causadas pelas marés.

Com a necessidade de predição desses eventos, e de emissão de alertas em tempo hábil para a proteção das pessoas e das propriedades em áreas de risco, a Agência de Meio Ambiente e o Escritório de Meteorologia começaram a trabalhar em conjunto, e foi criado o *Flood Forecasting Centre* (FFC), com o objetivo de melhorar a previsão de inundação na Inglaterra e no país de

Gales. Após inúmeros desastres, como o do ano de 2007 na Inglaterra, que não foi previsto com acurácia, o estabelecimento do FFC, no ano de 2009, mostrou benefícios imediatos com o trabalho conjunto de hidrólogos e meteorologistas.

Historicamente, várias técnicas de previsão de inundação têm sido utilizadas nos países da Grã-Bretanha. Para as previsões em rios, elas têm variado de simples disparadores de excedência de nível, ou ainda, correlações entre níveis, até complexos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos acoplados Pilling et al. (2016).

Um dos exemplares de modelo que é utilizado pelo FFC é o SWFDST *(Surface Water Decision Support Tool)*, introduzido em 2010. Na sua forma atual, a ferramenta importa dados sobre a probabilidade de exceder um número de eventos de precipitação de período de retorno pré-definidos, derivados de cada rodada do conjunto de alta resolução MOGREPS-UK (*Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System*) que prevê precipitações regionalmente com 54 horas de antecedência[5].

A ferramenta calcula então o impacto pontualmente para todos os 109 municípios e autoridades unitárias em seu domínio, na Inglaterra e no País de Gales, levando ainda em consideração áreas urbanas e status da mistura de solo. Para cada município e autoridade unitária, um valor de risco de inundação máxima é apresentado. A avaliação de impacto da inundação não é, portanto, baseada somente no impacto das tempestades.

Já o modelo *Surface Water Hazard Impact Model* (SWHIM) (Cole et al., 2014) se beneficia do modelo hidrológico G2G (*Grid-to-Grid*) para computar uma pegada de perigo de inundação em resposta a um dado evento de precipitação. Esses dados são então utlizados com referência a dados de vulnerabilidade e exposição providenciados pelo Laboratório de Segurança e Saúde (*Health and Safety Laboratory*) para definir todos os riscos de uma inundação. Essa metodologia foi mostrada como conceito de trabalho planejado para desenvolver um sistema totalmente operacional de previsão de inundações e riscos.

2.3.7. Sistema Europeu para Inudação

Na Europa, mais de 40 rios cruzam pelo menos uma fronteira entre países vizinhos, sendo que o Rio Danúbio é o mais transfronteiriço, estando presente em 18 países. Isso significa que autoridades de diferentes países devem se comunicar para compartilhar informações que serão úteis para reduzir impactos de inundação ao longo do curso do rio. No entanto, nessas trocas de informações, muitos problemas podem ser encontrados, que são potenciais causadores de erros, como resultados diferentes obtidos de modelos diferentes ou mal entendidos devido a barreiras de linguagem. Esses e outros erros podem levar a tomadas de decisão incoerentes e descoordenadas (Demeritt et al., 2007).

Inundações significantes na Europa, especialmente no início desse século, demonstraram que além de outras atividades, seria muito importante o desenvolvimento do *European Flood Awareness System* (EFAS). Os objetivos do EFAS são providenciar informações de escoamento

[5]Informação disponível em `https://www.metoffice.gov.uk/research/weather/ensemble-forecasting/mogreps`. Acesso em 17 de setembro de 2018.

de médio alcance pan-europeu e informação de alerta precoce em particular para as bacias de rios transfronteiriços, com suporte direto dos serviços de previsão nacionais, tão bem como informação coordenada em possíveis inundações de alto impacto para o *Emergency Response Coordination Centre* (ERCC) da Comissão Europeia (Smith et al., 2016).

O EFAS começou a ser desenvolvido em 2003, e em 2012 entrou em operação. Como demonstrou ser de grande importância, tem sido integrado no gerenciamento de risco europeu. Atualmente conta com uma rede de 48 serviços de proteção civil e hidrológica, e até 2016, o EFAS produzia mapas de riscos de inundação em rios pan-europeus, com antecedência de 10 dias. (Smith et al., 2016)

Como um sistema de previsão de escala continental e transfronteiriço, o EFAS oferece produtos que são complementares aos sistemas nacionais ou regionais, mas não atenta para resolver eventos de escala local, para áreas abaixo de 2.000 km^2, inundações urbanas ou enxurradas. Em contraste a outras iniciativas globais de previsão como o GLOFAS (*Global Flood Awareness System*) que produz previsões para os maiores rios globais (Alfieri et al., 2013), o EFAS permite uma resolução mais refinada dos processos hidrológicos. Mais informações a cerca da estrutura e do funcionamento do EFAS podem ser encontrados em Smith et al. (2016) e Alfieri et al. (2012). Estudos sobre os ganhos financeiros (Pappenberger et al., 2015) mostraram ganhos de 400 euros para cada euro investido nesse sistema de previsão, e apontam também a crescente necessidade de se fazer previsão em escala continental ou global.

Previsão hidrológica no Brasil

As previsões de escoamento no Brasil são geralmente de curto e médio prazo e são, em sua maioria, usadas para dois propósitos: 1) o agendamento de operações de reservatórios de hidrelétricas e 2) previsão de inundação em locais vulneráveis. Há uma grande ênfase nos trabalhos relativos ao primeiro caso, portanto, não há como tratar a temática de previsão de inundações no Brasil sem falar dos reservatórios hidrelétricos e geração de energia. Além disso, alguns reservatórios também operam para mitigar impactos de inundação nas cidades a montante e a jusante (Fan et al., 2016).

O Operador Nacional do Sistema (ONS) é responsável pela coordenação de geração de eletricidade e transmissão no Sistema Interligado Nacional (SIN) sob supervisão e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Sob condições normais, a ONS usa previsão de média diária de escoamento com prazo de até 14 dias para agendar a geração de energia elétrica no sistema. Essas previsões são geradas pelo ONS ou pelos próprios agentes de operação da barragem (Fan et al., 2016).

Os métodos para produzir tais previsões são diversos. Muitas hidrelétricas ainda usam modelos previsão com uma base física fraca, como o modelo PREVIVAZH (Livino de Carvalho et al., 2001), que é um modelo estocástico de previsão de vazões médias semanais e diárias. Estes modelos consideram, como insumo, apenas as informações históricas de vazões naturais observadas nos locais de aproveitamentos hidrelétricos, e geram séries diárias de escoamento.

(Guilhon et al., 2007).

Apontando para uma melhor performance de previsões, a ONS organizou um estudo para avaliar diferentes alternativas para previsão de escoamento em hidrelétricas que integram o SIN. As barragens estudadas estão nas bacias dos rios Iguaçú, Paraná e Parnaíba. Os métodos de previsão usados foram modelos empíricos e modelos conceituais distribuídos, através de metodologias híbridas, modelos estocásticos, inteligência artificial e técnicas de mineração de dados. Ao final do trabalho, a principal conclusão foi que a maioria das alternativas superou o PREVIVAZH, que era até então amplamente utilizado (Fan et al., 2016).

Além desse trabalho, é apontada uma grade diversidade de previsões de escoamento para hidrelétricas brasileiras, ademais vem aumentando o número de modelos que consideram as previsões climáticas, obtidas de modelos meteorológicos. Por exemplo, na bacia do São Francisco, na usina hidrelétrica de Três Marias, um modelo hidrológico de larga escala fisicamente distribuído (MGB-IPH) é usado para operacionalização da produção de energia elétrica, e também para operar o reservatório com vistas ao controle de inundação na cidade de Pirapora, localizada 120 km a jusante da usina (Gomes et al., 2010).

De acordo com Fan et al. (2016), ele usa como entrada uma rede de estações de pluviométricas e fluviométricas. Esse modelo também é utilizado no rio Paraíba, na usina de São Simão, e nas usinas de Campos Novos e Barra Grande na bacia do rio Uruguai. No rio Iguaçu, um sistema de previsão de hidrológica chamado SISPSHI (Sistema de Previsão e Simulação Hidrológica do Iguaçú) é usado aplicando previsões quantitativas de precipitações, onde os resultados geram estimativas de vazão em 21 locais ao longo da bacia, incluindo as usinas de Foz da Areia e Segredo.

De acordo com EM-DAT (2010), o Brasil está entre os 10 países mais atingidos por inundações no mundo, e esse grande número de eventos tem motivado o desenvolvimento do segundo tipo de previsão hidrológica citada anteriormente, indo além das previsões ligadas ao funcionamento das usinas hidrelétricas. São estudos relacionados aos impactos das inundações para a população, para a economia e também para impactos sanitários.

Maiores avanços são esperados nessa área nos próximos anos com a fundação do CEMADEN (Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais) que visa desenvolver, testar e implementar sistemas de monitoramento e previsão para desastres naturais no Brasil, no entanto, é um órgão recém criado e os sistemas ainda não foram desenvolvidos.

A maioria dos sistemas operacionais de previsão de inundação no Brasil são conduzidos pelo Serviço Geológico do Brasil. Ele opera sistemas em áreas regionais e vulneráveis em alguns rios como o Doce (MG), Caí e Taquarí (RS), Parnaíba (PI), Muriaí (RJ e MG), Negro (AM), Acre (AC) e Branco (RR). As previsões estão disponíveis no site do Serviço, em um sistema chamado de Sistema de Alerta contra Enchentes. Essa previsões são executadas usando modelos empíricos, mostrando boa execução para curto prazo, geralmente menor que três dias. (Fan et al., 2016)

Outro exemplo desse tipo de sistema é o apresentado por Cordero et al. (2003) no rio Itajaí, em Santa Catarina. Esse modelo utiliza um modelo empírico de correlação de níveis e tem

tempo de resposta de 8 ou 6 h (Cordero et al., 2003). Apesar da publicação do trabalho, não foram encontradas informações de utilização e desempenho desse modelo em previsões em situações posteriores a publicação.

Mais recentemente o modelo hidrológico MHD-INPE (Modelo Hidrológico Distribuído - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) foi testado na bacia do rio Itajaí-Açu e realizou previsão de descarga em alguns pontos da bacia usando previsões de precipitação, mostrando alguns bons resultados com período de antecedência de 48 h (Casagrande et al., 2017). No entanto, esse artigo não traz a informação de como a modelagem é realizada levando em consideração o funcionamento das barragens locais.

Outro método sendo utilizado no Brasil é o Maven (Monitor Avançado de Enchentes), no estado de Pernambuco, um sistema de previsão baseado no modelo de inundação HEC-HMS *(Hydrologic Enginering Center-Hidrologic Modelling System)* e no modelo *HEC-RAS (Hydrologic Enginering Center-River Analyses System)*. O primeiro é responsável por simular, entre outros, o comportamento hidrológico de rios e bacias, e o segundo é um modelo hidrodinâmico que simula os escoamentos nos canais e nas planícies de inundação (Silva et al., 2014).

Esta seção procurou evidenciar algumas abordagens diferenciadas em diversos países para a modelagem e previsão de inundações, mostrando que cada cenário pode requerer diferentes estratégias, e que em alguns casos, soluções comuns podem ser adaptadas a diferentes contextos. As abordagens tem mostrado diferenças, convenientes às tecnologias disponíveis em cada país, principalmente na aquisição e qualidade de dados hidrométricos, meteorológicos, topográficos, e etc. Para uma visão mais generalizada, do que foi exposto nessa seção, a 2.3 apresenta um resumo da situação da modelagem de inundação em alguns países, adaptada deAdams e Pagano (2016), e resumindo as principais pesquisas nessa área no mundo.

Tabela 2.3 – Resumo da modelagem de inundação em alguns países. Adaptado de Adams e Pagano (2016)

	Austrália	**Grã-Bretanha**	**EFAS**	**Colombia**	**Israel**	**Russia**	**Brasil**	**China**	**Alemanha**	**EUA**	**Congo**
Domínio:Regional (R), Nacional (N), Continental (C), Global (G)	R	N, R	C	R	N,R	R	R	N	N	R, N	R, N
Clima: Tropical (Tr), Árido (D), Temperado (Te), Continental (C), Polar/Alpino (A)	Tr, D Te	Te	Te, C, A	Tr, C, A	D, Te	D, Te, C, A	Tr, D, Te	D, Te, C, A	Te, C, A	Te, C, A	Tr,Te
Precipitação observada: In Situ (I), Radar (R), Satélite (S)	I	I, R	I	I	I	I	I, S	I	I, R	I, R, S	I, S
Modelos de Chuva-escoamento: concentrado (L) Semi-Distribuído(S) ou distribuído (G)	S	G, L, S	G	S	G, S		L, S	L, G	S	L, G	S
Rotinas de escoamento: Nenhuma (N), Hidrológica (H), Hidráulica (D)	H	H, D	D	D	H, D		H, D	H	H,D	H,D	H

Mapeamento de inundação em tempo real	Não	Algum	Não	Não	Não		Não	Não	Não	Não	Não
Simulação de reservatórios	Yes	Alguma	Sim	Sim	Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Previsões costeiras: Nenhuma(N), Marés(T), Tempestade(S)	T, N	T, S	N		N		N	N	T, S	T	N
Software: desenvolvidos no país(I), de fora do país(O)	I, O	I, O	I	O	O	I	I, O		I, O	I, O	I, O
Tempo máximo de espera	7 dias	10 dias	46 dias	6 dias	4 dias	3 dias	14 dias		7 dias	10 dias	
Frequência de previsão	Diária ou de acordo com a necessidade	6 em 6 horas ou 4 em 4 h ou menos dependendo da necessidade	12 em 12 horas	De acordo com a necessidade	12 em 12 horas	De acordo com a necessidade	De acordo com a necessidade		De horário a diário	Duas vezes ao dia, ou de acordo com a necessidade	Nenhuma

Previsão de precipitação: numérica(N), Expert(E)	40 km, 10 dias. 12 km, 3 dias. 4 km, 1.5 dias	4 km, 10 dias. 1.5 km, 12 horas	16km, 5 dias. 9 km, 10 dias. 7 km, 5.5 dias	15 km, 3 dias. 5 km, 3 dias. 1.7 km, dias	27 km, 3 dias. 9 km, 3 dias. 3 km, 3 dias.	14 km, 3 dias. 1 km, 1.5 dias	15 km, 7 dias		13 km, 7 dias. 7 km, 3 dias. 2.8 km, 27 horas	4 km, 3 dias. 28 km, 16 dias. 70 km, 14 dias	Nenhum
Previsões disponibilizadas na internet?	Algumas	Algumas	Sim	Não			Algumas		Sim	Sim	Não
Formatos dos produtos aos interessados: Avisos(W), Hidrogramas(H), Mapas(M)	W, H	M, W	W, M, H	H			H		W, M, H	W, M, H	
Produtos aos interessados: Categórico (C), Determinístico (D), Probabilístico (P), Conjunto(E)	C, D	C, D, P, E	C, P				D, P, E		C,D	C, D, P, E	
Orientação Interna: Categórico (C), Determinístico (D),Probabilístico (P), Conjunto(E)	D, E	D, P, E	P,E	D, P			D, E		C, D, P, E	C, D, P, E	

Alguns campos da tabela são autoexplicativos, para os outros, a descrição é dada abaixo. Alguns campos da tabela estão vazios devido a falta ou não aplicabilidade da informação naquele contexto.

Domínio: quão grande é a cobertura pelos sistemas presentes no país.

Clima: qual o clima dominante na área coberta pelo sistema, segundo a classificação Köppen.

Modelos de chuva-escoamento: se os modelos são espacialmente concentrados (usa, por exemplo, uma série temporal de precipitação para rodar o modelo) ou se são espacialmente distribuídos. Os modelos semi-distribuídos geralmente tem formas irregulares em regiões com características hidrológicas comuns.

Rotina Hidráulica: qual o tipo de modelo usado para simular o escoamento.

Mapeamento de inundação em tempo real : se a agência de previsão oferece mapas de de áreas a serem inundadas em tempo real.

Simulação de Reservatórios: se são simulados os comportamentos dos reservatórios para gerar previsões a montante.

Previsões costeiras: se a interação do rio com a linha de costa do oceano é modelada com relação à marés e tempestades costeiras como ciclones tropicais.

Software: se o núcleo de modelagem é feito com softwares comerciais ou livres prontos ou se é um sistema customizado criado por ou para a agência.

Tempo máximo de espera: se as previsões são produzidas regularmente e qual o tempo máximo de espera para produção.

Previsão de precipitação: resolução espacial utilizada e tempo de predição de chuvas.

Comunicação dos produtos: os produtos que descrevem as inundações podem ser organizados para serem apresentados à população como categórico, por exemplo, se a inundação será pequena moderada ou grande, determinístico, por exemplo, se o rio pode alcançar a marca de 7 m na segunda-feira às 16 h, probabilístico, por exemplo, há 70% de chance de ocorrer inundação, ou ser um conjunto dos anteriores.

Orientação Interna: semelhante à comunicação dos produtos, mas os agentes de previsão podem ter maior acesso aos dados, e direcionamento diferente dos providos para a população.

2.3.8. Aplicações do TELEMAC2D

Algumas aplicações em rios já foram realizadas com o modelo TELEMAC2D e uma síntese de duas delas, em ambientes bastante distintos são apresentadas em resumo a seguir, demonstrando que o modelo é capaz de adequar-se em diferentes cenários.

No primeiro estudo, Horritt e Bates (2002) avaliaram três diferentes modelos, o HEC-RAS (1D), o LISFLOOD-FP (2D) e o TELEMAC2D sob um alcance de aproximadamente 60 km do Rio Severn, Reino Unido, que é predominante limitado por vales. Foram utilizados dados hidrométricos e imagens de satélite SAR (*Radar de Abertura Sintética*) para validação e calibração dos modelos.

Foi concluído que os três modelos foram capazes de prever a extensão da inundação e

tempo de duração com níveis parecidos de precisão. Como o estudo foi realizado em uma região confinada por vales, padrões de inundações complexos são esperados, e nesse quesito os modelos 2D (LISFLOOD-FP e TELEMAC2D) se mostraram mais efetivos.

Já Vu et al. (2015) analisaram a viabilidade do uso do TELEMAC2D para simular a inundações em 4.800 km do Rio Makong, no Camboja. Durante toda essa extensão, o rio passa por áreas de vales e planícies, por áreas rurais e urbanas. Para este estudo foi simulado um evento que aconteceu em 2001, como dados de calibração e validação do modelo foram utilizados dados hidrométricos e imagens de satélite SAR, e na análise dos resultados foi percebido que no período de pico de inundação o modelo teve precisão superior a 90%, e nos períodos pré e pós pico de inundação, as taxas de precisão do modelo foram menores que 50%.

Esse baixo percentual, segundo os autores, pode ser devido ao fato de o modelo considerar apenas aspectos hidrodinâmicos e não considerar processos hidrológicos como infiltração e evapotranspiração, que podem ser importantes principalmente em períodos pré e pós pico de inundação, ou ainda pode ser devido a baixa resolução das imagens de satélite utilizadas (500 m).

3. REGIÃO DE ESTUDO

A região de estudo está situada na bacia do Rio Itajaí-Açú (Fig. 3.1). Como a região se trata de uma parte da bacia, não foram encontrados muitos dados específicos, então aqui são apontadas características da bacia como um todo, procurando sempre que possível ressaltar a área de interesse.

A bacia do Rio Itajaí-Açú está situada na vertente Atlântica do nordeste Catarinense, drenando uma área de cerca de 15.000 km^2. A bacia é limitada ao norte pelas bacias dos Rios Itapoçu e Iguaçu, ao sul pelas bacias dos rios Tijucas e Tubarão, a oeste pelas bacias dos rios Uruguai e Iguaçu, e a leste pelo oceano Atlântico. Trata-se da maior bacia do estado de Santa Catarina e está constituída de uma das frações territoriais mais importantes economicamente no estado (Fraga, 2003). De acordo com dos Santos e Aruto (2012), a região da Bacia Hidrográfica do Vale do Itajaí ganha destaque como a mais rica do Estado de Santa Catarina, com seu PIB (produto interno bruto) em 2008 atingindo mais de R$ 33 bilhões, o que equivale a quase 27% do total do PIB catarinense neste mesmo ano.

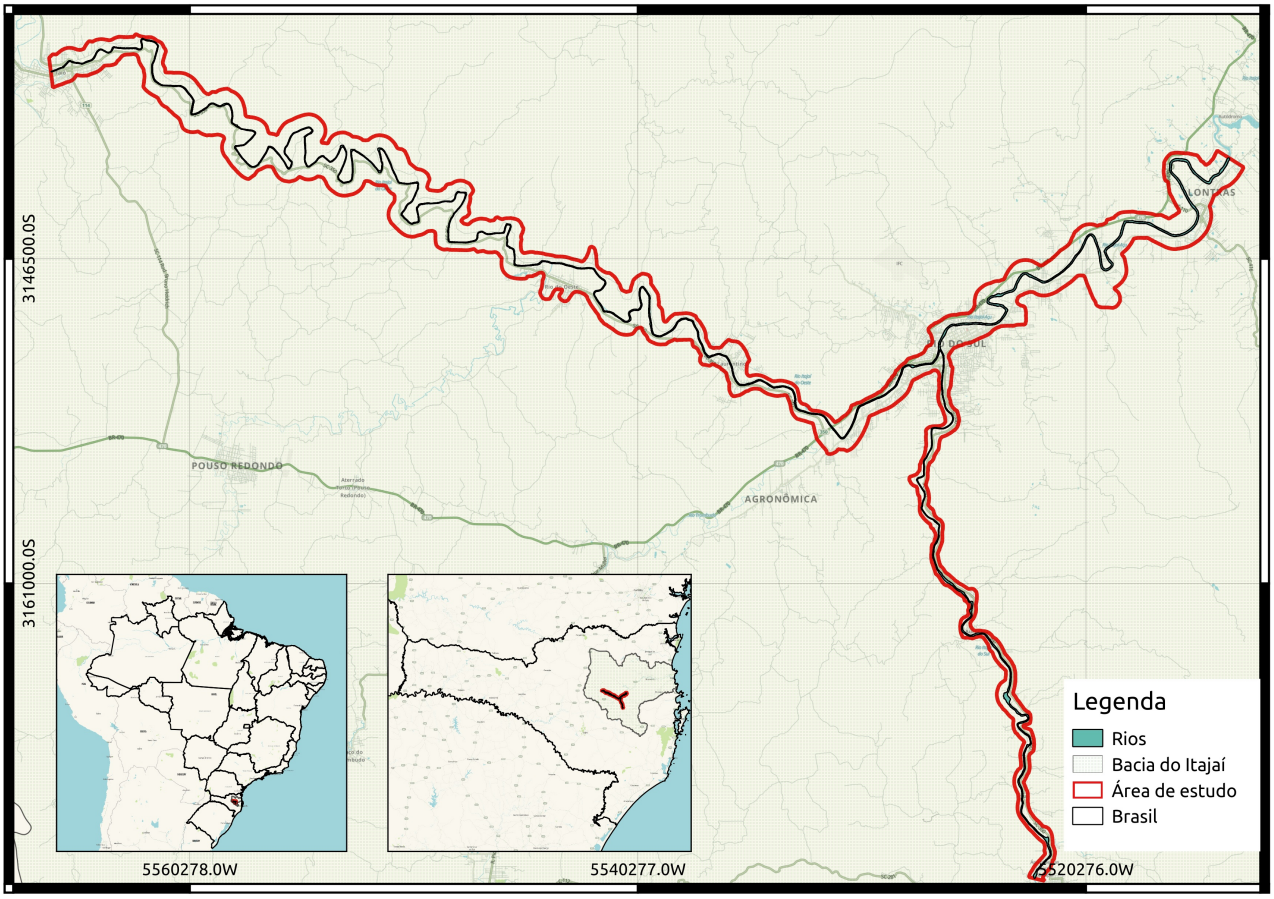


Figura 3.1 – Localização da Área de estudo

Esta bacia é formada por 7 sub-bacias: Itajaí do Norte, Benedito, Luis Alves, Itajaí-Açú, Itajaí-Mirim, Itajaí do Sul e Itajaí do Oeste. Nelas, 75% da população reside na zona urbana,

e 25% na zona rural (Fraga, 2003).

O clima na bacia do Itajaí-Açú é caracterizado pelos aspectos atuantes regionalmente na costa nordeste Catarinense. É classificado como subtropical úmido, com verões quentes e temperatura média anual de 20º C. Já o inverno costuma ser rigoroso, com média de 15 ºC no mês mais frio (julho), e também ocorrem geadas em um média de 25 dias por ano em algumas regiões (Fraga, 2003; de Andrade et al., 1999).

No tocante ao relevo que compõe a unidade geomorfológica do Alto Vale do Itajaí, na microrregião onde se encontra a área de estudo, apresenta, segundo Atlas (1986) grandes variações altimétricas. As maiores cotas estão no sudeste da área, e correspondem ao topo da serra da Boa Vista que atingem 1220 m. A oeste desta serra, as cotas decaem, e assim no limite com o planalto de Lages, tem-se cotas de 700 m. As menores altitudes estão nos vales dos rios, como por exemplo na cidade de Rio do Sul, que as margens do Rio Itajaí do Sul apresentam altitudes próximas de 350 m.

O perfil longitudinal, assim como as porcentagens de declividade em alguns trechos dos Rios Itajaí do Sul e Itajaí do Oeste podem ser vistos nas figuras 3.2 e 3.3 (Atlas, 1986). Ressalta-se que estão indicados nas figuras os pontos onde inicia a área de estudo, em Ituporanga e Taió (montante), terminando em Rio do Sul.

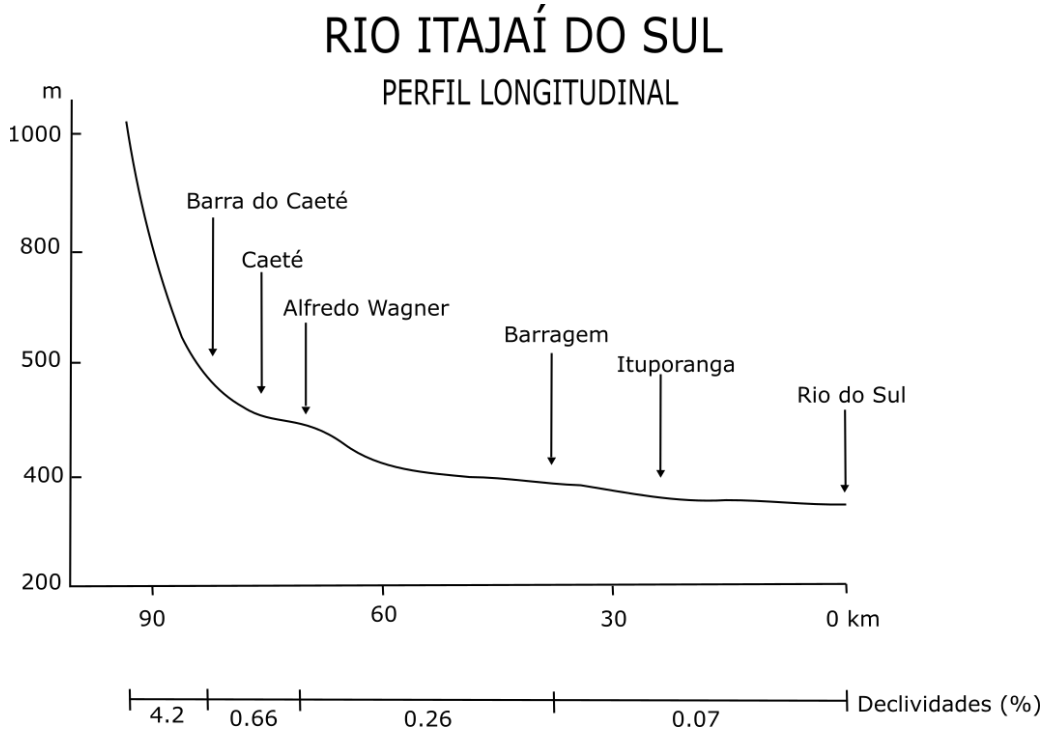


Figura 3.2 – Perfil rio Itajaí Açú. Fonte: (Atlas, 1986)

Essa unidade geomorfológica é drenada pelo Rio Itajaí-Açú, onde se destacam seus afluentes e formadores: Rio Itajaí do Sul e Rio Itajaí do Oeste, objetos deste estudo além dos Rios Itajaí do Norte e Itajaí Mirim. Os maiores rios nessa região apresentam vale de fundo plano, limitados por encostas íngremes, com cornija no topo, e eventualmente com patamares. Apresentam talvegue simples, curso tortuoso com trechos retilíneos e corredeiras. Os trechos

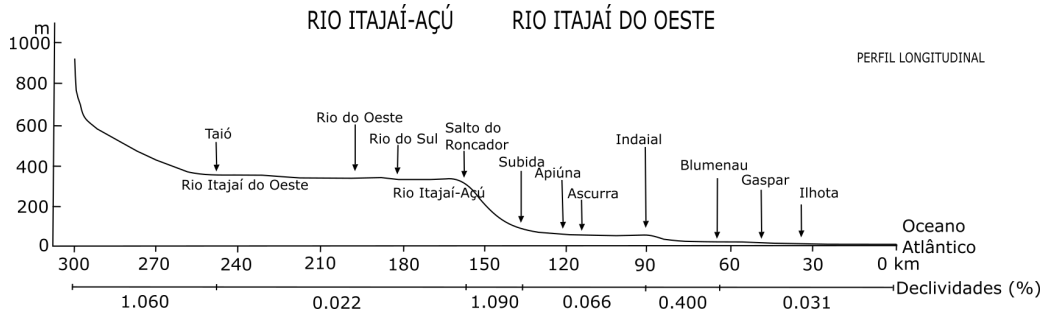


Figura 3.3 – Perfil rio Itajaí do Oeste. Fonte: (Atlas, 1986)

retilíneos refletem a adaptação do rio aos alinhamentos estruturais, já as corredeiras se ligam mais comumente às diferenciações litológicas (Atlas, 1986). O regime pluviométrico é caracterizado por chuvas distribuídas no ano inteiro, sem meses secos, garantindo o abastecimento normal dos mananciais, com médias anuais de 1.500 mm (Atlas, 1986).

Embora as chuvas sejam bem distribuídas temporalmente, Tachini et al. (2009) apontaram que pode-se distinguir uma variação quantitativa das chuvas no decorrer do ano, com as seguintes características: 1) uma estação chuvosa principal no verão, que abrange em geral três meses (janeiro a março); 2) uma estação chuvosa secundária na primavera; 3) um período de 5 meses, que é o menos chuvoso ao longo do ano, de abril a agosto, ou seja, no outono/inverno. Segundo os autores, desses meses o mais seco é o mês de abril.

de Andrade et al. (1999) apontaram que as frentes frias são as principais causadoras das precipitações no Sul do Brasil. Em virtude de sua variabilidade espaço-temporal, a precipitação é complexa e variável. No Estado de Santa Catarina esta variabilidade é marcante, devido a diversos fatores, como: relevo irregular, latitude, maritimidade, continentalidade e a dinâmica da circulação.

No tocante às precipitações extremas que geraram inundações, Alves (2014) realizou uma análise pontual de dois eventos, em 2008 e 2011, procurando apontar quais fatores climáticos estavam associados às chuvas. Neste trabalho foi concluído que as inundações que aconteceram no vale do Itajaí, no ano 2008, foram influenciadas pela circulação marítima e um vórtice ciclônico em médios níveis da atmosfera.

A circulação marítima foi importante na manutenção da umidade tanto do ar como do solo através das chuvas persistentes que anteciparam a tragédia, enquanto a precipitação do vórtice, muito intensa e persistente por várias horas, favoreceu a elevação rápida do nível do rio Itajaí-Açu (Alves, 2014).

Já em 2011, segundo o mesmo autor, a inundação ocorrida em setembro foi ocasionada devido à presença de uma frente estacionária no litoral do estado, e por um sistema de baixa pressão próximo à superfície, e a instabilidade presente nesses sistemas foi reforçada por jatos em baixos e altos níveis.

Observando os aumentos nos números de inundações na cidade de Rio do Sul (Tab. 1.1), pode-se pensar que as chuvas na região estão passando por mudanças em seu regime natural. Foram encontrados dois trabalhos que tratam dessa temática na região, buscando evidências

de que o regime pluviométrico da região está passando por mudanças, que podem ser causadas pelas mudanças climáticas, como indicado por Di Baldassarre (2012).

Piazza et al. (2016) analisaram as variações temporais das chuvas na microbacia do ribeirão Concórdia em Lontras - SC, cidade vizinha a Rio do Sul. Ao fazerem uma análise com dados de estações hidrométricas da Agência Nacional de Águas, os autores apontaram que as chuvas em 20 dessas estações apresentaram aumentos nas tendência centrais no período de 1928 a 2010, assim como incrementos nos eventos extremos de precipitação. Em suas conclusões, os autores apontaram que mais estudos das séries temporais hidrometeorológicas são necessários na região, a fim de verificar os impactos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico.

Um estudo focado na região de Rio do Sul foi desenvolvido por Forster et al. (2019), utilizando outra fonte de dados, foi conduzido especificamente na área de estudo, procurando em um primeiro momento, identificar se há uma variabilidade temporal nas tendências centrais das precipitações da região, e também verificando sua variabilidade temporal. Este fato poderia explicar, de alguma forma, o aumento na frequência de inundações na região. Os principais resultados apontaram aumentos estatisticamente significantes nas medianas mensais no período de 1980 a 2014 (teste de Wilcoxon) e frequência de meses com grandes acumulados (teste Qui Quadrado), quando comparados aos períodos de 1910 a 1944 e 1945 a 1979.

Recentemente, Gotado et al. (2018) analisaram a variabilidade temporal e espacial das chuvas no estado de Santa Catarina com dados de estações da ANA compreendidos entre os anos 1975 e 2014. Ao dividir o estado em mesorregiões, criaram linhas de tendência linear para a precipitação em cada uma delas. Essas linhas de tendência apontam que no decênio de 2015-2024, as precipitações médias anuais no Vale do Itajaí terão acréscimo de 8.3 %.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a realização deste trabalho. Primeiramente é apresentada a descrição matemática do modelo TELEMAC2D, seguida das questões de aquisição e tratamento dos dados e exposição dos métodos para avaliar e validar a modelagem.

4.1. O TELEMAC2D

O modelo hidrodinâmico TELEMAC2D[1] foi utilizado a fim de avaliar a hidrodinâmica dos rios e planícies de inundação na região. O código do modelo resolve equações de fluxo de superfície livre integradas ao longo da vertical, propostas inicialmente por Barré de Saint-Venant em 1871. Para o presente estudo, os resultados mais relevantes obtidos em cada nó da malha computacional são a profundidade da água e as componentes da velocidade de corrente na horizontal.

O código TELEMAC2D resolve simultaneamente quatro equações hidrodinâmicas. (Riadh et al., 2014)

Equação da Continuidade
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} h + h \cdot div(\vec{u}) = S_h \tag{4.1}$$

1ª equação da quantidade de movimento
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} u = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} div(h v_t \vec{\nabla} u) \tag{4.2}$$

2ª equação da quantidade de movimento
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} v = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} div(h v_t \vec{\nabla} v) \tag{4.3}$$

Equação de advecção - difusão de traçador
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T = S_T + \frac{1}{h} div(h v_T \vec{\nabla} T) \tag{4.4}$$

onde, h (m) é a profundidade da água, u, v (m/s) são componentes da velocidade, T (g/l ou ^{o}C) traçador passivo dissolvido na água, g (m/s^2) aceleração da gravidade, v_t, v_T (m/s^2) coeficientes de difusão da quantidade de movimento e do traçador, Z (m) elevação da superfície livre, t (s) tempo, x, y (m) coordenadas horizontais do espaço, S_h (m/s) fonte ou sumidouro do fluido, S_x, S_y (m/s^2) termos de fonte ou sumidouro em equações dinâmicas, S_T (g/l/s) fonte ou sumidouro do traçador, h, u, v e T são incógnitas.

[1] `opentelemac.org`

As equações são dadas em coordenadas cartesianas. S_x e S_y (m/s^2) são termos fonte representando o vento, força Coriolis, fricção inferior, uma fonte ou sumidouro de momento no domínio. Os diferentes termos dessas equações são processados em um ou mais passos:

- advecção de h, u, v e T;
- termos de propagação, difusão e fonte das equações dinâmicas;
- termos de difusão e fonte da equação de transporte do traçador.

Cada um desses passos pode ser pulado, e nesse caso diferentes equações são resolvidas. E ainda, cada uma das variáveis h, u, v e T podem ser acessadas separadamente. Nesse caso, é possível, por exemplo, resolver uma equação de advecção e difusão do traçador usando um campo fixo de velocidade de advecção.

A viscosidade turbulenta pode ser dada pelo usuário ou determinada por um modelo simulando o transporte de quantidades turbulentas k (energia cinética turbulenta) e ϵ (dissipação de energia cinética turbulenta), para as quais as equações são as seguintes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(k) = \frac{1}{h} div(h \frac{V_t}{\sigma_k} \vec{\nabla} k) + P - \epsilon + P_k v \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(\epsilon) = \frac{1}{h} div(h \frac{V_t}{\sigma_\epsilon} \vec{\nabla} \epsilon) + \frac{\epsilon}{k}(c_1 \epsilon P - c_2 \epsilon \epsilon) + P_\epsilon(v) \tag{4.6}$$

Os termos do lado direito dessas equações representam a produção e destruição de quantidades turbulentas (energia e dissipação). Quando efeitos não hidrostáticos não são negligenciados, as equações de Saint-Venant podem ser melhoradas adicionando termos extra. Vale ressaltar que o TELEMAC2D é um modelo livre de código aberto e escrito na linguagem FORTRAN, permitindo que os usuários tenham acesso aos *scripts* e possibilidade de edição dos mesmos.

4.2. Dados

Os dados utilizados para a pesquisa são dados de delimitação do domínio numérico, vazão e nível dos rios, batimetria dos rios, topografia da área de estudo, além da delimitação da inundação feita em solo, para o mês de setembro de 2013, e a delimitações de inundação adquiridas do SAR Sentinel-1, em junho de 2017.

4.2.1. Delimitação do domínio

Para a delimitação da área de estudo foram traçados inicialmente vários polígonos que representariam os canais do rio com auxílio do *software Google Earth*[2]. Esses polígonos foram exportados para o *software* de sistema de informações geográficas QGIS[3]. No QGIS os polígonos foram unidos formando apenas um polígono georreferenciado que representa todos os canais da região de estudo.

[2] `https://www.google.com/earth/`
[3] `http://www.qgis.com/`

A partir do polígono dos canais, foi criado um *buffer* de 500 m procurando abranger toda a área de inundação. Esse *buffer* foi ajustado manualmente, sendo alargado de acordo com o mapa de inundação e em áreas de planícies. Foi reduzido em áreas onde visivelmente o relevo não permite a chegada da inundação. O polígono do rio e o *buffer* criados podem ser visualizados na Fig. 3.1.

4.2.2. Dados Fluviométricos

Os dados de vazão e nível nos Rios Itajaí do Sul, Itajaí do Oeste e Itajaí-Açú foram adquiridos da ANA (Agência Nacional de Água), nas estações fluviométricas que estão indicadas, por rios na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela resumo das estações da ANA utilizadas nesse trabalho

Rio	Localização (lat. lon.)	Município	Código da estação	Tipo de dado coletado	Intervalo de coleta/ transmissão dos dados
Itajaí do Oeste	$-27°6'50{,}04''$ $-49°59'43{,}08''$	Taió	8305000	Vazão	15/60 min
	$-27°11'54{,}96''$ $-49°47'8{,}16''$	Rio do Oeste	83059000	Nível e vazão	60/60 min
Itajaí do Sul	$-27°23'54{,}96''$ $-49°36'20{,}88''$	Ituporanga	83250000	Vazão	15/60 min
	$-27°17'36{,}96''$ $-49°39'2{,}16''$	Aurora	83270000	Vazão e nível	60/60 min
Itajaí-Açú	$-27°12'28{,}08''$ $-49°37'45{,}12''$	Rio Do Sul	83300200	Nível e vazão	15/60 min

Os dados fluviométricos foram selecionados em períodos em que todas as estações apresentassem dados de vazão (nos Rios Itajaí do Sul e Itajaí do Oeste) e nível (no Rio Itajaí-Açú). Os eventuais dados faltantes nas séries temporais foram preenchidos através de interpolação polinomial de primeiro grau. O resultado desse procedimento pode ser visualizado na Fig. 4.1, que mostra a série temporal sem interpolação (topo) e a série com interpolação (base) para as vazões na estação 83050000 em Taió, para o ano de 2013. É importante ressaltar que todos os dados utilizados levaram em consideração uma base horária.

4.2.3. Cenários de simulação

Os dados fluviométricos de nível e vazão utilizados para as condições iniciais no modelo compreendem dois períodos com informações de estações diferentes, nos quais foram realizadas as simulações. Um primeiro compreendendo todo o ano de 2013, com dados de vazão obtidos das estaçoes das cidades de Ituporanga (estação 83250000) e Taió (estação 8305000).

O segundo período iniciou em 19 de abril de 2015 e terminou em 09 de março de 2018, com dados de vazão sendo obtidos nas estações de Aurora (número 83270000) - devido à falta deles na cidade de Ituporanga - e Taío (estação 8305000). Todos os níveis foram utilizados no Rio Itajaí-Açú, em Rio do Sul (estação 83300200), e diante disso, existem dois cenários para simulação diferenciados, apresentados na Tab. 4.2.

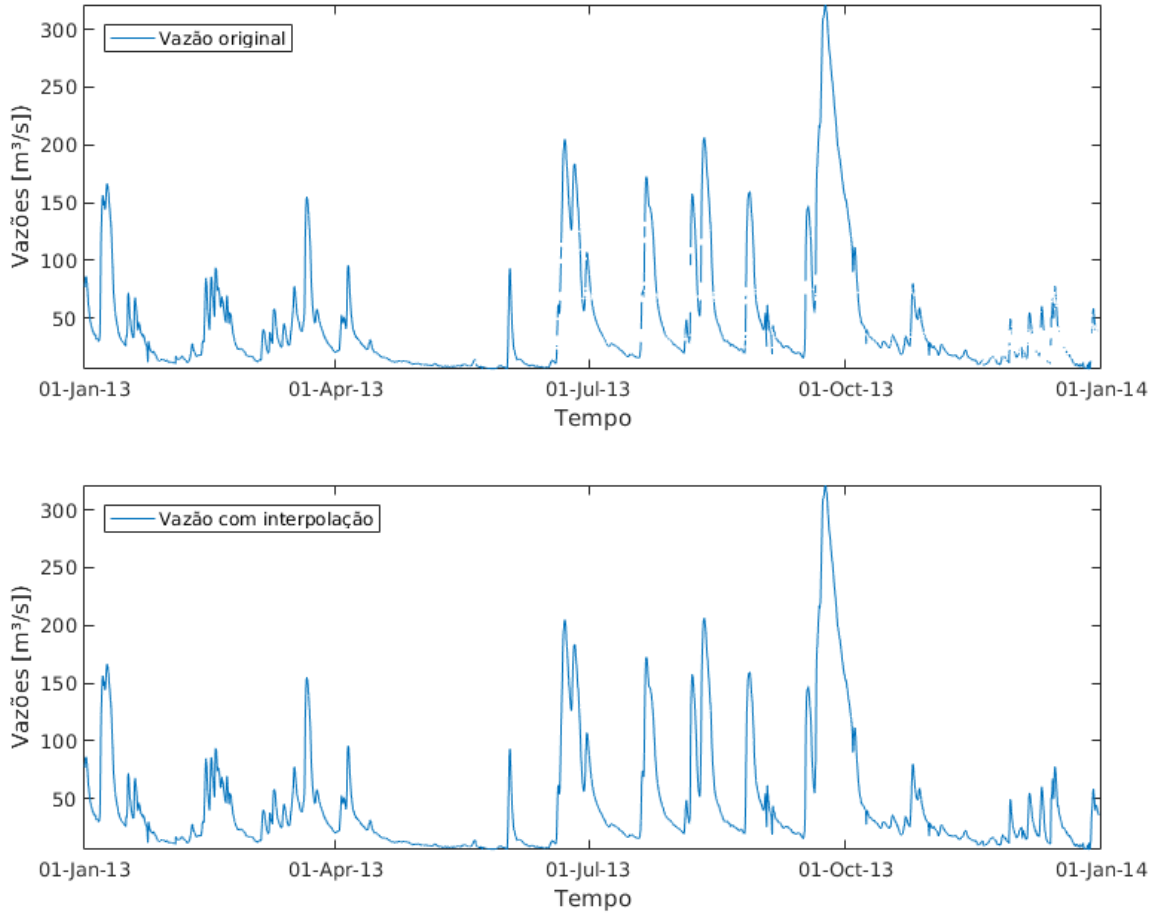


Figura 4.1 – Série temporal com dados faltantes (topo) e com interpolação (base). Dados de vazão na cidade de Taió.

Tabela 4.2 – Períodos de estudo

	Dados de Vazão (cidades)	**Período de tempo**
Cenário 1	Ituporanga e Taió	01/01/2013 a 31/12/2013
Cenário 2	Aurora e Taió	19/04/2015 a 09/03/2018

Ainda existem fluviometrias que foram utilizadas para a validação do modelo, na cidade de Rio do Oeste, onde podem ser encontrados dados de nível e vazão na estação de número 83059000. Uma visualização desses dados é encontrada na Fig. 4.2. Na legenda da figura encontra-se, na primeira linha, a utilização dos dados (contorno líquido ou validação) nos cenários apresentados na Tab. 4.2. Na segunda linha, consta o número da estação e o tipo de dado coletado. A terceira linha apresenta as cidades onde se localizam e a quarta linha traz a finalidade da utilização dos dados (condição inicial ou validação do modelo).

4.2.4. Dados Topográficos

Os dados topográficos compreendem os dados dos Modelos Digitais de Elevação (DEM). Para os testes iniciais foi utilizado o DEM *Space RADAR Topographic Shuttle* (SRTM), com

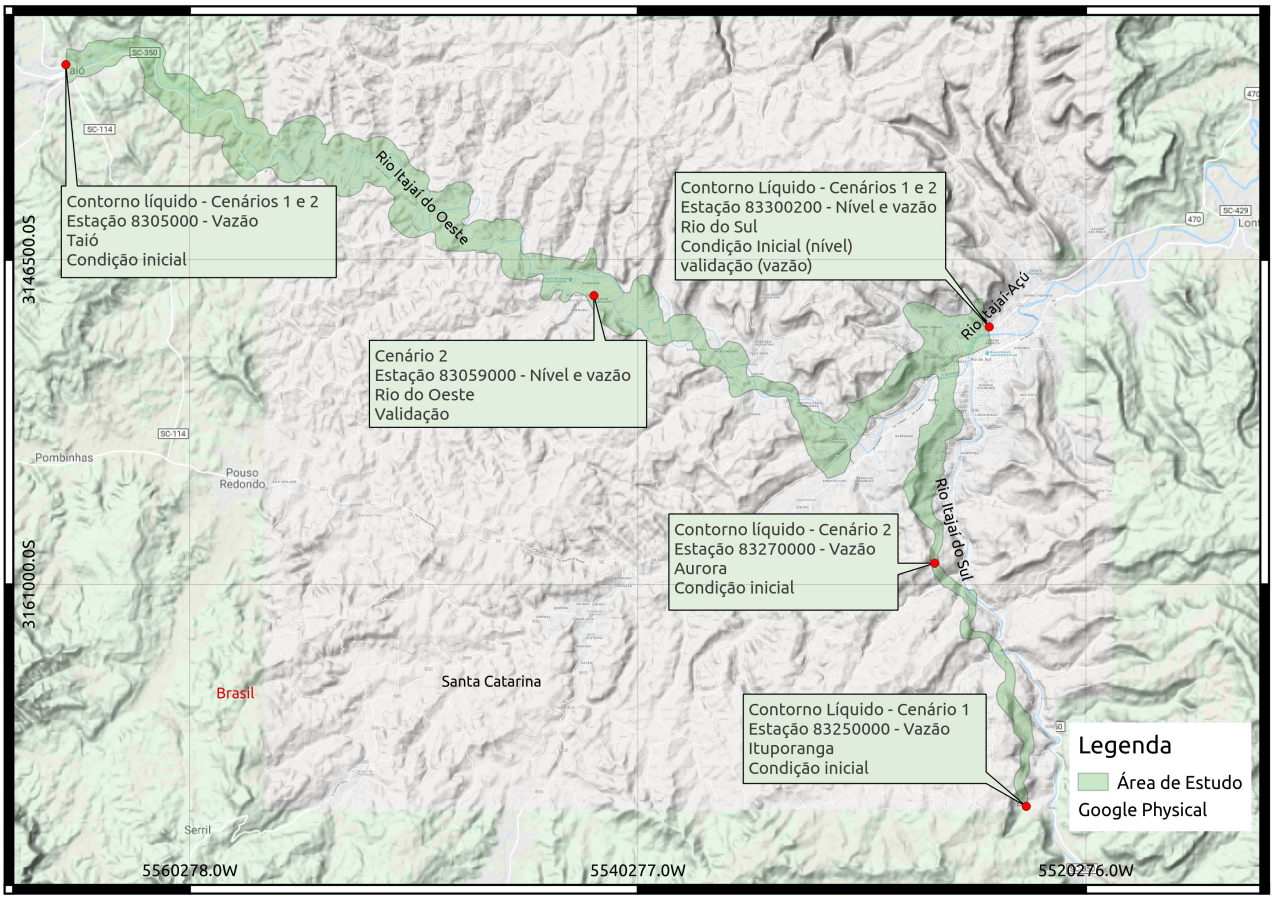


Figura 4.2 – Localização das estações fluviométricas com dados coletados e finalidade de cada uma.

resolução horizontal de aproximadamente 30 m obtidos online [4]. O SRTM usou um RADAR de imageador para mapear a superfície da Terra inúmeras vezes, a partir de diferentes perspectivas. A combinação desses dados de RADAR foi processada no *Jet Propulsion Laboratory* para produzir um mapa topográfico global criado por sinais de RADAR refletidos da superfície da Terra de volta ao ônibus espacial[5]. Posteriormente, foi utilizado o DEM, disponibilizado pelo Sistema de Informação Geográficas de Santa Catarina[6] de melhor resolução (aproximadamente 1 m), gerado no levantamento aerofotogramétrico do estado de Santa Catarina, em 2010.

A resolução espacial do DEM é um questão importante a ser tratada na modelagem de processos de inundação em rios, uma vez que ela dá a representação das características do relevo de uma região. Portanto, um DEM deve ser capaz de capturar as principais características do relevo da área de estudo.

Pensando em analisar a possibilidade de utilização do DEM SRTM para simulação de inundações, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos pelo TELEMAC2D empregando os dois DEMs,de acordo com o cenário 1, definido na Tab. 4.2. Foram utilizadas as

[4] `https://earthexplorer.usgs.gov/` acesso em 18 de maio de 2018

[5] Informação disponível em `https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2014-321` Acesso em 03 de setembro de 2018

[6] `http://sigsc.sds.sc.gov.br/` acesso em 18 de maio de 2018.

mesmas configurações do modelo nas simulações, alterando apenas o DEM. Com isso, é possível verificar a aplicadade do modelo SRTM em estudos de caso de inundações tem em vista que esse é um modelo global. Os resultados dessa comparação se encontram na seção 5.2.

Os dados batimétricos foram cedidos pela Defesa Civil de Santa Catarina onde foram levantadas 116 seções transversais de batimetria ao longo do Rio Itajaí do Sul, Rio Itajaí do Oeste e Rio Itajaí-açu, principalmente nas áreas próximas à cidade de Rio do Sul. Os levantamentos topográficos planialtimétricos cadastrais foram executados em áreas pré-estabelecidas na região central do município de Rio do Sul no ano de 2014.

Estas áreas são localizadas as margens dos Rios Itajaí do Sul, Itajaí do Oeste e Itajaí-Açú, com a largura de 40 m a partir das margens dos respectivos rios. Os desenvolvimentos em campo ocorreram com Estação Total tendo como pontos de partidas os pontos rastreados com receptores GPS (Ambiental, 2015).

4.2.5. Tratamento dos dados topográficos

Os dados topográficos dos DEMs não oferecem dados a respeito das calhas dos canais. Para isso, é necessário que dados batimétricos sejam utilizados para que a morfologia da calha seja bem representada. Logo, os dados dos DEMs e do levantamento batimétrico foram integrados e alocados em único arquivo, denominado aqui como modelo topobatimétrico. Para isso, em um primeiro momento, foi necessário criar um modelo batimétrico para o leito do canal, e depois combiná-lo com os dados de elevação da planície de inundação, conforme proposto por Farina et al. (2015).

Para criar a topografia do leito foram realizados os seguintes procedimentos Farina et al. (2015):

1. Utilizando o contorno do rio foram criadas três linhas, que são chamadas aqui de linhas de profundidade, formadas por pontos espaçados por cerca de 15 m. A linha central procurou seguir o talvegue do rio, mas como não há batimetria para toda a área de estudo, ela foi alocada de forma subjetiva, e as outras duas linhas procuraram seguir a metade da distância entre a linha central e o contorno do rio. Todas as linhas forma criadas no QGIS.
2. Os valores da altitude dos pontos de cada linha de profundidade, na área onde há batimetria, foram obtidos da seguinte forma:
    - Uma linha foi criada ligando cada um dos pontos das seções transversais da batimetria;
    - Esta linha criada cruza as linhas de profundidade, e esse ponto de cruzamento recebeu o valor médio dos dois pontos mais próximos da seção de batimetria;
    - Para os demais pontos da linhas de profundidade, entre as seções batimétricas, os valores em cada um dos pontos foi atribuído por uma interpolação linear;
3. Para os locais onde não haviam seções de batimetria consecutiva, os valores de altitude das linhas de profundidade foram extrapolados a partir das seções batimétricas pela de-

clividade de cada um dos rios. Essa declividade foi calculada pelo talvegue, onde há seções batimétricas, e percebeu-se que ela foi muito próxima da declividade apresentada em Atlas (1986) (Fig. 3.2) e (Fig. 3.3), logo se mostrou apropriada.

Para gerar um único arquivo com dados da topografia criada do leito e a topografia do DEM, foram realizados os seguintes passos:

1. Do polígono da área de estudo foi excluído o polígono do rio;
2. Nesse polígono que não contém o rio, foi feito um "recorte" no DEM, excluindo, a seguir, todos os valores que não pertencessem a esse polígono;
3. Por último, os valores calculados anteriormente da batimetria, foram incluídos nesse recorte, criando então o modelo topobatimétrico, de acordo com Farina et al. (2015).

4.3. Condições iniciais e de contorno

De posse dos dados fluviométricos e topográficos tratados, e dos dados de delimitação da área de estudo, foram geradas malhas de elementos finitos com o *software Blue Kenue*[7]. Os nós pertencentes ao canal têm espaçamento máximo de 10 m. A planície tem triângulos com vértices variando de 10 m a 45 m, com maior refinamento nas áreas próximas aos canais, fato que favorece que os processos hidrodinâmicos nessas regiões sejam melhor representados. A Fig. 4.3 apresenta a malha, a elevação e a localização onde foram impostas as condições de contorno líquido, na malha em que foram realizados os testes de calibração do modelo.

A localização dos contornos líquidos e sólidos, que servem de condição de contorno para o modelo também foram definidos no *Blue Kenue* assim como o arquivo *selafin*, necessário para as simulações. As condições iniciais foram geradas, definindo um nível inicial aos pontos da malha, pertencentes ao rio, bem como os coeficientes de fricção para o canal e para a planície de inundação. As condições de contorno nos contornos líquidos são vazões nos pontos a montante da cidade de Rio do Sul e os níveis na estação localizada na mesma cidade.

4.4. Calibração do modelo

Para a realização das simulações é necessário que o modelo utilize valores de fricção de fundo para cada ponto do domínio computacional. A fricção do TELEMAC2D, assim como muitos outros modelos, pode ser dada pelo coeficiente de *Manning*. Esse coeficiente varia de acordo com o relevo, vegetação, tipo e uso do solo (Di Baldassarre, 2012). Tendo informações a respeito das condições físicas do terreno, esses valores podem ser consultados em tabelas (Medeiros et al., 2012), ou ainda, podem ser ajustados de acordo com as diversas características do terreno como proposto em Arcement e Schneider (1989).

Arcement e Schneider (1989) propuseram que os valores de fricção de *Manning* em planícies de inundação podem ser calculados levando em consideração as irregularidades da superfície,

[7]Maiores informações podem ser encontradas em: `https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/blue_kenue_index.html`

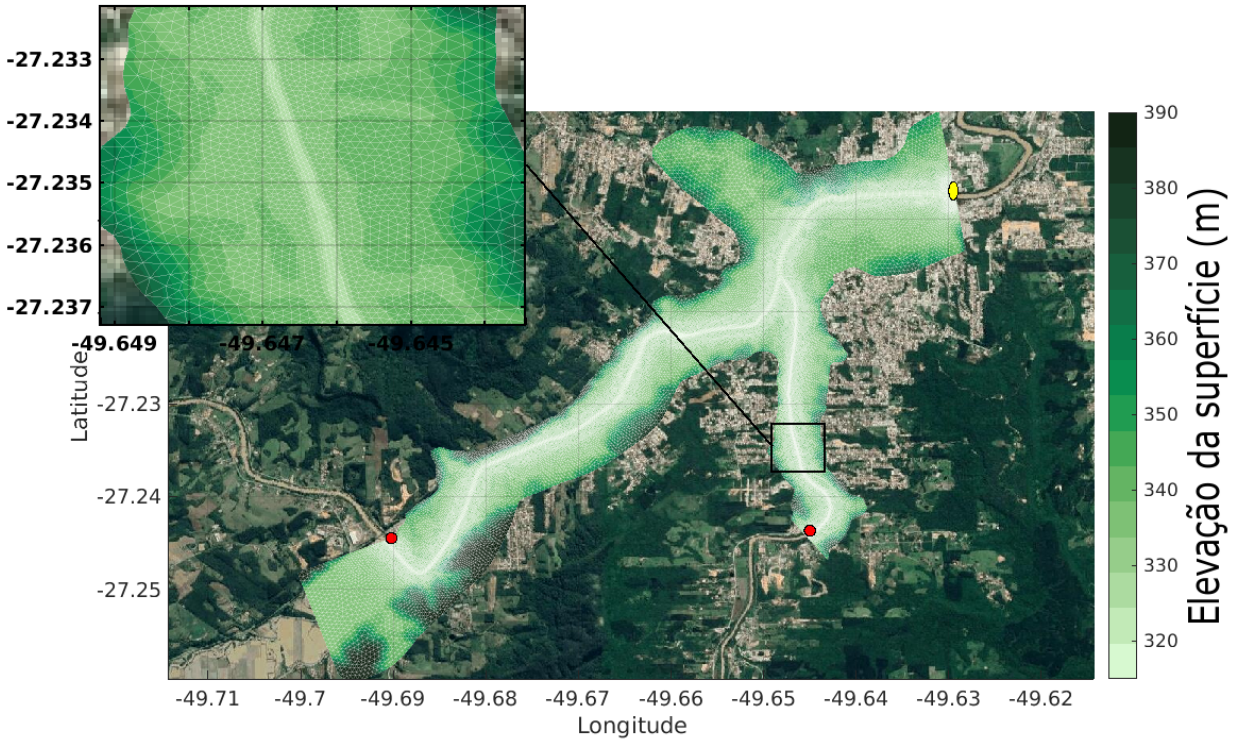


Figura 4.3 – Malha de elementos finitos. Os círculos vermelhos apontam os locais de imposição das condições de contorno de vazão e no amarelo, condições de nível foram impostos.

as obstruções e a vegetação. Para os canais, além desses fatores pode ser acrescentada a forma e a largura do canal.

Já Hughes et al. (2006a) apontaram que valores de fricção podem não ser fisicamente baseados, mas podem ser parâmetros efetivamente verdadeiros que não são facilmente determinados a priori. Mais ainda, para esses autores, a classificação de uso de solo e valores empiricamente determinados da literatura para atribuir valores de fricção, podem não ter significado, se as formulações de fricção forem derivadas de rios específicos. Desta forma, estes valores não devem ser usados fora desse contexto. Portanto, apesar de dados de topografia poderem prover uma direção para os valores de fricção, esses valores são inerentemente parâmetros de calibração, e segundo Hughes et al. (2006a), onde for possível, devem ser tratados como tal em qualquer abordagem de modelagem.

Levando em consideração o exposto acima, foram realizadas simulações para calibrar o coeficiente de Manning do modelo. Os parâmetros de fricção para as simulações de calibração foram escolhidos levando em consideração a metodologia de Arcement e Schneider (1989), definindo-se intervalos de variação para esses valores nos canais, áreas urbanas e não urbanas, que foram delimitadas através do mapa de tipo e uso de solo de Santa Catarina (Geoambiente, 2008).

Com isso, os canais têm valores de fricção no intervalo 0.025 a 0.04, as áreas urbanas no

intervalo 0.03 a 0.1 e áreas não urbanas de 0.03 a 0.1. Com esses valores, oito simulações foram realizadas através da combinação de valores e os resultados foram posteriormente analisados conforme metodologia presente na seção 4.5. A Tab. 4.3 indica como os valores de fricção foram combinados em cada um dos testes do parâmetro.

Tabela 4.3 – Combinações de valores de fricção de *Manning* para cada solo.

Simulação	Canal	Não Urbano	Urbano
1	0.025	0.05	0.03
2	0.025	0.05	0.1
3	0.025	0.13	0.03
4	0.025	0.13	0.1
5	0.04	0.05	0.03
6	0.04	0.05	0.1
7	0.04	0.13	0.03
8	0.04	0.13	0.1

A hidrodinâmica da região foi simulada para todo o ano de 2013 para realizar as calibrações dos coeficientes de fricção. Para isso um nível inicial de água de 1.5 m foi definido como condição inicial para todos os nós da malha que pertencem ao canal. Esse valor foi testado em simulações anteriores e escolhido como ótimo para inicialização do modelo.

Embora todo o ano tenha sido simulado, as vazões foram avaliadas apenas a partir do dia 2 de março, visto que com esses 60 dias o modelo já estava fornecendo resultados com maior estabilidade para os processos, que não são bem representados no início das simulações, devido às dificuldades de estabelecer um valor preciso de nível para todo o rio como condição inicial.

4.5. Metodologia de análise dos resultados

Os resultados foram avaliados por técnicas estatísticas de validação dos resultados modelados. Após realizadas as simulações, os resultados são validados usando o mapa de inundação da cidade de Rio do Sul, cedido da Defesa Civil municipal, que é um *shapefile* com polígonos de áreas alagadas delimitado em solo após a inundação. Além disso, foram utilizadas imagens SAR do Sentinel-1 com resolução temporal de 12 dias e resolução espacial de 10 m, que já demonstraram serem capazes de mapear áreas inundadas como apresentado em Costi et al. (2016) e Twele et al. (2016).

Os resultados da extensão de inundação foram avaliados por medidas revisadas por Di Baldassarre (2012) que é baseada em uma tabela de contingência (Tab. 4.4) que reporta os acertos, comissões (delimitação excessiva) e omissões (sub-delimitação).

Tabela 4.4 – Tabela de Contingência

	Observado Inundado	Observado Seco
Simulado Inundado	A	B
Simulado Seco	C	D

Para avaliar a extensão da inundação no tempo em que o mapa de inundação foi produzido, foram utilizadas as medidas de ajuste pontual F_1 e F_2 definidas abaixo, onde F_1 varia de 0 a 1 enquanto que F_2 varia de -1 a 1 e o termo $-B$ no numerador desta última é usado para penalizar comissões.

$$F_1 = \frac{A}{A+B+C} \tag{4.7}$$

$$F_2 = \frac{A-B}{A+B+C} \tag{4.8}$$

Para realizar uma avaliação temporal das simulações, foram comparadas as vazões do modelo com as vazões reais. A princípio foram comparadas as médias e desvios padrões calculados e simulados. Além disso, a eficiência na simulação das vazões foi analisada pelo $RMSE$ (Eq. (4.9)) (*Root Mean Square Error*), pela medida E (Eq. (4.10)) (Nash e Sutcliffe (1970) Efficiency), frequentemente utilizada em análises de vazões (Di Baldassarre, 2012).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(Q_s(t) - Q_0(t))^2}{n}} \tag{4.9}$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n}[Q_o(t) - Q_s(t)]^2}{\sum_{t=1}^{n}[Q_o(t) - Q_m]^2} \tag{4.10}$$

A eficiência de Nash-Sutcliffe pode variar de $-\infty$ a 1. Uma eficiência de 1 (E = 1) corresponde a uma combinação perfeita de descarga modelada com os dados observados. Essencialmente, quanto mais próxima a eficiência do modelo for de 1, mais preciso será o modelo.

Também foram utilizadas as medidas MAPE *(Mean Absolute Percentage Error)* (Eq. (4.11)) que expressa a acurácia do erro em percentagem e correlação de Pearson (Eq. (4.12)), que mostra se as vazões apresentam tendências de crescimento e decrescimento linearmente relacionados.

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \left|\frac{(Q_o(t) - Q_s(t)}{Q_o(t)}\right|}{n} \tag{4.11}$$

$$r = \frac{n\sum_{t=1}^{n}(Q_o(t) \cdot Q_s(t)) - (\sum_{t=1}^{n} Q_o(t)) \cdot (\sum_{t=1}^{n} Q_s(t))}{\sqrt{n\sum_{t=1}^{n} Q_o(t)^2 \cdot (\sum_{t=1}^{n} Q_o(t))^2}\sqrt{n\sum_{t=1}^{n} Q_s(t)^2 \cdot (\sum_{t=1}^{n} Q_s(t))^2}} \tag{4.12}$$

Onde n é o tamanho da amostra analisada, t é o tempo (s), $Q_s(t)$ (m^3/s) e $Q_o(t)$ (m^3/s) são as vazões simuladas e observadas respectivamente no tempo t, e Q_m (m^3/s) é a vazão média da amostra observada.

4.5.1. Período de retorno

Além de indicar as áreas suscetíveis a inundação, ainda é apresentado o período de retorno (TR) de cada um dos eventos estudados conforme a definição dada por Santos (2007). Com isso, pode-se encontrar um indicativo da frequência e magnitude das inundações que acontecem, sendo que esse parâmetro pode ser utilizado para a análise de risco e dimensionamento de obras.

Santos (2007) estabelece período de retorno como o intervalo médio de anos com que um evento hidrológico pode ser igualado ou superado pelo menos uma vez. O TR pode ser obtido através do inverso da probabilidade (P) de ocorrência.

Quando não se conhece a probabilidade teórica de ocorrência de um evento pode-se estimá-la a partir da frequência (F_n) observada desse evento, ou seja, $P \approx F$ (Santos, 2007). A frequência é o número de vezes que o evento de determinada magnitude é igualado ou superado em um período de tempo Δt, portanto

$$F = \frac{F_n}{\Delta t} \tag{4.13}$$

$$P = F \tag{4.14}$$

$$TR = \frac{1}{P} = \frac{\Delta t}{F_n} \tag{4.15}$$

4.5.2. Padrões de Inundação

Além de mapear as áreas inundadas em cada evento de inundação, a utilização da metodologia permite que outras informações a respeito do escoamento na região sejam adquiridas. Portanto são apresentados dois outros padrões encontrados pelo modelo, como forma de quantificar o alagamento, pela indicação da duração do alagamento em cada parte do domínio e a profundidade máxima atingida pela água.

A duração do alagamento foi encontrada ao analisar, a cada passo de salvamento do modelo, se os nós da malha estavam ou não alagados. Para cada um dos períodos o número de passos foi salvo e apresentado em escala de dias.

Já a profundidade máxima da inundação foi encontrada analisando para cada nó da malha, a cada passo de salvamento, suas profunidades e selecionando a maior.

4.6. Imagens de sensoriamento remoto

Para realizar a validação do modelo foram utilizadas imagens do radar sentinel-1. As imagens foram baixadas do *Copernicus Open Access Hub*[8] da Agência Espacial Europeia. As imagens de radar em Banda-C oferecem vantagens sobre as imagens óticas pois são capazes de capturar informações sob qualquer condição climática e durante dia ou noite.

Para esse trabalho, foram utilizadas imagens dos SAR Sentinel-1A e Sentinel-1B com modo do sensor IW (*Interferometric Wide*). O modo IW é o principal modo de aquisição em terra e satizfaz a maioria dos requerimentos nessas aplicações. Os dados são adquiridos em faixa de 250 km com resolução espacial de 10 m (De Zan e Guarnieri, 2006).

É consenso que as imagens de RADAR, que são adquiridas em tons de cinza, apresentam as áreas inundadas mais próximas do preto, devido ao retroespalhamento especular das ondas na superfície. Contudo, para a classificação dessas áreas há a necessidade de entendimento

[8]Disponível em `https://scihub.copernicus.eu/` Acesso em 28 de janeiro de 2018.

das características do retroespalhamento e então determinar um algoritmo adequado para a extração da área de inundação(Addae, 2018).

Dois tipos de algoritmos são amplamente utilizados para mapeamento de áreas alagadas: o método do limiar do histograma e o método de detecção de mudanças na imagem.

O método do limiar do histograma consiste na determinação de um limiar através do histograma de uma imagem SAR para separar as áreas inundadas das não-inundadas (Di Baldassarre et al., 2009; Manavalan, 2017). Já o método de detecção de mudança é capaz de detectar alterações na superfície em diferentes períodos de tempo. Ele toma uma imagem referência como base (da área não inundada) e aplica uma operação aritmética (diferença ou quociente) com as bandas e com o resultado identifica as áreas que tiveram ou não mudanças Addae (2018).

4.6.1. Processamento das Imagens

O processamento das imagens para extração das áreas inundação ocorreu em duas partes: o pré-processamento e a detecção da inundação.

No pré-processamento, as ferramentos do S1TBX (*Sentinel-1 Toolbox*) do software SNAP foram utilizadas. Esse software conta com uma interface gráfica de fácil utilização e pode ser baixado gratuitamente em `http://step.esa.int/main/download/`.

O pré-processamento das imagens previamente baixadas foi constituido de: a) calibração das imagens; b) Correção do Terreno; c) Subset; e d) Correção do ruído speckle com o filtro Gamma em janelas 3x3 com 2 visadas, de acordo com Long et al. (2014) e Kumbier et al. (2018)

Para a identificacão das áreas inundadas foi utilizado o método de detecção de mudanças. Para a utilização do método é necessário que se escolha uma imagem de referência (R) em uma cena que não haja inundação. Essa imagem será a base para a detecção de mudanças nas demais imagens que se suponha que haja áreas alagadas (F).

A escolha da imagem R foi baseada em Hostache et al. (2012) que determinou três índices para a escolha da imagem de referência. o método apresentado pelos autores inclui os seguintes passos: *i)*: Identificação de imagens candidatas a referência; *ii*: cálculo de um índice ($index_1$) expressando o a probabilidade de inundação na imagem candidata; *iii*: cálculo do índice de anomalia 2 ($index_2$) expressando a representatividade estatística da distribuição de retroespalhamento inferida da imagem candidata, e; *iv*: cálculo do índice 3 $index_3$ que é uma combinação dos índices anteriores.

O $index_1$ deve expressar o espalhamento de uma imagem na distribuição dos valores de retroespalhamento, e é baseado nos percentis de 5% e 95% dos valores de retroespalhamento da imagem i, conforme a Eq. (4.16)

$$index_1(i) = p_{95\%,i} - p_{5\%,i} \tag{4.16}$$

onde $p_{95\%,i}$ e $p_{5\%,i}$ são respectivamente os percentis de 95% e 5% dos valores de retroespalhamento da imagem candidata i. Esses valores são reescalados entre 0 e 1 para facilitar a interpretação.

O segundo índice avalia o grau pelo qual a distribuição de retroespalhamento de uma imagem reflete o comportamento do retroespalhamento de todo o conjunto. Esse índice representa a distância entre a distribuição estatística do retroespalhamento de uma imagem candidata e a distribuição estatística do retroespalhamento mediano sobre o conjunto de candidatos (Eq. (4.17))

$$index_2(i) = ||\tilde{f} - f(i)|| \tag{4.17}$$

A distribuição empírica f_i corresponde à distribuição dos valores de retroespalhamento de uma imagem i. A distribuição de referência $\tilde{f}$ é a distribuição dos retroespalhamento mediano. Esse valor também é reescalado entre 0 e 1.

(Hostache et al., 2012) pontuam que um dos dois valores poderia ser escolhido dependendo do objetivo do trabalho, mas apontam um terceiro índice (Eq. (4.18)), que reune as informações dos dois anteriores e concluem que neste as imagens que apresentam o menor $index_3$ é a mais adequada para ser referência em aplicações de detecção de mudanças relacionadas e inundações.

$$index_3(i) = \sqrt{index_1(i)^2 + index_2(i)^2} \tag{4.18}$$

Após a escolha da imagem de referência método foi aplicado nas imagens do Sentinel-1 nas polarização VH e, e a expressão abaixo foi utilizada para encontrar as diferenças (D) nas imagens.

$$D = F - R \tag{4.19}$$

Ao aplicar esse operação nas imagens, que realiza os cálculos pixel a pixel, nas áreas onde não há mudanças os pixels têm valor zero, ou muito próximo disso, enquanto que nas áreas onde há mudanças os valores são positivos ou negativos. Visualmente, na imagem resultante, as áreas mais escuras representam as áreas inundadas e as áreas cinza onde não há mudanças (Long et al., 2014).

Após a aplicação da operação de diferenciação das imagens (Eq. (4.19)), uma máscara é aplicada a imagem resultante para que apenas os pixels que estão nas planícies de inundação continuem com seus valores. Aos demais é aplicado um valor não numérico que não interfira nos processos seguintes.

Devido a diferenças que podem ser encontradas nas imagens devido ao ângulo de incidência em colinas e declives, Long et al. (2014) apresenta, de acordo com Hess et al. (1990) um critério para a exclusão de áreas das análises em que o relevo tenha inclinação maior que 3º obtida através da inclinação DEM.

Foram excluídos das imagens os pixels com a inclinação maior que 3º. Os pixels inundados são mapeados de acordo com o critério apontado por Long et al. (2014), que sugere que os pixels inundados são aqueles em que seu valor é menor que a média dos pixel menos um coeficiente k_f multiplicado pelo desvio padrão dos pixels, ou seja:

$$D < [mean(D) - k_f \cdot std(D)] \tag{4.20}$$

onde $mean(D)$ e $std(D)$ são a média e o desvio padrão, respectivamente da imagem resultante da diferença. Os autores encontraram o valor $k_f = 1.5$ através de correlação visual com imagens Landsat e fotografias aéreas, assim como por identificação de padrões de inundação característicos como proximidade dos rios e inundação de córregos.

5. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados da modelagem hidrodinâmica. São apresentados os resultados da calibração do modelo, seguida da validação. Por último, alguns padrões de inundação observados em diferentes eventos, são estudados.

Em um artigo já publicado (Forster et al., 2018) são apresentados os primeiros testes realizados com o modelo, testando sua capacidade de reproduzir um dos eventos de inundação na área de estudo.

5.1. Calibração

Após definidos os possíveis valores para fricção de acordo com o apresentado na seção 4.4, e com as oito simulações de calibração realizadas, os resultados foram comparados e as medidas de eficiência para as vazões podem ser observadas na Tab. 5.1. Ao analisar essas medidas percebe-se que todas apresentam valores muito próximos. Contudo, a simulação 8 apresentou vantagem em todas as medidas, pois apresentou os menores RMSE e MAPE, e os maiores coeficientes E e r. Portanto, para o rio são utilizados coeficientes de *Manning* $n = 0.04$, para as áreas urbanas $n = 0.1$ e áreas não urbanas $n = 0.13$.

As áreas inundadas (em km^2) simuladas corretamente pelo modelo, além das áreas subestimadas, juntamente com as medidas de eficiência (Eqs. 4.7 e 4.8), são apresentadas na Tab. 5.2. Para a realização dessas análises, foi utilizado o polígono de inundação referente a 22 de setembro de 2013 como referência e a área que representa o rio foi excluída, dado que sua presença aumenta a área de acerto e com isso superestima as medidas de eficiência.

Tabela 5.1 – Medidas de eficiência para as vazões calculadas

Simulação	RMSE	MAPE	E	r
1	112.7296	0.8755	0.6194	0.9164
2	112.2970	0.8739	0.6223	0.9192
3	112.4279	0.8726	0.6214	0.9159
4	112.6571	0.8734	0.6199	0.9227
5	112.0914	0.8756	0.6237	0.9130
6	112.3312	0.8741	0.6221	0.9221
7	111.9099	0.8748	0.6249	0.9152
8	111.0095	0.8707	0.6309	0.9263

A área de inundação total é de 5.801 km^2, e analisando as áreas de acerto na terceira coluna da Tab. 5.2 percebe-se que, em todas, a medida foi inferior quando comparada à medida de campo. As simulações 4 e 8 apresentaram os melhores resultados nesse quesito, assim como nas áreas de omissão, onde apresentaram valores de 0.1641 km^2 e 0.1595 km^2, respectivamente. Ao analisar as áreas de comissão nota-se que nessas simulações foram obtidos os piores resultados, devido as maiores comissões.

Tabela 5.2 – Medidas de extensão de inundação: Áreas de omissão, comissão e acerto. Medidas de eficiência para simulação da extensão.

Simulação	**Área de Omissão (km^2)**	**Área de comissão (km^2)**	**Área de Acerto (km^2)**	F_1	F_2
1	0.2746	0.9419	5.3802	0.8156	0.6728
2	0.2333	1.035	5.4232	0.8105	0.6558
3	0.2113	1.0299	5.4435	0.8143	0.6602
4	0.1671	1.1758	5.4897	0.8035	0.6314
5	0.2725	0.944	5.3823	0.8157	0.6726
6	0.2329	1.0354	5.4235	0.8105	0.6557
7	0.2083	1.031	5.4462	0.8146	0.6604
8	0.1595	1.1776	5.4948	0.8043	0.6319

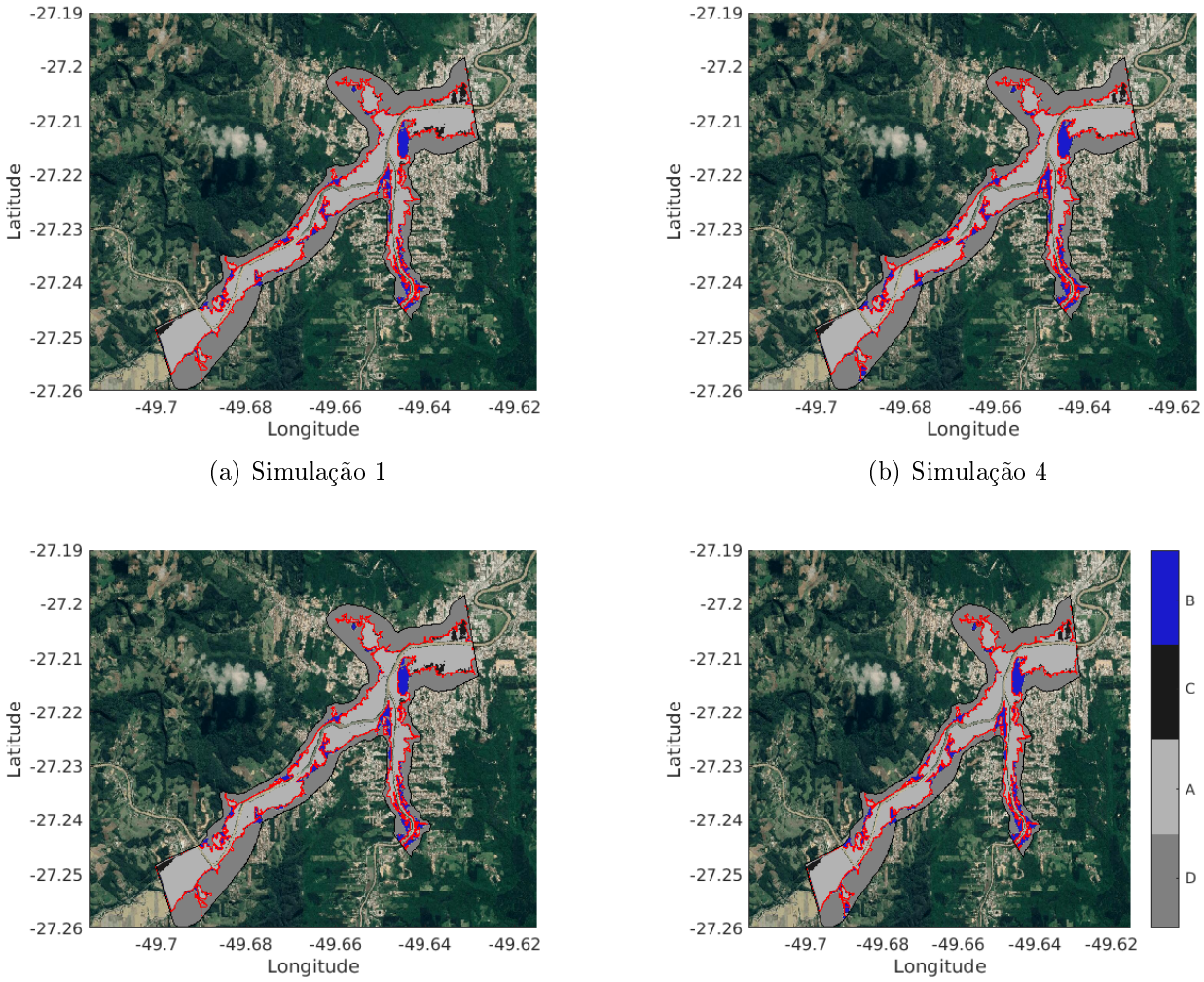
As melhores medidas de eficiência foram encontradas nas simulações 1 e 5, onde obtiveram-se as menores omissões. Contudo, nessas simulações obtiveram-se também as maiores comissões. Ao analisar essas omissões percebe-se que em relação a simulação 8, a área de omissão na simulação 1 é 72.16% maior. Já a área de comissão na simulação 8 é 25.07% maior que na simulação 1. A Fig. 5.1 mostra os resultados da extensão da inundação para as simulações 1 e 5, que obtiveram as melhores medidas de eficiência, e também os resultados para as simulações 4 e 8, que obtiveram os melhores resultados levando em consideração a menor omissão.

As medidas de eficiência F_1 e F_2 não diferiram além de centésimos, e a fim de que o máximo de riscos sejam mapeados, é melhor que o modelo superestime a área inundada. Desta forma, a simulação 8 foi considerada como tendo o melhor desempenho para atender aos objetivos desse trabalho, visto que apresenta medidas de validação muito próximas às outras e provém a menor área de omissão. Esses resultados concordam com os resultados obtidos para as vazões. Logo, através das análises, os parâmetros de fricção escolhidos para a simulação 8 são os que melhor se ajustam ao atendimento dos objetivos desse trabalho.

Destaca-se ainda que com essa configuração, a acurácia geral (acertos/área total) é de 94.65%. Essa medida não deveria ser utilizada (Di Baldassarre, 2012) uma vez que considera os acertos secos, que podem ser grandes, caso a delimitação da região seja muito maior que a área inundável. Contudo, como muitos trabalhos levam em consideração essa medida, ela é apresentada para ser utilizada como comparativo na falta de medidas de ajuste adequadas.

5.1.1. Discussões dos resultados da calibração

Ao realizar a calibração do modelo foi notado que os padrões de modelagem das vazões ou extensão da inundação apresentaram mudanças singelas, mesmo quando utilizados valores dos limites apresentados pela literatura. Horritt e Bates (2002) já haviam notado essa característica no modelo TELEMAC2D ao compará-lo à outros modelos, os quais se mostraram mais sensíveis. Os autores pontuaram que qualquer escolha dará uma boa previsão da extensão da inundação, e a calibração é menos importante do que para outros modelos estudados. O mesmo já havia sido notado por Horritt e Bates (2001).



(a) Simulação 1

(b) Simulação 4

(c) Simulação 5

(d) Simulação 8

Figura 5.1 – Resultados das simulações de calibração *versus* polígono de verificação para o evento de 22 de setembro de 2013. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados amostrados em solo. Legenda: A representa a área simulada inundada e observada inundada. B representa omissões. C reporta as comissões. D representa a área simulada e observada seca.

As medidas de ajuste encontradas na avaliação da extensão da inundação foram condizentes com trabalhos relacionados. Horritt e Bates (2002), ao utilizar o TELEMAC2D para simular eventos passados encontraram medidas de ajuste para a extensão de cerca de 0.65, enquanto que Vu et al. (2015) encontraram medidas de acerto em torno de 90% nos períodos de pico de inundação, mostrando com isso a acurácia do modelo.

Mesmo com as medidas de eficiência estando de acordo com as de trabalhos relacionados são notadas áreas grandes de comissão (Fig. 5.1). Essas áreas podem estar relacionadas à falta de representação no modelo de estruturas de escoamento artificial, ou, ainda, à falta de representação de elementos do ciclo hidrológico como infiltração e evaporação. Contudo, em períodos de pico de inundação, com a saturação do solo e grandes quantidades de água

na superfície, esses elementos são praticamente desprezíveis, sendo o escoamento superficial o principal ator no processo de formação da inundação (Mishra e Singh, 2013).

A comissão pode estar relacionada à resolução da malha utilizada. Yu e Lane (2006) realizaram diversas simulações hidrodinâmicas e mostraram que a extensão da inundação é altamente influenciada pela resolução da malha, sendo que malhas menos grosseiras geralmente geram os mesmos resultados no espaço e tempo. Buttner (2007) traz apontamentos parecidos e acrescenta que em áreas urbanas a resolução da malha afeta fortemente o caminho e o tempo da inundação.

Quando avaliadas as vazões calculadas pelo modelo em contraste com as reais, é percebido que na maior parte do tempo os resultados são subestimados, o que fez com as medidas de avaliação dos erros (RMSE e MAPE) fossem altas. Esses resultados são atribuídos principalmente ao fato de que cerca de 27% da área de captação não tenha dados fluviométricos disponíveis. Mesmo assim, o coeficiente de correlação de Pearson indicou forte correlação entre os resultados calculados e observados. A medida E, mesmo com as subestimações, mostrou valores bons, de acordo com as classificassões definidas por Moriasi et al. (2007).

Mesmo com algumas ressalvas, este trabalho apresenta uma nova alternativa para a modelagem de inundações na região. Na cidade de Rio do Sul, dois trabalhos foram publicados onde esforços foram realizados para a obtenção de previsão de vazões pontualmente (Cordero et al., 2003; Casagrande et al., 2017), contudo não apresentam resultados relacionados à extensão dos eventos.

No estado de Santa Catarina outros esforços têm sido feitos para a modelagem de áreas inundáveis. Momo et al. (2016) utilizaram o modelo HAND (*Height Above Nearest Drainage*), que é um modelo baseado na normalização do DEM em relação à elevação dos cursos de água da área estudada. Com isso, são encontradas alturas que podem ser classificadas de acordo com as distâncias verticais relativas aos cursos d'água mais próximos. Contudo, os resultados apresentados pelos autores, validados por mapas de inundação, as áreas de omissão variaram de 1.6 a 13.8%, e áreas de comissão variaram de 35.3 a 262.2%, não levando em consideração as características do escoamento superficial.

5.2. Contribuições a respeito do Modelo Digital do Terreno

Dois modelos digitais de terreno foram utilizados nesse trabalho. O primeiro foi o modelo SRTM, com resolução espacial de cerca de 30 m, que é um modelo global. O segundo é um modelo de alta resolução espacial (1 m), disponível para todo o estado de Santa Catarina (SCDEM). Essa seção avalia a aplicabilidade do modelo SRTM, uma vez que é um modelo de terreno disponível globalmente.

A malha utilizada nesse estudo conta com 564563 nós em uma área de 72.95 km^2. Os valores de fricção *Manning* para essas simulações foram definidos como 0.04 para os nós dentro dos rios e 0.18 para os nós fora dele. Mesmo não dispondo de uma medida de extensão da inundação realizada em campo para toda a área de estudo, a área em que o polígono existe é destacada

nas figuras onde tal extensão é analisada.

Em um primeiro momento, é avaliada a extensão da inundação no dia 22 de setembro de 2013. Essas extensões são apresentadas nas figuras Fig. 5.2 e Fig. 5.3. Como pode-se perceber, os padrões de inundação são parecidos nos resultados das duas simulações, apresentando mais riqueza de detalhes na Fig. 5.2, o que condiz com a melhor resolução do DEM na representação das características do relevo.

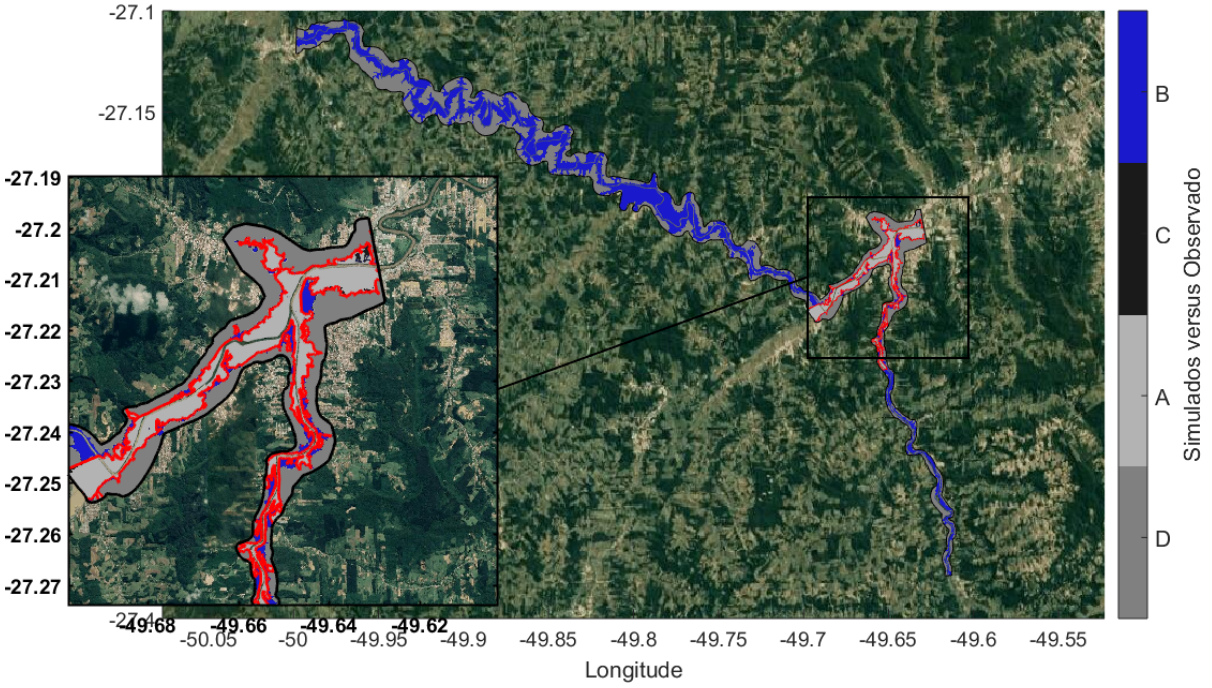


Figura 5.2 – Extensão da inundação no evento ocorrido em 2013 simulado com o DEM de alta resolução. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados amostrados em solo. Legenda: *A* representa a área simulada inundada e observada inundada. *B* representa áreas simuladas inundadas. *C* reporta as superestimações. *D* representa a área simulada seca.

Percebe-se nas partes destacadas de cada figura que as áreas de omissão são maiores na Fig. 5.3. A Tab. 5.3 traz um resumo das áreas simuladas secas e inundadas, assim como apresenta as áreas de omissão, destacadas em preto em cada uma das figuras.

Tabela 5.3 – Comparação das áreas simuladas com os dois diferentes DEMs

	SCDEM	**SRTM**
Área acerto inundação (km^2)	6.08	5.09
Área total inundada (km^2)	35.69	32.07
Área de omissão (km^2)	0.13	1.10

Vê-se que as áreas onde houve concordância entre o resultado das simulações e o polígono de inundação diferem cerca de 1 km^2, o que representa uma melhora de 20% nesse quesito

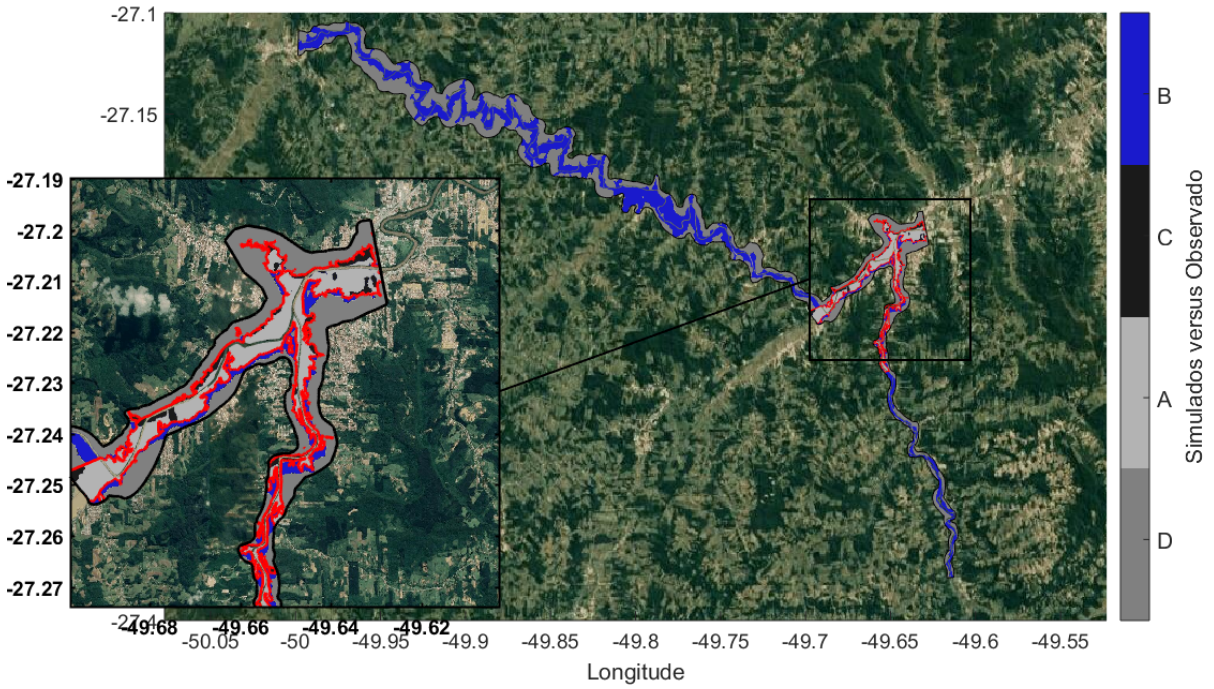


Figura 5.3 – Extensão da inundação no evento ocorrido em 2013 simulado com o DEM SRTM. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados amostrados em solo. Legenda: *A* representa a área simulada inundada e observada inundada. *B* representa áreas simuladas inundadas. *C* reporta as superestimações. *D* representa a área simulada seca.

considerando o DEM de alta resolução. Também é percebido que as áreas de omissão na simulação que utilizou o DEM de 1 m foi cerca de 1 km^2 maior do que a que utilizou o DEM com alta resolução, que representa um aumento 746% na área de omissão.

Comparando as áreas totais de algamento, nota-se um valor mais próximo nas análises do que os discutidos nos parágrafos acima. Então pode-se ter a ideia de que as maiores diferenças se encontram na área analisada, que é urbanizada, visto que a maior parte da região que ainda não foi considerada nas análises não é urbana.

Wang et al. (2018) analisaram as influências da qualidade e quantidade de informações utilizadas na modelagem de processos de inundação em áreas urbanas e perceberam que pequenas características urbanas podem influenciar significativamente os resultados da extensão e profundidade da água, concordando com os resultados encontrados aqui. Uma vez que as características do terreno urbano são melhor representadas pelo DEM de alta resolução, os resultados com a utilização deste são consideravelmente melhores.

Contudo, mesmo nas áreas não urbanizadas, que correspondem à maior parte da região de estudo, as diferenças se mantém como pode ser visto na Fig. 5.4, que apresenta um contraste entre as duas simulações. As áreas marcadas em cinza apresentam a concordância entre os resultados. As áreas em azul apresentam o que foi simulado como inundação utilizando o SCDEM e não inundado utilizando o SRTM e a área em vermelho apresenta o contrário.

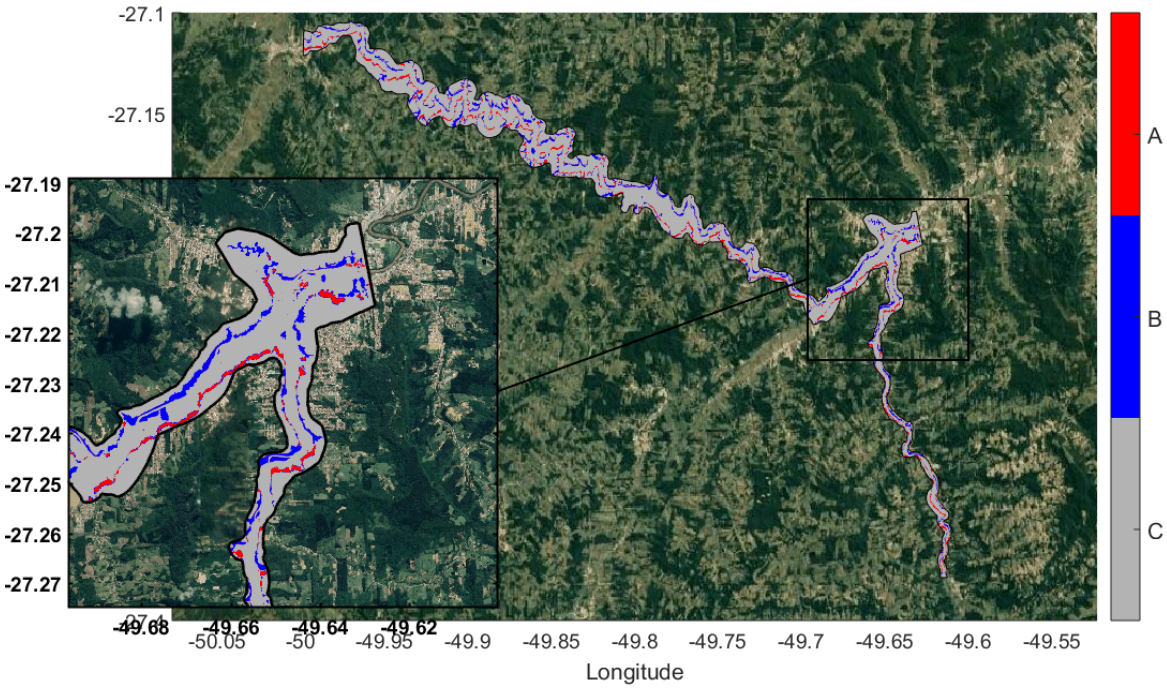


Figura 5.4 – Diferença entre os resultados obtidos com os dois diferentes modelos de terreno. A: Simulado inundado com o DEM SRTM e seco com o SCDEM. B: Simulado inundado com o SCDEM e seco com o SRTM. C: Concordância entre as simulações.

Thomas et al. (2014) compararam três modelos de terreno globais de resolução de 20 m e mostraram que a correlação entre o último e o DEM SRTM é a mais forte. Portanto poderia ser inferido que o DEM SRTM é o mais indicado para a finalidade de modelagem baseada em raster. Contudo, os resultados apresentados nesse trabalho, em acordo com Belladona et al. (2017), apontam que a medida que os relevos se apresentam mais acidentados, as diferenças entre os modelos são maiores, portanto é necessário cautela na utilização e interpretação dos resultados de modelagem baseada em DEM.

Acordando com esses resultados, as simulações realizadas aqui, mostram que para a região de estudo, predominantemente confinada por vales, com relevo ondulado, os resultados da modelagem com o modelo de terreno provido pelo SRTM pode não ser suficiente para capturar maiores detalhes do escoamento. Portanto, pode-se perceber que, embora as simulações hidrodinâmicas realizadas com o DEM SRTM sejam de certa forma similares aos obtidos com o DEM de alta resolução (Fig. 5.2) e (Fig. 5.3), as medidas estaísticas indicam considerável melhora com a utilização do SCDEM. Mesmo dentre os modelos de terreno disponíveis, o SRTM é o mais recomendado (Thomas et al., 2014), e os resultados ao longo de todo o domínio apresentam divergências tanto em áreas urbanas como rurais, e ao longo de todo o domínio de simulação.

Assim, é possível concluir que o modelo digital do terreno é um imporante fator para a qualidade dos resultados, principalmente em estudos de pequena escala. Ao observar os valores encontrados na calibração, que foram similares, também é evidente que um DEM de alta resolução supera a calibração do coeficiente de fricção com o fundo e é, portanto, um fator

decisivo na qualidade dos resultados.

5.3. Validação do modelo

Após a calibração do modelo, a extensão da inundação ocorrida no ano de 2017 foi validada utilizando um conjunto independente de dados. Visando utilizar toda a área à montante das estações fluviométricas que possuem dados, e simular a hidrodinâmica da região, foi realizada a simulação do segundo cenário da Tab. 4.2.

Para realizar essa validação, foram utilizadas imagens SAR do satélite Sentinel-1. A área de inundação foi simulada pelo TELEMAC2D utilizando os mesmos parâmetros de fricção apresentados anteriormente. A área de inundação adquirida do satélite seguiu os procedimentos apresentados na seção 4.6.

As vazões calculadas horárias pelo modelo podem ser vistas na Fig. 5.5 e as medidas de eficiência estão dispostas na Tab. 5.4. É importante ressaltar que embora todo o período compreendendo o cenário 2 da Tab. 4.2 (de 19/04/2015 a 09/03/2018) tenham sido simulados, apresentam-se aqui apenas os resultados a partir de outubro de 2016, quando avaliou-se que os dados apresentados nas vazões são adequados. O período anterior a este último apresentou várias inconsistências nos dados, como falta de dados em muitos períodos, que foram preenchidos por interpolação, e dados negativos de vazão, que não condizem com a realidade e que foram excluídos e calculados por interpolação, como explicitado na seção 4.2.2.

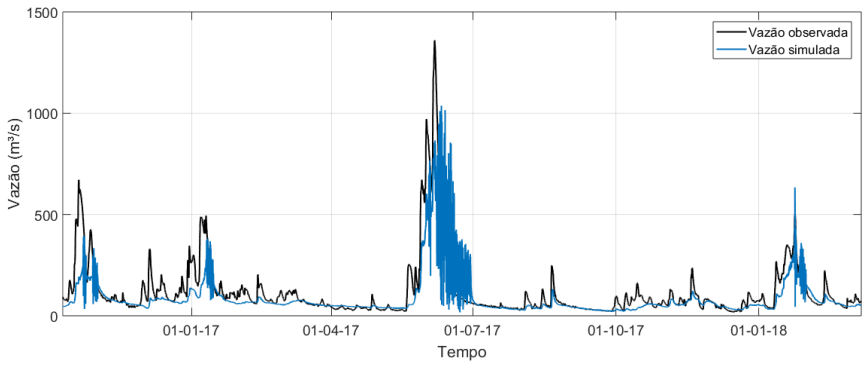


Figura 5.5 – Vazões encontradas pelo modelo no período de 10 de outubro de 2016 até 09 de março de 2018.

A partir das séries temporais de vazão e das estatísticas descritivas, é possível notar que os resultados são subestimados para todo o período de análise. Essa subestimação da vazão era esperada, uma vez que, assim como no cenário 1 de simulação, não há dados de vazão para todos os afluentes da área de contribuição.

As medidas de eficiência apresentaram-se similares às simulações realizadas anteriormente. Melhoras foram observadas no RMSE e MAPE, o que pode ser analisado como um bom resultado já que a amostra analisada é maior, e o tamanho da amostra pode afetar negativamente esses resultados.

Tabela 5.4 – Estatísticas descritivas e medidas de eficiência para a simulação realizada no cenário 2.

	Simulado	**Observado**
Máximo (m^3/s)	1036.9	1360.1
Média (m^3/s)	90.66	121.09
Desvio padrão (m^3/s)	107.67	154.68
Medidas de eficiência		
RMSE	94.5546	
MAPE	0.4890	
E	0.6263	
r	0.8257	

5.3.1. Extensão das inundações por imagens SAR

As imagens SAR utilizadas para a validação dos resultados do modelo para a inundação ocorrida no ano de 2017 são imagens Sentinel-1 na polarização VH, com resolução espacial de 10 m, adquiridas no período de 26 de março de 2017 até 16 de novembro de 2018. Essas imagens tem um intervalo de 12 dias, portanto foram utilizadas 50 imagens no processamento.

Embora não sejam aproveitadas todas as imagens na validação, uma vez que a inundação ocorreu em junho de 2017, todas as outras foram utilizadas para a escolha da imagem de referência a ser utilizada na detecção de mudanças, conforme especificado na seção 4.6, de acordo com as indicações encontradas em Hostache et al. (2012).

Após encontrar as imagens diferenciadas e procurando encontrar o índice k da Eq. (4.20), foram seguidas as recomendações de Long et al. (2014). Num primeiro momento foram procuradas imagens óticas da inundação para comparação, contudo todas as imagens de acesso livre que foram encontradas tinham cobertura de nuvens nos dias em que houve inundações.

Diante desse cenário, foi utilizada interpretação visual das próprias imagens SAR, e do histograma da imagem após a diferenciação procurando identificar picos nos menores valores das frequências dos pixels.

A imagem de referência para essse processo foi a imagem de 06 de junho de 2017. Na Fig. 5.6 pode ser visto o histograma da imagem após a aplicação da detecção de mudança (Eq. (4.19)). De acordo com a literatura da área (Di Baldassarre et al., 2009; Manavalan, 2017; Long et al., 2014), os picos nas frequências de valores baixos dos pixels (em dB) indicam um baixo retroespalhamento que são associados à presença de corpos d'água.

A média e o desvio padrão dos valores dos pixels nessas imagens foi de 0.0546 e 3.2350, respectivamente. Como é percebido na Fig. 5.6, há um pico na esquerda que representaria alta quantidade de pixels com baixo retroespalhamento, portanto, representantes da inundação.

De acordo com a Eq. (4.20), proposta por Long et al. (2014), os pixels inundados são aqueles que apresentam valores menores que a média menos um valor k multiplicado pelo desvio padrão. Os autores apresentaram $k = 1.5$, o qual foi tomado no presente estudo como referência. Com esse valor, os pixels inundados são os que têm valores menores que -4.7979 dB, que abarcaria os pixels do pico observado na Fig. 5.6. Contudo, por interpretação visual, foi percebido que a

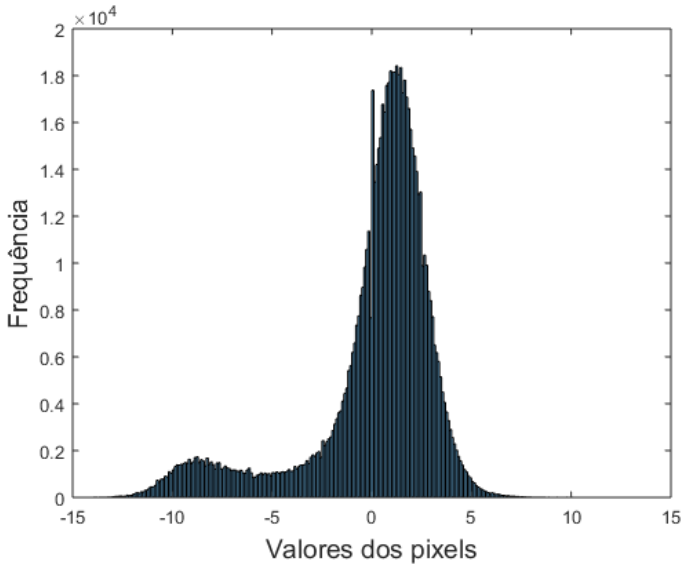


Figura 5.6 – Histograma da imagem de 06 junho de 2017 após a detecção de mudança.

área inundação seria, desta forma, subestimada.

É sabido que nessas imagens as áreas de inundação aparecem em tons mais escuros devido ao retroespalhamento especular das ondas de RADAR por superfícies cobertas por água (Addae, 2018). Então, a calibração do coeficiente supracitado foi realizada por comparação visual das imagens pós-processadas com as imagens sem processamento, e levando em consideração as características esperadas da inundação, como, por exemplo, que áreas próximas aos rios e com relevo plano sejam inundadas.

A Fig. 5.7 mostra um recorte selecionado para facilitar a visualização da imagem SAR no dia 06 de junho de 2017 acompanhada de três outras figuras associadas a valores de k, tomando 1.5 como referência e diminuindo gradativamente até 0.5.

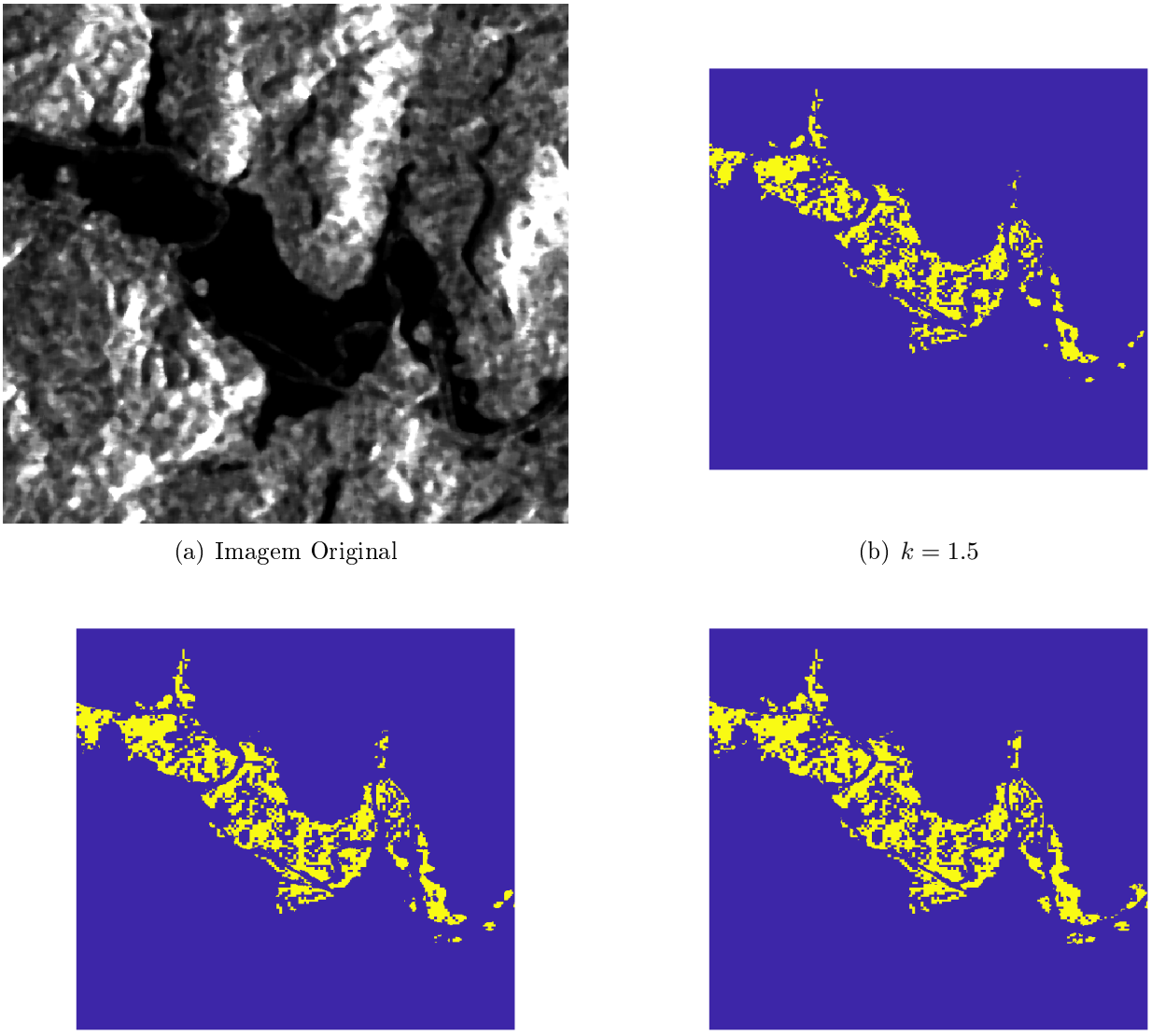
As imagens com menores valores de k contemplaram, visualmente, melhor a área inundada, porém em todas as imagens áreas que são visivelmente alagadas não foram contempladas nesse processo. Por isso, foi aplicado um filtro nas imagens para amenizar essa questão. Essa medida foi tomada tendo em vista que uma grande subtração dos valores de k não atende aos pressupostos do método, que retrata que os valores dos pixels alagados estão abaixo da média de sua distribuição (Long et al., 2014). Esses resultados são analisados e discutidos na seção 5.3.3.

Foi aplicado um filtro espacial de janelas de 3 x 3 pixels, em que o pixel central recebe o maior valor entre os 9 analisados. Após aplicados os filtros nas imagens da Fig. 5.7, foram encontradas os resultados da Fig. 5.8.

Através da comparação desses resultados com as imagens originais SAR, o valor de $k = 0.0$ foi adotado e aplicado o filtro citado em todas as imagens analisadas.

5.3.2. Resultados do modelo *versus* resultados das imagens SAR

Finalizadas as simulações do período de validação e a obtenção das áreas de inundação das imagens SAR, os resultados da extensão da inundação foram avaliados. A Fig. 5.9 mostra a



(a) Imagem Original

(b) $k = 1.5$

(c) $k = 1.0$

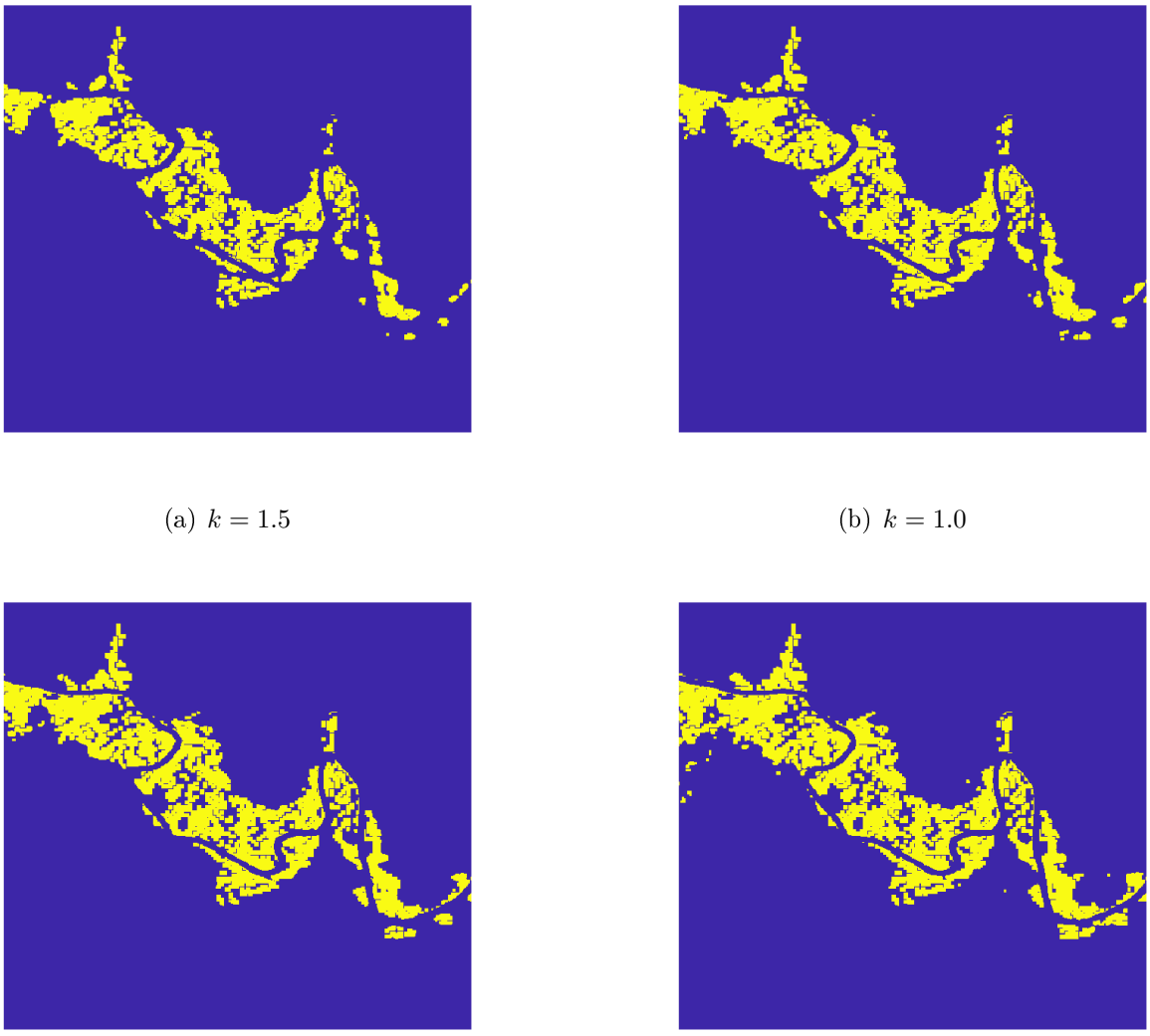
(d) $k = 0.5$

Figura 5.7 – Imagem SAR original e inudações encontradas para diferentes valores atribuídos a k.

extensão da inundação simulada em contraste com a observada no dia 06 de junho de 2017, que coincide com o pico de descarga observado (Fig. 5.5). A avaliação desses resultados, de acordo com a Eq. (4.7) e Eq. (4.8), apresentou resultados iguais a 0.40 e -0.11, respectivamente.

Segundo os resultados apresentados na figura, percebe-se que as extensões foram superestimados em boa parte do domínio computacional, somando 9.94 km^2. As áreas de coincidência entre os valores simulados e observados nas imagens totalizaram 7.71 km^2. A acurácia geral foi de 82.55%, e praticamente foram nulas as áreas de comissões.

Pode-se perceber ainda que na maioria da extensão da área de estudo há uma boa concordância entre a inundação modelada e observada. No detalhe da Fig. 5.9 é destacada uma região onde visivelmente são encontradas as maiores concordâncias. Mesmo pequenos detalhes, como os observados entre as latitudes -27.18° e -27.17°, obtiveram resultados muito semelhantes no



(a) $k = 1.5$ (b) $k = 1.0$

(c) $k = 0.5$ (d) $k = 0.0$

Figura 5.8 – Inudações encontradas para diferentes valores atribuídos a k depois da aplicação do filtro.

observado e simulado.

5.3.3. Discussão dos resultados da validação do modelo

Os resultados apresentados para as simulações das vazões para o período de validação apresentaram valores similares àqueles apresentados para as simulações de calibração, apresentando valores altos para o RMSE e MAPE, atruibuídos a falta de dados fluviométricos. Contudo, o coeficiente de correlação de Pearson apresentou forte correlação entre os resultados simulados e observados, e o coeficiente e de Nasch e Sutcliffe apresentou valores bons, de acordo com a classificação apresentada por Moriasi et al. (2007).

Os resultados da validação para a extensão da inundação foram promissores, considerando as características físicas da área de estudo. Embora a medida F_2 (Eq. (4.8)) tenha apresentado

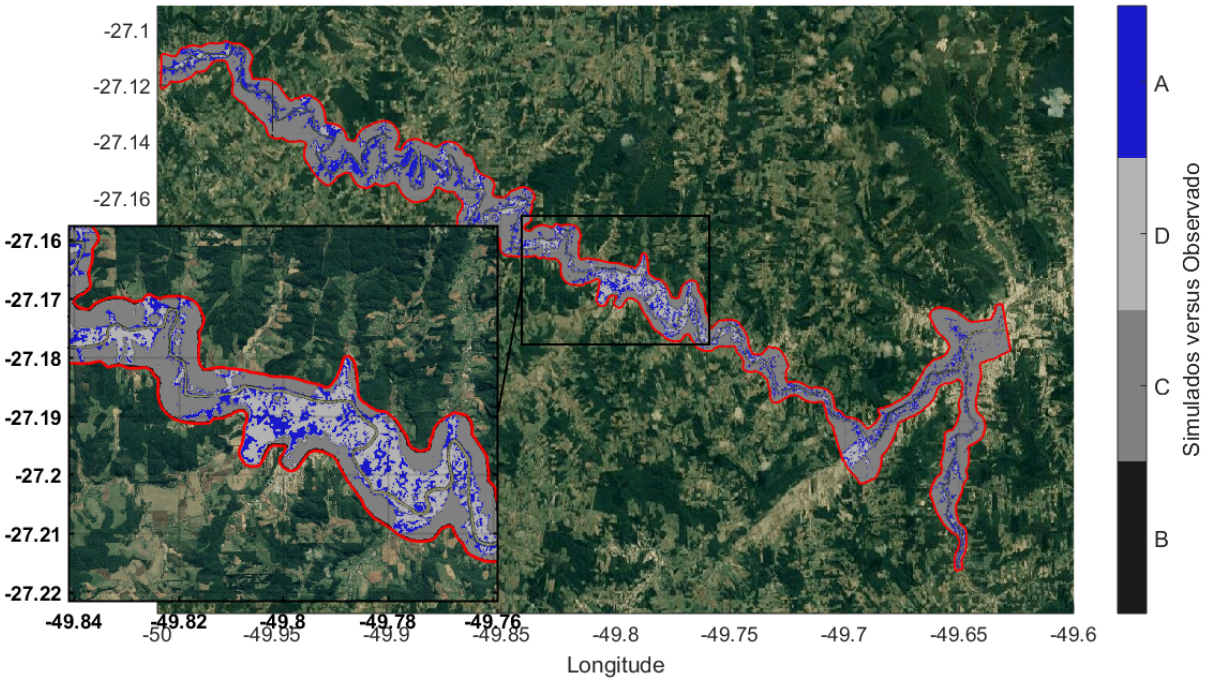


Figura 5.9 – Inundação simulada *versus* observada em 06 de junho de 2017. Legenda: A reporta as comissões. B representa omissões. C representa a área simulada e observada seca. D representa a área simulada inundada e observada inundada.

um valor negativo, uma vez que a área de superestimação foi maior que a área de acerto de inundação, a medida $F_1 = 0.40$ apresenta um resultado animador para a região. Acredita-se que com maiores esforços no pré-processamento das imagens, testando outros algoritmos para correção do ruído *speckle*, conforme apontado por Bioresita et al. (2018) ou mesmo alterando o tamanho da janela ou o número de visadas, os resultados sejam melhores.

Acrescenta-se ainda a diferença no tamanho das áreas de simulação. Na calibração, uma área reduzida foi analisada, uma vez que o polígono usado para verificação não abranfe toda a área, enquanto que na validação toda a área de interesse foi estudada, lembrando que nessa área a batimetria dos rios foi estimada, por falta de dados de solo.

Embora apresentem algumas vantagens diante das imagens óticas, as imagens SAR trazem consigo algumas incertezas que devem ser levadas em consideração na interpretação de resultados providos para delimitação de extensão de inundação. Segundo Malinowski et al. (2017) e Chung et al. (2015) os resultados não são facilmente interpretados em áreas alagadas onde não há presença de prédios ou vegetação. Os autores apontam ainda que a presença de vento ou chuva pode alterar o retroespalhamento das ondas eletromagnéticas emitidas pelo satélite, dificultando a análise dos resultados.

Levando em consideração esses empecilhos, o algoritmo *Change detection* amenizaria esses problemas dado que a imagem analisada apresenta a diferença entre a imagem original e uma imagem de referência. Portanto, com a utilização desse algoritmo, de acordo com Long et al. (2014), analisando apenas as diferenças, os resultados da identificação da inundação seriam

melhores representados.

Contudo, ao aplicar o algoritmo proposto por Long et al. (2014) há um parâmetro k que precisa ser calibrado (Eq. (4.20)). Assim como pontuado pelos autores, nessa aplicação, a calibração desse parâmetro se deu por interpretação visual. A falta de uma imagem de referência para esse parâmetro também gera incertezas nos resultados.

Di Baldassarre et al. (2009) apontaram que dadas as incertezas inerentes ao processo de delimitação de inundações por imagens SAR, a utilização de diversos algoritmos para delinear inundações de imagens SAR podem ser utilizados, e que as áreas marcadas como inundadas por cada um deles deve ser considerada como uma área de possibilidade de inundação. Assim, quanto mais algoritmos classificarem uma área como inundada, maior a probabilidade dessa área estar realmente inundada. Com isso a avaliação ou calibração dos resultados do modelo em contraste com os obtidos pelas imagens passa de uma abordagem determinística para uma probabilística. Portanto outros algoritmos, como contorno ativo (Horritt et al., 2001), limiar do histograma (Mason et al., 2012; Costi et al., 2016), ou mesmo interpretação visual (Di Baldassarre, 2012) podem ser usados para reavaliar os resultados obtidos.

Malinowski et al. (2017) ao analisar práticas de extração de áreas inundadas em escala local, aponta que embora as imagens Sentinel-1 sejam promissoras e apresentem boa resolução quando comparadas a outros SAR, elas precisam ainda ser melhores avaliadas para esse tipo de aplicação.

Os resultados encontrados e as considerações realizadas por vários autores ajudam a justificar que a obtenção de áreas de inundadas com imagens do Sentinel-1 são promissoras, mas que necessitam ser melhores estudadas e que sua aplicação, principalmente em escala local, como no estudo aqui apresentado, precisam ser estudados com maior rigor. Uma das principais limitações encontradas é a disponibildiade de dados para a calibração do algorítmo de detecção de mudanças.

Mesmo com todas as limitações apresentadas, é possível notar uma boa concordância entre os resultados do modelo e das imagens em áreas de inundação mais contíguas (Fig. 5.9). Com isso, considera-se que esforços maiores precisam ser realizados na detecção de inundações em áreas que foram estimadas em menores que 0.5 km^2.

Mesmo com essas ressalvas, nesse estudo os processos de inundação foram notavelmente bem representados de acordo com Di Baldassarre (2012); Bates et al. (2005), tanto na calibração, com ajuste de 0.80, como na validação, com ajuste de cerca de 0.40. Isso tudo levando em consideração que a área de estudo é confinada por montanhas, há a presença de diversos tipos de vegetação, áreas urbanas e áreas rurais. Resultados semelhantes foram encontrados somente para aplicações em áreas costeiras planas como em Bates et al. (2005) (F variando de 0.54 a 0.91) e em Kumbier et al. (2018) que validaram o modelo Delft-3D com imagens Sentinel-1 e obteve ajuste de 0.53.

Outros trabalhos encontrados na literatura apresentam valores parecidos com esses, no entanto, são analisadas áreas urbanas e rurais de forma separada, e com imagens comerciais de melhor resolução. (Mason et al., 2012) utilizou o TerraSAR-X, com resolução de 3 m

e encontrou ajustes variando de 0.35 a 0.75 em áreas urbanas. Horritt et al. (2007), que calibraram o modelo TELEMAC2D utilizando um SAR aerotransportado com alta resolução espacial (1.2 m) e encontraram medidas de ajuste F_1, variando de 0.63 a 0.87.

Diante disso percebe-se que os resultados aqui encontrados representam o estado da arte na modelagem de inundação e validação com imagens SAR. Além de ser uma aplicação em uma escala local e montanhosa, um ambiente que não é recorrente nesse tipo de estudo, os resultados encontrados são confiáveis e ainda apresentam potencial de melhoria. Portanto, ainda maiores avanços são esperados em trabalhos futuros.

Tudo isso foi possível devido à qualidade dos dados e metodologia utilizados. O modelo TELEMAC2D é confiável e amplamente testado, os dados das condições de contorno (vazões e níveis dos rios) foram obtidos com intervalos horários ou sub-horários. O modelo digital do terreno de alta resolução, disponível para o estado de Santa Catarina, mostrou-se uma ferramenta importante e apresentou performance notadamente superior, simulando 20% melhor as áreas inundadas.

Ademais, a validação do modelo com as imagens Sentinel-1 apresenta uma das poucas utilizações deste conjunto de dados apresentados na literatura para validação e avaliação de modelagem de inundação. E possivelmente é a primeira em escala local e confinada por vales.

5.4. Mapeamento e estudo de padrões no escoamento

Através da observação de padrões em cinco diferentes inundações acontecidas nos anos de 2011 e 2013, com áreas de inundação de cada uma delas mapeada pelo TELEMAC2D, foram feitas algumas inferências sobre padrões para os eventos, como duração de alagamento, altura da lâmina d'agua e a forma como esses padrões se repetem ou não nos diversos eventos. Além disso, foram calculados os períodos de retorno de cada uma das inundações, com isso pode-se ter um panorama do que se esperar com relação às inundações no local de estudo com diferentes magnitudes.

Portanto, nessa seção, são apresentados os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico bidimensional TELEMAC2D, o qual foi utilizado para simular a hidrodinâmica dos rios em uma parte da cidade de Rio do Sul. Assim, foram reproduzidos os eventos que aconteceram na cidade, nos anos de 2011 e 2013, mapeando as áreas de inundação nesses eventos.

Essas informações, além de proverem uma nova forma de avaliar os impactos de uma inundação, podem ser utilizadas para atender algumas das exigências do Plano Diretor do Município, tais como planejamento de uso de solo e previsão de rotas alternativas para o trânsito de veículos(Hobus, 2006). Também é previsto no artigo 496 dessa lei que a ocupação dos solos deve ser feita de forma a: "facilitar a convivência com as cheias dos rios através da expansão da cidade para regiões livres de enchentes ou pela verticalização controlada de algumas áreas já consolidadas através de limitações à ocupação nas áreas mais baixas".

Portanto, essa pode ser uma ferramenta a ser utilizada como base para o desenvolvimento dessas atividades nessa região e como auxiliar para planejamento de recursos hídricos em diver-

sas aplicações. Com essas informações, além da suscetibilidade a inundação, pode-se ter uma dimensão dos impactos causados para cada local do domínio.

5.4.1. Mapeamento das áreas de inundação no ano de 2011

Uma vez que o modelo foi calibrado, a hidrodinâmica da região foi simulada para todo o ano de 2011. Nesse ano, aconteceram 4 episódios de inundação. O primeiro evento ocorreu em 3 de julho, quando o rio atingiu a cota de 6.50 m na estação da cidade de Rio do Sul. O segundo e o terceiro eventos aconteceram no mês de agosto, quando o rio atingiu as cotas de 8.83 m e 8.76 m, respectivamente nos dias 10 e 31. Por último, a maior inundação ocorreu no dia 9 de setembro, quando foi atingida a cota de 12.96 m, que é a segunda maior cota em todo o período de registros na estação.

A Fig. 5.10 traz as vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica da cidade de Rio do Sul. Os círculos coloridos apresentam o momento da vazão máxima em cada um dos eventos estudados nesse trabalho, listados na Tab. 5.6. A vazão máxima observada em todo o período foi de 1903.5 m^3/s e a vazão máxima dada pelo modelo foi de 1902.4 m^3/s, sendo que o modelo simulou esse máximo com uma hora de antecedência. As medidas de eficência, encontram-se na Tab. 5.5.

Tabela 5.5 – Medidas de eficiência para as vazões simuladas em 2011.

RMSE	MAPE	E	r
127.3636	0.4453	0.7362	0.9281

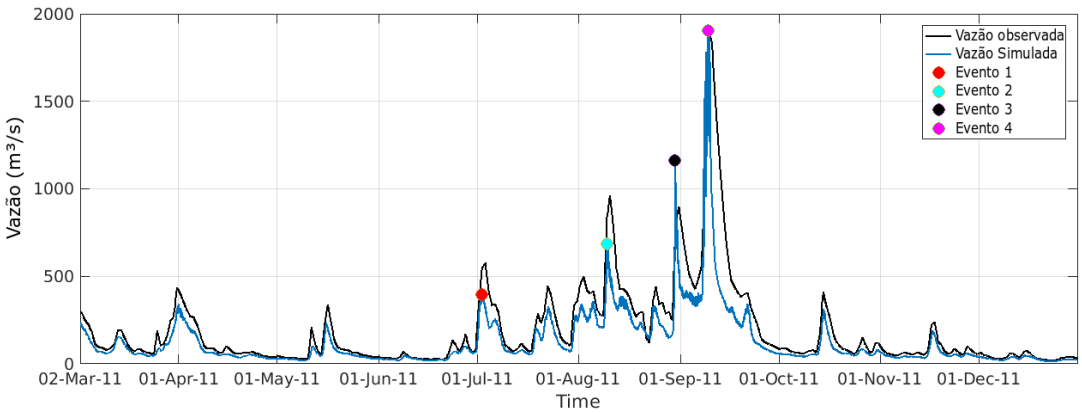
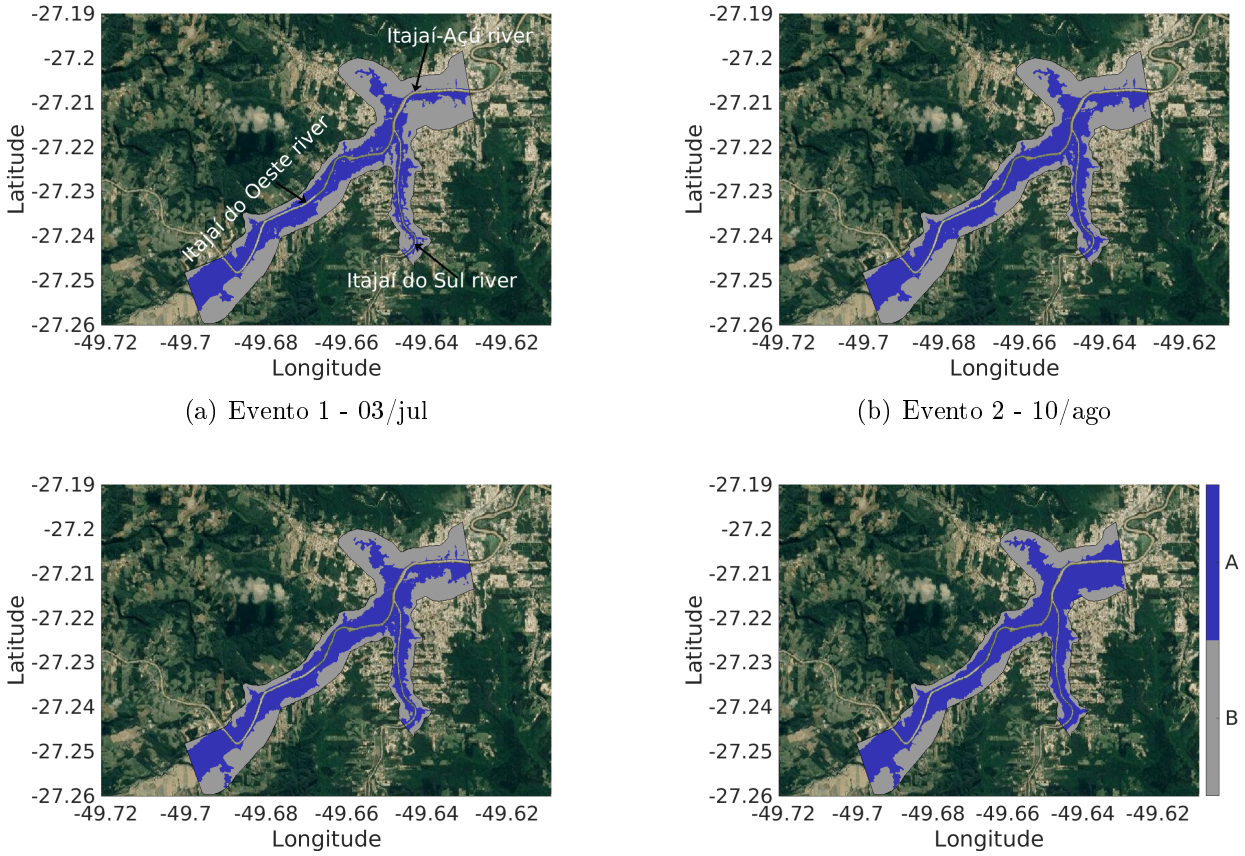


Figura 5.10 – Vazões calculadas e observadas para o ano de 2011. As marcas coloridas representam os eventos de inundação registrados, e indicam os períodos de análise.

Ao comparar esses resultados com os obtidos para o período de 2013, na calibração do modelo, percebe-se que o RMSE apresentou resultados piores, enquanto que o MAPE, mostrou-se notavelmente menor, reduzido em 49%. A eficiência de Nash e Sutcliffe (E) também mostrou melhores resultados, assim como o coeficiente r. Portanto, espera-se que as medidas de extensão de inundação sejam bem simuladas.

As áreas de inundação para cada um dos eventos, marcados na Fig. 5.10 foram demarcadas seguindo os mesmos procedimentos da seção 4.5. A Fig. 5.11 apresenta as extensões encontradas pelo modelo em cada período de pico nos quatro eventos.



(a) Evento 1 - 03/jul

(b) Evento 2 - 10/ago

(c) Evento 3 - 31/ago

(d) Evento 4 - 09/set

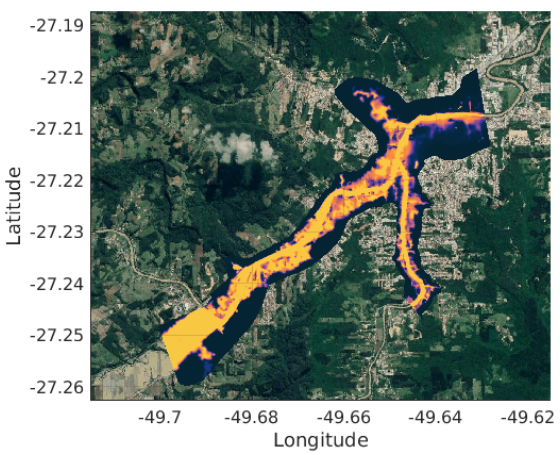
Figura 5.11 – Resultados das extensões de inundações para os eventos ocorridos no ano de 2011. Legenda: A (azul) área simulada inundada; B (cinza) área simulada seca.

Nota-se que no rio Itajaí do Oeste, a área está inundada de uma forma muito parecida em todos os eventos, independente da cota atingida. Este resultado indica propensão a inundações, mesmo quando as cotas atingidas no rio não são muito altas. Às margens dos rios Itajaí do Sul e Itajaí-Açú, as áreas apresentam tendência de crescimento à medida que as cotas são maiores.

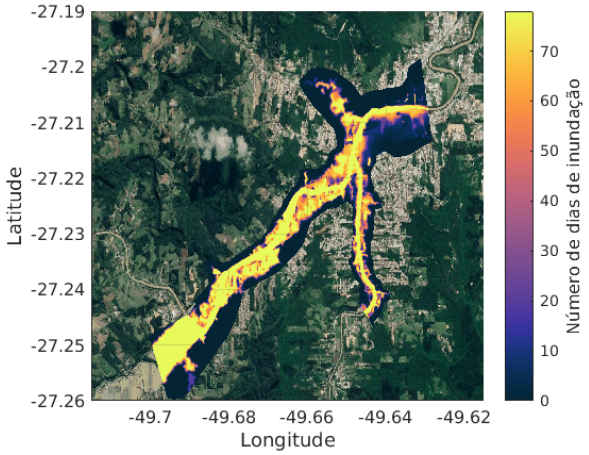
Para esses eventos, em sequência, as áreas inundadas foram de 5.16, 6.01, 6.18 e 7.42 km^2. Como esperado, as áreas encontradas para os eventos centrais foram muito próximas. Já ao comparar o primeiro e o quarto eventos, percebe-se que a área do quarto evento foi 43.8% maior que o menor evento, contudo a vazão para o último foi de 3.46 vezes o primeiro. Com isso, espera-se que mesmo ao atingir vazões maiores, as áreas de inundação aumentem numa proporção muito menor.

Duração da inundação

No ano de 2011, as inundações, (quando o rio ultrapassa a cota de 6.5 m) aconteceram de forma sequencial, com 68 dias entre os picos da primeira e da última. Assim, muitas áreas ficaram inundadas por muitos dias. A Fig. 5.12 (a) mostra o número de dias que cada área ficou alagada nesse período (03 de julho a 9 de setembro) e nos 10 dias seguintes ao pico (Fig. 5.12) (b).



(a) Número de dias para de alagamento para cada região entre os dias 03 de julho e 9 de setembro de 2011



(b) Número de dias para de alagamento para cada região entre os dias 03 de julho e 19 de setembro de 2011, 10 dias após o pico da cheia.

Figura 5.12 – Dias de alagamento por região no período de inundações em 2011.

As áreas amarelas da figura Fig. 5.12 (b) mostram que, depois do pico da última inundação, muitas áreas permaneceram os 10 dias alagadas. Essas áreas assemelham-se com aquelas encontradas para a extensão de alagamento encontrada para o primeiro evento em 2011 (Fig. 5.11). Ao analisar as vazões do período (Fig. 5.10), nota-se esse decrescimento gradual, indicando que tais resultados concordam com padrões reais.

Profundidade máxima

A última informação analisada mostra a profundidade máxima encontrada para cada elemento da malha levando em consideração todo o período de 2011 (Fig. 5.13).

Nos canais, é percebida uma profundidade maior que 12 metros em toda a extensão do domínio. Já as planícies de inundação com maiores profundidades são encontradas nos rios Itajaí do Oeste, principalmente na região mais a sudeste, com profundidades maiores que 8 metros, onde as planícies apresentam pouca elevação em relação às margens do rio.

5.4.2. Mapeamento das áreas de inundação no ano de 2013

Posteriormente à análise dos eventos ocorridos no ano de 2011, a inundação ocorrida em setembro de 2013 foi mapeada. A Fig. 5.14 mostra a área de inundação simulada em contraste

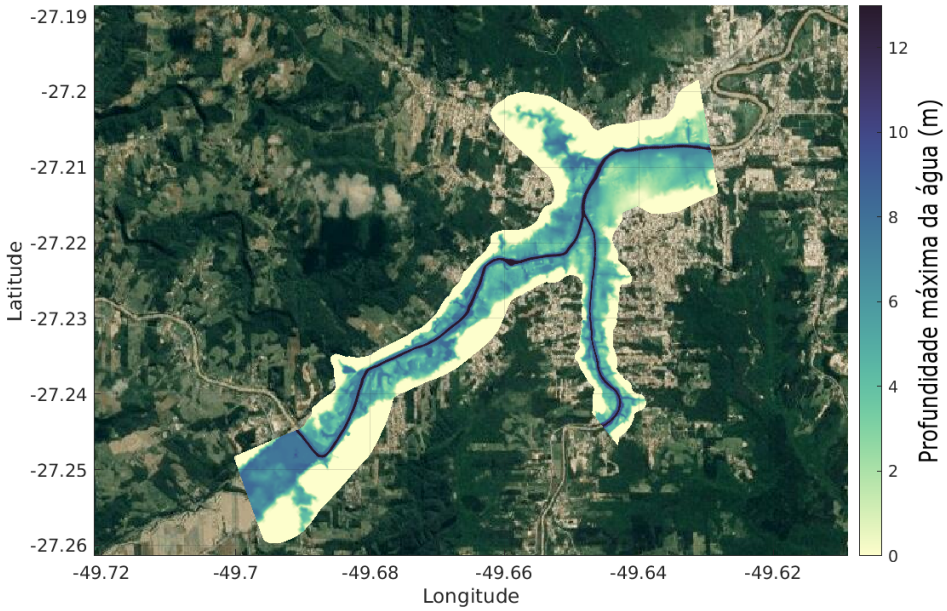


Figura 5.13 – Profundidade máxima da água para o evento de 2011.

com o mapa criado pela defesa civil. Essa inundação teve cota máxima de 10.39 m, relativo a uma vazão de 1364 m^3/s, no momento de pico, observado na estação da cidade de Rio do Sul. Porém, o modelo simulou como vazão máxima, no momento de pico, o valor de 1068.5 m^3/s. As vazões calculadas e observadas são apresentadas na Fig. 5.15.

Na Fig. 5.14 nota-se que na maior parte da extensão da área, a inundação foi muito bem simulada. Os piores resultados encontram-se na área de superestimação próxima ao encontro dos rios (ver detalhe Fig. 5.14). Essa é uma área completamente urbanizada, portanto os sistemas de escoamento artificial, que não foram considerados no modelo, podem ter auxiliado no escoamento. Já as maiores subestimações aconteceram nas regiões a nordeste e sudoeste, que são regiões próximas aos locais de imposição de condições de contorno do modelo.

As superestimações podem também ser devidas às simplificações consideradas pelo modelo, que não leva em conta importantes componentes do ciclo hidrológico como infiltração e evaporação.

Duração dos alagamentos em 2013

De acordo com as informações expressas no site da defesa civil, as inundações registradas são aquelas que têm cotas maiores do que 6 m. Com essa informação, foram selecionados no período anterior e posterior ao pico de inundação, os dias em que as cotas permaneceram maiores do que esse limiar. Com isso, foi encontrada uma duração do alagamento pontualmente. No evento de setembro de 2013, a primeira cota de 6 m foi atingida no dia 20, e o rio voltou ao nível menor que esse limiar no dia 29. Com base nessa informação, são apresentadas as figuras Fig. 5.16 (a), que apresenta o número de dias de alagamento por região nesse período de tempo, e a Fig. 5.16 (b), que apresenta o número de dias que cada região ficou alagada, por até 10 dias

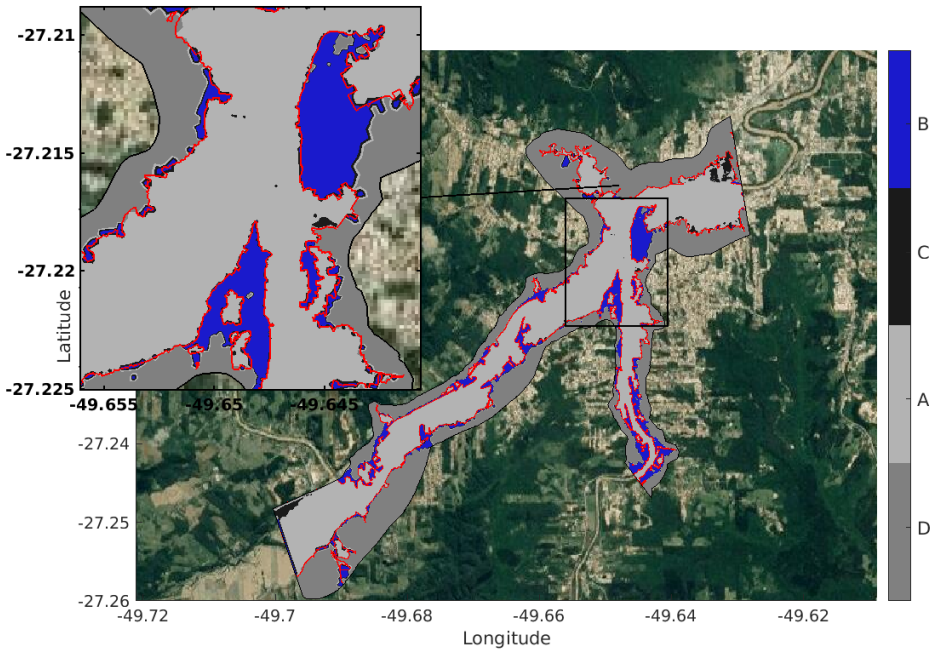


Figura 5.14 – Resultados da simulação versus polígono de verificação. O polígono com contorno preto delimita a área de simulação. Os polígonos vermelhos representam a extensão da inundação real, com dados recolhidos em solo. Legenda: *A* representa a área simulada inundada e observada inundada. *B* representa omissões. *C* reporta as comissões. *D* representa a área simulada e observada seca. Detalhe das áreas com maiores comissões.

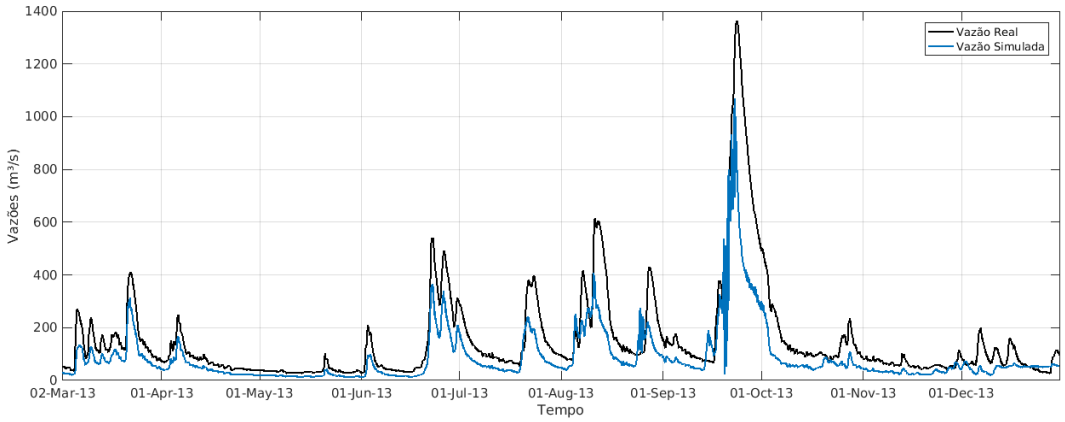
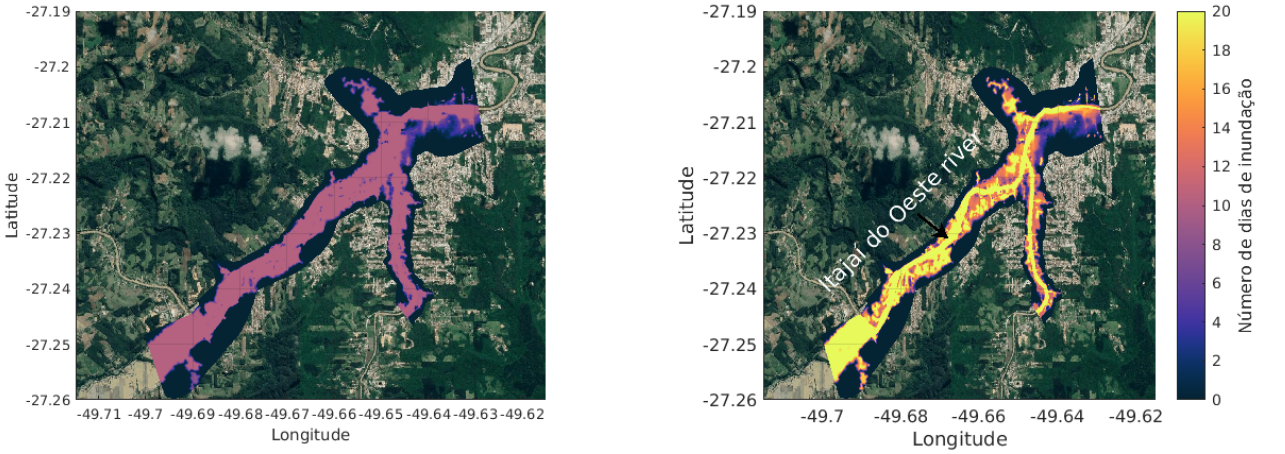


Figura 5.15 – Vazões observadas *versus* vazões calculadas.

após a inundação (até o dia 9 de outubro).

Ao analisar essas figuras, como esperado, as áreas adjacentes ao rio apresentam o maior número de dias de alagamento. Contudo o alagamento persiste em outras áreas, principalmente em torno do rio Itajaí do Oeste, com a maior parte das adajacências permanecendo alagadas em todos os 20 dias analisados. Nos trechos que margeiam o Itajaí do Sul e Itajaí-Açú, os alagamentos após a cota baixar dos 6 m são menores e duram de 4 a 6 dias depois desse limiar ser atingido. Esses trechos com menor número de dias de inundação podem ser relacionados ao melhor escoamento da água por estruturas artificias ou mesmo pelo relevo, e indicam que



(a) Número de dias para de alagamento para cada região entre os dias 20 e 29 de setembro

(b) Número de dias para de alagamento para cada região entre os dias 20 de setembro e 9 de outubro

Figura 5.16 – Dias de alagamento por região em no período de inundação em 2013. O polígono vermelho delimita a área de inundação.

nessas regiões os impactos podem ser menores.

Profundidade máxima

A profundidade máxima, considerando qualquer momento do tempo de simulação é apresentado na Fig. 5.17. Nessa figura também é apresentado o polígono de inundação (em vermelho), e pode ser verificado, na região do detalhe, que a área de superestimação apontada na Fig. 5.15 apresenta profundidades baixas, mostrando que o modelo embora simule em excesso, apresenta cotas baixas, e portanto, tem bom desempenho com relação a este aspecto.

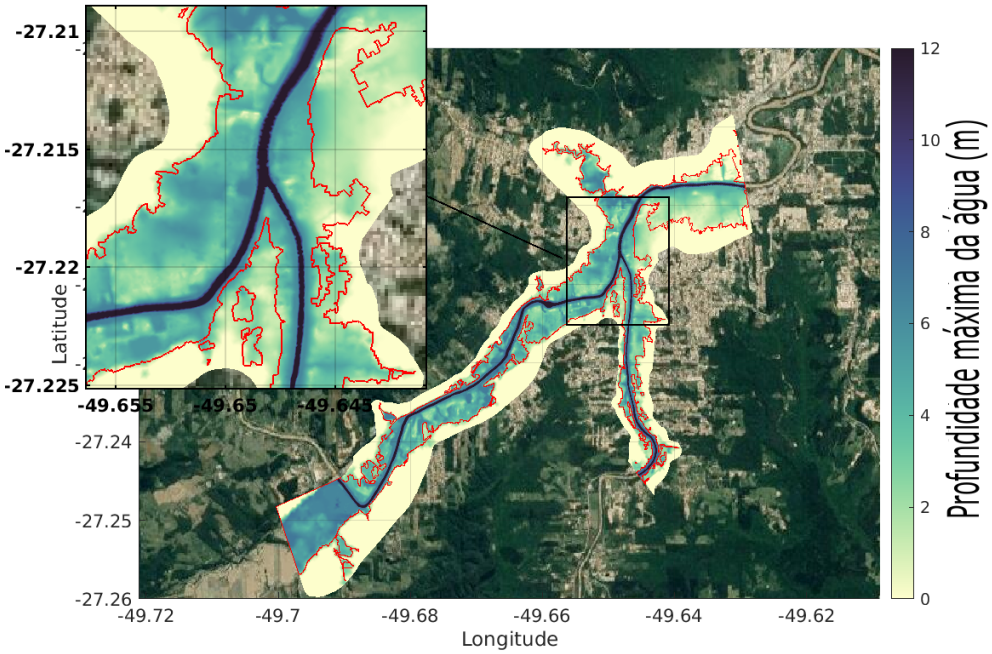


Figura 5.17 – Profundidade máxima atingida em cada região do domínio.

Pode-se ainda considerar equívocos na construção do mapa de extensão da inundação. Uma vez que a profundidade da água não atingiu grandes valores, pode ser que algumas regiões não tenham sido consideradas inundadas nas medições de solo.

Assim como no ano de 2011, nesse evento, são observadas profundidades máximas em torno de 12 m nos rios, e as maiores profundidades nas planícies são observadas nas porções ao redor do Itajaí do Oeste, com profundidades ao redor dos 6 m. Nas adjacências dos rios Itajaí do Sul e Itajaí-Açú essas alturas estão por volta dos 4 m, no máximo.

5.4.3. Contraste entre os eventos de 2011 e 2013 e análise padrões observados

Ao comparar a área total de inundação calculada pelo modelo no quarto evento de 2011 (7.42 km^2) e no desastre de 2013 (6.66 km^2), pode-se ter a impressão de que essas não diferem muito (0.76 km^2) e, portanto, podem ter impactos parecidos. Contudo, as vazões máximas encontradas nos dois diferem em 539.5 m^3/s, ou seja, as vazões do evento de 2011 apresentam velocidade consideravelmente maiores, e que podem causar mais danos. Também os outros padrões mostraram, em ambos os eventos, que as áreas próximas ao Itajaí do Oeste são mais afetadas.

Levando ainda em consideração que as áreas de inundação não diferiram muito, foi investigada a diferença entre as profundidades máximas encontradas nos dois eventos. A Fig. 5.18 traz estes resultados e com isso pode-se perceber que a área mais a nordeste, no rio Itajaí-Açú, apresenta as maiores diferenças, em torno de 3 m. A área mais a sudeste, no rio Itajaí do Sul apresenta variações em torno de 2 m, enquanto que no restante da região de estudo as diferenças ficam em torno de 1 m. Portanto, espera-se que a medida que as cotas aumentem, as regiões ao redor do Itajaí do Sul e Itajaí-Açú tenham profundidades com aumentos mais acentuados.

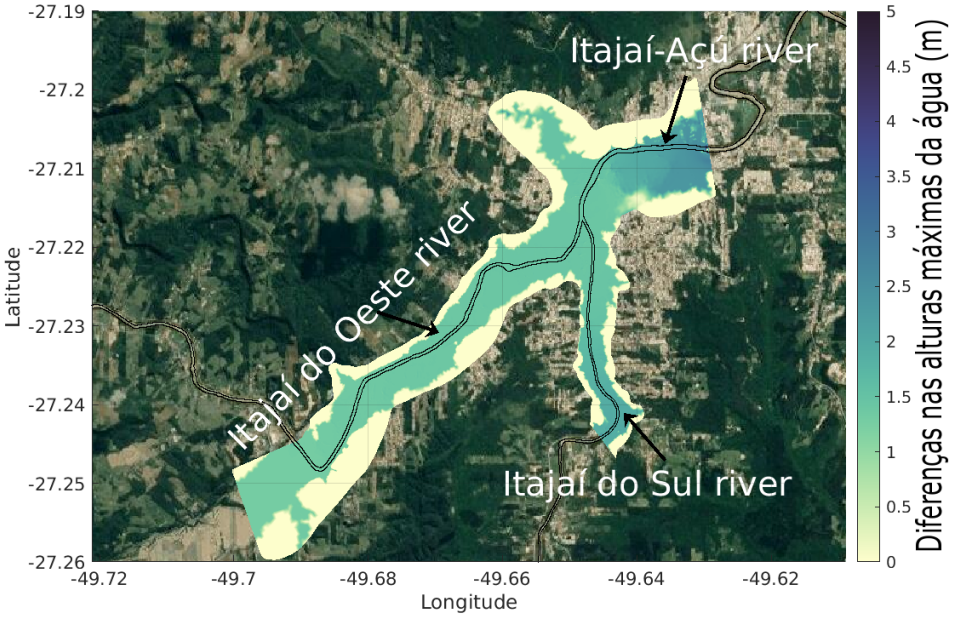


Figura 5.18 – Diferença entre as profundidades máximas atingidas no ano 2011 e 2013.

Os padrões de dias de alagamento encontrados no ano de 2013 (Fig. 5.16), foram similares às durações de inundação encontradas para os eventos de 2011. As áreas da região mais a nordeste (Rio Itajaí-Açú) apresentam durações menores de inundação após o pico de vazão, variando de 4 a 6 dias, mesmo que no evento de 2011 essa região tenha apresentado uma larga extensão de alagamento Fig. 5.11 (d).

Já as áreas a sudeste, em torno do rio Itajaí do Sul, apresentam em todos os eventos apenas alguns locais com áreas de alagamento duradouro. Entretanto, essas áreas são menores e menos persistentes, e visualmente estão relacionadas a pequenos córregos, que devido a alta resolução do DEM são bem representados.

Já as nas áreas a sudoeste, no rio Itajaí do Oeste, grandes regiões permaneceram alagadas durante todo o período em que o rio atingiu a cota de 6 m. Mesmo com o passar dos 10 dias do pico de inundação, muitas áreas permaneceram alagadas (Fig. 5.12) (b) e indicam que maior vulnerabilidade da região quando é considerada a extensão (em todos os eventos essa região foi inundada) e maiores impactos considerando a profundidade dos algamentos e duração (em todos os eventos foram observadas grandes profundidades e alagamentos duradouros mesmo após as cotas voltarem ao nível normal).

Portanto, pela análise dos padrões encontrados, as seguintes considerações puderam ser feitas no caso de estudo apresentado.

- A porção da área de estudo que margeia o rio Itajaí do Oeste apresenta grandes áreas de inundações, mesmo com baixas cotas observadas na estação fluviométrica;
- Grandes aumentos nessas cotas (de 6 m para 12 m) não geram aumentos expressivos nas áreas de inundação, em torno desse rio (os aumentos observados estiveram em torno de 2 m) (Fig. 5.18);
- A porção que margeia o rio Itajaí do Oeste apresenta persistência do alagamento mesmo 10 dias após o pico de inundação;
- As áreas adjacentes aos rios Itajaí do Sul e Itajaí Açú apresentam maior variabilidade nas diferença das alturas máximas de lâmina d'água, por volta de 4 m, quando as cotas variam de 10.39 m para 12.96 m. Apresentam também áreas de inundação com crescimento expressivo, à medida que as cotas se apresentam maiores. Portanto espera-se que ao passo que as cotas aumentem essas áreas apresentem maior crescimento em extensão do que as áreas adjacentes ao rio Itajaí do Oeste.
- Em todos os três padrões observados as áreas ao redor do Itajaí do Oeste apresenta maior suscetibilidade e vulnerabilidade.

A utilização desses parâmetros pode apresentar uma nova alternativa para a avaliação dos impactos e riscos de inundação, que geralmente são mensurados apenas pelas velocidades do escoamento, como em Monteiro et al. (2015).

5.4.4. Períodos de retorno

Os períodos de retorno calculados nesse trabalho levaram em consideração os eventos que estão registrados na página da defesa civil do município de Rio do Sul[1]. Uma vez que a construção das barragens nos canais pode afetar o escoamento e a frequência de ocorrência de inundações, apenas os eventos pós operacionalização da barragem foram considerados nesses cálculos, ou seja, a partir do ano de 1975 até 2017. Esses TR são utilizados como uma forma auxiliar para identificar as áreas mais propensas a inundação, aliando-os aos padrões encontrados anteriormente.

Nesse período de 42 anos, aconteceram 34 inundações. As inundações aqui estudadas, estão indicadas na Tab. 5.6, mostrando a data da ocorrência do pico da cheia, a cota atingida e o período de retorno calculado pela Eq. (4.15)

Tabela 5.6 – Período de retorno para cada evento estudado.

	Cota (m)	F_n	**TR (anos)**
20/11/2013	10.39	6	7
03/07/2011	6.5	34	1.24
10/08/2011	8.83	10	4.2
31/08/2011	8.76	11	3.82
09/09/2011	12.96	2	21

Pela interpretação desses períodos de retorno, aliados às informações dadas a respeito das inundações estudadas, obtém-se um amplo panorama do que esperar das inundações. Uma inundação de cota de pelo menos 6.5 m é provável de acontecer a cada 1 ano e 3 meses, aproximadamente. Com isso, é perceptível que as áreas adjacentes ao rio Itajaí do Oeste sejam atingidas com frequência, portanto deveria ser fortemente desencorajada a ocupação dessas áreas para construção civil, por exemplo.

A inundações com períodos de retorno de 3.82, 4.2, 7 e 21 anos, tiveram extensões parecidas no rio Itajaí do Sul, com crescimento leve a medida que as vazões se encontram maiores. Já nas margens do Rio Itajaí-Açú e Itajaí do Sul grandes extensões são esperadas apenas para períodos de retorno iguais ou maiores que 7 anos, mostrando-se portanto menos suscetíveis.

[1]Informação disponível em: `https://defesacivil.riodosul.sc.gov.br` Acesso em 29 de junho de 2018.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem de numérica é uma alternativa de baixo custo e eficiente para o estudo de diversos fenômenos, dentre eles, as inundações. Nesse trabalho, a hidrodinâmica da região do Alto Vale do Itajaí, em Santa Catarina, foi simulada visando o estudo de eventos que lá aconteceram, com o objetivo de tornar o TELEMAC2D uma ferramenta auxiliar no gerenciamento dos eventos e mesmo no gerenciamento dos recursos hídricos, do uso e ocupação do solo.

Com a utilização de um modelo de código aberto, consagrado na literatura, aliado a uma vasta quantidade de dados de vazões e níveis de rio, utilizados nas condições de contorno, qualidade do modelo digital de terreno, utilização de imagens SAR aplicadas conjuntamente com metodologias amplamente aceitas, foi possível obter resultados relevantes no estudo de caso realizado.

Com os primeiros resultados apresentados foi possível observar que o DEM com alta resolução espacial utilizado na área de estudo foi um fator determinante para a acurácia das simulações, quando comparado com o DEM SRTM, demonstrou acurácia 20% superior nas áreas de concordância entre inundação modelada e observada. Resultados mais expressivos foram encontrados em áreas com erros de omissão, onde a utilização do SCDEM apresentou resultados 8.46 vezes melhores. Embora o DEM SRTM seja amplamente utilizado na literatura de referência, o mesmo demonstrou limitações importantes em toda a extensão da área de estudo, tanto em áreas urbanas como não urbanizadas.

A utilização do DEM de alta resolução mostrou ainda que sua utilização supera os resultados apresentados pelo SRTM com qualquer coeficente de fricção. Com isso, conclui-se que o DEM de alta resolução é um fator mais relevante do que a calibração dos coeficentes de *Manning*.

Pela calibração do modelo hidrodinâmico TELEMAC-2D foi possível reproduzir com acurácia a extensão de inundação, quando comparada a medições de solo, com medidas de ajuste $F_1 = 0.80$, $F_2 = 0.63$ e concordância nos acertos de 94.65%. As vazões observadas na região de estudo, no ano de 2013, foram subestimadas devido à falta de dados fluviométricos, contudo a correlação de Pearson foi de 0.93 e o coeficiente de Nash e Sutcliffe apresentou valor igual 0.63, indicando alta correlação entre os resultados. As medidas RMSE e MAPE, apresentaram valores altos, devido a falta de dados e foram iguais respectivamente a 111 m^3/s e 0.87.

Na validação dos resultados, foi realizada uma simulação com 3 anos de duração e as estatísticas encontradas para as vazões estiveram de acordo com as previamente analisadas no processo de calibração, sendo, com isso, consideradas adequadas ao estudo. A correlação de Pearson e o coeficente E apresentaram valores iguais a 0.83 e 0.63, e as medidas RMSE e MAPE apresentaram desempenho melhorado, com valores de 97.55 m^3/s e 0.49, respectivamente.

Na validação da extensão, imagens SAR do Sentinel-1 foram utilizadas e foi possível avaliar a acurácia do modelo em todo o domínio de interesse. A medida F_1 foi de 0.40 e a porcentagem de acerto foi de 82.55%. Mesmo com algumas limitações referentes à identificação das áreas

de inundação por essas imagens, houve notável concordância dos resultados do modelo com os da imagem em todas as áreas maiores que 0.5 km^2. Em algumas regiões, resultados excelentes foram encontrados. Mesmo pequenos detalhes da inundação foram capturados pelo modelo e pela imagens.

A validação da modelagem com imagens Sentinel-1 apresenta uma das primeiras aplicações desse conjunto de dados na avaliação de modelagem hidrodinâmica. Se forem analisadas as características do terreno, esse é possivelmente um trabalho pioneiro na utilização desse material em um ambiente com tantas adversidades.

Todos esses avanços foram possíveis devido à qualidade dos dados das condições iniciais e de contorno. Vazões e níveis dos rios foram coletados com intervalos horários. O modelo digital de terreno apresenta resolução de 1 m. Além disso, o modelo TELEMAC2D, com vasta utilização em estudos de modelagem hidrodinâmica, apresentou resultados consistentes.

Aliado a isso, a utilização de imagens de acesso livre, disponíveis após 2015, do Sentinel-1, com resolução de 10 m, mais grosseira que a utilizada na maior parte da literatura de referência, mostrou-se eficaz na identificação da extensão das áreas inundadas, quando aliado aos recentes progressos no processamento das imagens com metodologias amplamente aceitas na comunidade científica.

Depois da calibração do modelo, com parâmetros ótimos de fricção definidos, os mesmos procedimentos foram utilizados para simular a hidrodinâmica da região no ano de 2011 e 2013, períodos em que aconteceram 5 inundações. Com essa metodologia, os eventos com diferentes magnitudes e períodos de retorno variando de 1 ano e 3 meses a 21 anos, puderam ser estudados, mostrando uma nova e possível abordagem a ser aplicada no gerenciamento de recursos hídricos. Foram encontradas informações de duração das inundações, profundidades e extensão, que podem ser utilizadas pelos sistemas de monitoramento e alerta, e pelas autoridades no planejamento de uso e ocupação do solo.

Pela observação dos padrões de extensão e duração foi possível identificar que áreas nas adjacências do rio Itajaí do Oeste são, em todos os casos mais atingidos, com inundações duradouras, permanecendo alagamentos até 10 dias após os picos de vazão observados.

De uma maneira geral, pelos resultados apresentados, na porção do rio Itajaí do Oeste, inundações com diferentes períodos de retorno geram extensões de inundação parecidas, com profundidades por volta de 12 m nos rios, e por volta de 6 m em algumas áreas da planície de inundação. Somado a isso, a maior parte dos alagamentos ainda é observada 10 dias após os picos de inundação, sendo portanto a região mais suscetível e atingida dentre as analisadas.

As planícies que margeiam os rios Itajaí do Sul e Itajaí-Açú apresentam áreas de alagamento com tendência de crescimento mais acentuado à medida que as cotas são observadas maiores que 10 m. Nas inundações com período de retorno menor que 3 anos é percebido um crescimento discreto das áreas de inundação, enquanto que para os TR maiores do que 4 anos as áreas crescem consideravelmente assim como se observou nas profundidades máximas, que apresentaram diferenças de até 4 m entre os eventos de TR de 7 e 21 anos. Contudo, nessas regiões, a análise da duração dos alagamentos mostrou que a quantidade de dias de inundação

em que o alagamento permanece após o pico de vazão é de, no máximo, 6 dias, indicando um escoamento mais rápido do que na porção que margeia o Itajaí do Oeste.

Os resultados apresentados apresentaram-se adequados ao serem comparados a outros estudos. O modelo e metodologia apresentados podem ser ferramentas utilizadas para o gerenciamento das inundações, na previsão em tempo real de eventos, uma vez que as vazões são bem simuladas, e ainda podem ser empregados como um apontador para para planejamento de uso ou ocupação do solo ou auxiliar no planejamento de obras hidráulicas.

Diante do exposto, considera-se que este trabalho se enquadra no estado da arte na modelagem hidrodinâmica aplicada a inundações. Apresenta novas contribuições para a utilização das imagens do Sentinel-1, principalmente por se tratar de escala local e de uma região montanhosa. Além disso, é apresentada uma nova e eficiente alternativa para o gerenciamento de recursos hídricos, planejamento de uso e ocupação do solo na região dado que o modelo simula satisfatoriamente as extensões de inundação e vazões.

7. REFERÊNCIAS

ADAMS, T. E. E PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. Academic Press, 2016.

ADDAE, R. A. Satellite-based flood mapping for hydrodynamic flood model assessment: Accra, ghana, 2018.

ALCRUDO, F. A state of the art review on mathematical modelling of flood propagation. In **First IMPACT project Workshop, Wallingford, UK, available at: http://www. impact-project. net/cd/papers/print/008_pr_02-05-16_IMPACT_Alcrudo. pdf (last access: December 2013)**, 2002.

ALFIERI, L., BUREK, P., DUTRA, E., KRZEMINSKI, B., MURARO, D., THIELEN, J., E PAPPENBERGER, F. Glofas-global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 3, p. 1161, 2013.

ALFIERI, L., SALAMON, P., PAPPENBERGER, F., WETTERHALL, F., E THIELEN, J. Operational early warning systems for water-related hazards in europe. **Environmental Science & Policy**, v. 21, p. 35–49, 2012.

ALVES, M. Análise comparativa dos fatores ambientais nos eventos de inundações na bacia hidrográfica do vale do itajaí: Novembro de 2008 e setembro de 2011. **REVISTA DISCENTE EXPRESSÕES GEOGRÁFICAS**, v. 09, p. 173, 2014.

AMBIENTAL, C. A. RelatÓrio tÉcnico municípios de rio do sul / sc e lontras / sc, 2015.

ARCEMENT, G. J. E SCHNEIDER, V. R. Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains, 1989.

ASSELMAN, N., BATES, P., WOODHEAD, S., FEWTRELL, T., SOARES-FRAZÃO, S., ZECH, Y., VELICKOVIC, M., DE WIT, A., TER MAAT, J., VERHOEVEN, G., ET AL. Flood inundation modelling—model choice and proper application. **Deltares.[Online]**, 2009.

ATLAS, D. S. C. Gabinete do planejamento e coordenação geral-gaplan. **Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro**, pp. 173, 1986.

AUMOND, J. J., SEVEGNANI, L., TACHINI, M., E BACCA, L. E. Condições naturais que tornam o vale do itajaí sujeito aos desastres. **Desastre de**, pp. 22–37, 2008.

BATES, P. D., DAWSON, R. J., HALL, J. W., HORRITT, M. S., NICHOLLS, R. J., WICKS, J., E HASSAN, M. A. A. M. Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. **Coastal Engineering**, v. 52, n. 9, p. 793–810, 2005.

BELLADONA, R., VARGAS, T. D., E REIS, L. C. T. D. Metodologia para validação do mde srtm para a sua utilização em projetos em recursos hídricos. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico].[Porto Alegre: ABRH, 2017]**, 2017.

BIORESITA, F., PUISSANT, A., STUMPF, A., E MALET, J.-P. A method for automatic and rapid mapping of water surfaces from sentinel-1 imagery. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 217, 2018.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS River Analysis System - User's Manual Version 5.0**. US Army Corps of Engineers. Institute forWater Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016.

BUREK, P., RADEMACHER, S., E WILKE, K. The operational flood forecasting system wavos for the rivers rhine, elbe and odra. **Floods, from defence to management: Proceedings of the third international symposium on flood defence**, 2005.

BUTTNER, O. The influence of topographic and mesh resolution in 2d hydrodynamic modelling for floodplains and urban areas. In **Geophys. Res. Abstr**, volume 9, pp. 08232, 2007.

CARVALHO, C. S., MACEDO, E. D., E OGURA, A. T. Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios. **Brasília: Ministério das Cidades**, 2007.

CASAGRANDE, L., TOMASELLA, J., DOS SANTOS ALVALÁ, R. C., BOTTINO, M. J., E DE OLIVEIRA CARAM, R. Early flood warning in the itajaí-açu river basin using numerical weather forecasting and hydrological modeling. **Natural Hazards**, v. 88, n. 2, p. 741–757, 2017.

CHUNG, H.-W., LIU, C.-C., CHENG, I.-F., LEE, Y.-R., E SHIEH, M.-C. Rapid response to a typhoon-induced flood with an sar-derived map of inundated areas: Case study and validation. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 11954–11973, 2015.

COLE, S., MOORE, R., ROBSON, A., MATTINGLEY, P., BLACK, K., E KAY, A. Evaluating g2g for use in rapid response catchments: Final report. **R&D Project Report SC110003**, v. 1, 2014.

CORDERO, A., MOMO, M. R., E SEVERO, D. L. Previsão de cheia em tempo atual com um modelo armax, para a cidade de rio do sul-sc, 2003.

COSTI, J., OLEINIK, P. H., MONTEIRO, C. B., MARQUES, W. C., E ARIGONY-NETO, J. An automated structure for acquiring and processing sentinel-1 data and its applicability for coastal studies. In **Defect and Diffusion Forum**, volume 372, pp. 122–131. Trans Tech Publ, 2016.

DA SILVA, P. R. E DE SOUZA, F. Inundações no município de rio do sul: uma análise dos eventos de 2011 e 2013 à luz da gestão de risco de desastres. **Revista Ordem Pública**, v. 9, n. 1, p. 163–179, 2016.

DE ANDRADE, A. R., BALDO, M. C., E NERY, J. T. Variabilidade sazonal da precipitação pluviométrica de santa catarina. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 21, p. 923–928, 1999.

DE ZAN, F. E GUARNIERI, A. M. Topsar: Terrain observation by progressive scans. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 9, p. 2352–2360, 2006.

DEMERITT, D., CLOKE, H., PAPPENBERGER, F., THIELEN, J., BARTHOLMES, J., E RAMOS, M.-H. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. **Environmental Hazards**, v. 7, n. 2, p. 115–127, 2007.

DEMUTH, N. E RADEMACHER, S. **Flood forecasting in germany—challenges of a federal structure and transboundary cooperation**. In **Flood Forecasting**, pp. 125–151. Elsevier, 2016.

DEVIA, G. K., GANASRI, B., E DWARAKISH, G. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001–1007, 2015.

DI BALDASSARRE, G. **Floods in a changing climate: inundation modelling**, volume 3. Cambridge University Press, 2012.

DI BALDASSARRE, G., SCHUMANN, G., E BATES, P. D. A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. **Journal of Hydrology**, v. 367, n. 3-4, p. 276–282, 2009.

DIVISION, S. D. P. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. United Nations Publications, 2018.

DOS SANTOS, L. E ARUTO, P. C. Panorama do mercado formal de trabalho em santa catarina no ano de 2011. **Revista NECAT-Revista do Núcleo de Estudos de Economia Catarinense**, v. 1, n. 1, p. 37–43, 2012.

EM-DAT. Ofda/cred international disaster database, 2010.

FAN, F., PAIVA, R., E COLLISCHONN, W. **Hydrological forecasting practices in brazil**. In **Flood Forecasting**, pp. 41–66. Elsevier, 2016.

FARINA, G., ALVISI, S., FRANCHINI, M., CORATO, G., E MORAMARCO, T. Estimation of bathymetry (and discharge) in natural river cross-sections by using an entropy approach. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 20–29, 2015.

FORSTER, A., JULINA, MARQUES, W. M., BENDÔ, A. R. R., E WORMSBECHER, A. G. Application of the telemac-2d model in the fluvial hydrodynamic simulation and reproduction of flood patterns. **Anais do 8º MCSUL-SEMENGO**, pp. 1567 1579, 2018.

FORSTER, A., MATTOS, V. D. L. D., COSTI, J., E BENDÔ, A. R. R. Análise da variação temporal das precipitações do alto vale do itajaí - sc. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 4, n. 2, p. 138–1 138–12, 2019.

FRAGA, N. C. Clima, gestão do território e enchentes no vale do itajaí-sc. **Terra Livre**, v. I, n. 20, p. 159–170, 2003.

FREDJ, E., SILVER, M., E GIVATI, A. An integrated simulation and distribution system for early flood warning. **Water Resources Management**, 2015.

GASSMAN, P. W., REYES, M. R., GREEN, C. H., E ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GEOAMBIENTE, S. R. L. Projeto de proteÇÃo da mata atlÂntica em santa catarina (ppma / sc). relatório técnico do mapeamento temático geral do estado de sc. **Relatório Técnico do Mapeamento Temático Geral do Estado de SC.**, pp. 90, 2008.

GIVATI, A., FREDJ, E., E SILVER, M. **Operational flood forecasting in israel**. In **Flood Forecasting**, pp. 153–167. Elsevier, 2016.

GIVATI, A., LYNN, B., LIU, Y., E RIMMER, A. Using the wrf model in an operational streamflow forecast system for the jordan river. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 51, n. 2, p. 285–299, 2011.

GOMES, L. F. C., MONTENEGRO, S., E VALENÇA, M. Modelo baseado na técnica de redes neurais para previsão de vazões na bacia do rio são francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 1, p. 05–15, 2010.

GOTADO, R., PIAZZA, G. A., TORRES, E., SEVERO, D. L., E KAUFMAN, V. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de santa catarina. **Geosul**, v. 33, n. 67, p. 253–276, 2018.

GRAHAM, D. N. E BUTTS, M. B. Flexible, integrated watershed modelling with mike she. **Watershed models**, v. 849336090, p. 245–272, 2005.

GUILHON, L. G. F., ROCHA, V. F., E MOREIRA, J. C. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13–20, 2007.

HESS, L. L., MELACK, J. M., E SIMONETT, D. S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 1313–1325, 1990.

HOBUS, M. Lei complementar nº 163, de 12 de dezembro de 2006. , n. 163, p. 2005, 2006.

HORRITT, M. E BATES, P. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. **Hydrological processes**, v. 15, n. 5, p. 825–842, 2001.

HORRITT, M. E BATES, P. Evaluation of 1d and 2d numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of hydrology**, v. 268, n. 1-4, p. 87–99, 2002.

HORRITT, M., DI BALDASSARRE, G., BATES, P., E BRATH, A. Comparing the performance of a 2-d finite element and a 2-d finite volume model of floodplain inundation using airborne sar imagery. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 20, p. 2745–2759, 2007.

HORRITT, M., MASON, D., E LUCKMAN, A. Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 13, p. 2489–2507, 2001.

HOSTACHE, R., MATGEN, P., E WAGNER, W. Change detection approaches for flood extent mapping: How to select the most adequate reference image from online archives? **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 19, p. 205–213, 2012.

HUGHES, D. A., ANDERSSON, L., WILK, J., E SAVENIJE, H. H. Regional calibration of the pitman model for the okavango river. **Journal of Hydrology**, v. 331, n. 1-2, p. 30–42, 2006a.

HUGHES, D. A., ANDERSSON, L., WILK, J., E SAVENIJE, H. H. Regional calibration of the pitman model for the okavango river. **Journal of Hydrology**, v. 331, n. 1-2, p. 30–42, 2006b.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]**. IPCC, 2014.

KUMBIER, K., CABRAL CARVALHO, R., VAFEIDIS, A. T., E WOODROFFE, C. D. Investigating compound flooding in an estuary using hydrodynamic modelling: a case study from the shoalhaven river, australia. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, , n. 8, p. 463–477, 2018.

LIU, Q., QIN, Y., ZHANG, Y., E LI, Z. A coupled 1d–2d hydrodynamic model for flood simulation in flood detention basin. **Natural hazards**, v. 75, n. 2, p. 1303–1325, 2015.

LIU, Z. **The development and recent advances of flood forecasting activities in china**. In **Flood Forecasting**, pp. 67–86. Elsevier, 2016.

LIVINO DE CARVALHO, A., COSTA, F., DAMÁZIO, J., E GUILHON, L. Previsão de vazões diárias através de uma abordagem estocástica–modelo previvazh. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2001.

LONG, S., FATOYINBO, T. E., E POLICELLI, F. Flood extent mapping for namibia using change detection and thresholding with sar. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 3, p. 035002, 2014.

LUDWIG, K. **The water balance model LARSIM: design, content and applications**. Inst. für Hydrologie der Univ., 2006.

MALINOWSKI, R., GROOM, G. B., HECKRATH, G., E SCHWANGHART, W. Do remote sensing mapping practices adequately address localized flooding? a critical overview. **Springer Science Reviews**, v. 5, n. 1-2, p. 1–17, 2017.

MANAVALAN, R. Sar image analysis techniques for flood area mapping-literature survey. **Earth Science Informatics**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2017.

MASON, D. C., DAVENPORT, I. J., NEAL, J. C., SCHUMANN, G. J.-P., E BATES, P. D. Near real-time flood detection in urban and rural areas using high-resolution synthetic aperture radar images. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 8, p. 3041–3052, 2012.

MEDEIROS, S. C., HAGEN, S. C., E WEISHAMPEL, J. F. Comparison of floodplain surface roughness parameters derived from land cover data and field measurements. **Journal of Hydrology**, v. 452, p. 139–149, 2012.

MEISSNER, D., KLEIN, B., LISNIAK, D., E PINZINGER, R. Probabilistic flow and water-level forecasts-communication strategies and potential uses for inland navigation. **Hydrologie und Wasserbewirtschaftung**, v. 58, n. 2, p. 119–127, 2014.

MIDDLEMANN, M. H. E MIDDELMANN, M. **Natural hazards in Australia: identifying risk analysis requirements**. Geoscience Australia, 2007.

MIGUEZ, M., VERÓL, A., E DI GREGORIO, L. T. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. Elsevier Brasil, 2017.

MISHRA, S. K. E SINGH, V. P. **Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology**, volume 42. Springer Science & Business Media, 2013.

MOMO, M. R., PINHEIRO, A., SEVERO, D. L., CUARTAS, L. A., E NOBRE, A. D. Desempenho do modelo hand no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **RBRH [online]**, v. 21, n. 1, p. 200–208, 2016.

MONTEIRO, L. R., KOBIYAMA, M., E ZAMBRANO, F. C. **Mapeamento de Perigo de Inundação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2015.

MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., E VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MUJUMDAR, P. P. E NAGESH KUMAR, D. **Floods in a Changing Climate: Hydrologic Modeling**. International Hydrology Series. Cambridge University Press, 2012.

NASH, J. E. E SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NÉELZ, S. E PENDER, G. Benchmarking the latest generation of 2d hydraulic flood modelling packages, 2013.

NÉELZ, S., PENDER, G., ET AL. Benchmarking of 2d hydraulic modelling packages, 2010.

OHL, C. A. E TAPSELL, S. Flooding and human health: the dangers posed are not always obvious. **BMJ: British Medical Journal**, v. 321, n. 7270, p. 1167, 2000.

ORGANIZATION, W. M. **Manual on Flood Forecasting and Warning**. OMM (Collection). World Meteorological Organization, 2011.

PAGANO, T., ELLIOTT, J., ANDERSON, B., E PERKINS, J. **Australian bureau of meteorology flood forecasting and warning**. In **Flood Forecasting**, pp. 3–40. Elsevier, 2016.

PAPPENBERGER, F., CLOKE, H. L., PARKER, D. J., WETTERHALL, F., RICHARDSON, D. S., E THIELEN, J. The monetary benefit of early flood warnings in europe. **Environmental Science & Policy**, v. 51, p. 278–291, 2015.

PENDER, G. Briefing: Introducing the flood risk management research consortium. In **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management**, volume 159, pp. 3–8. Thomas Telford Ltd, 2006.

PIAZZA, G. A., TORRES, E., MOSER, P., GOTARDO, R., KAUFMANN, V., E PINHEIRO, A. Análise espacial e temporal dos dados de precipitação das estações de entorno da bacia do ribeirão concórdia, lontras (sc) visando sua inserção no contexto de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, 2016.

PILLING, C., DODDS, V., CRANSTON, M., PRICE, D., HARRISON, T., E HOW, A. **Flood forecasting—a national overview for great britain**. In **Flood Forecasting**, pp. 201–247. Elsevier, 2016.

RIADH, A., CEDRIC, G., E JEAN, M. Telemac modeling system: 2d hydrodynamics telemac-2d software release 7.0 user manual. **Paris: R&D, Electricite de France**, pp. 134, 2014.

SANTOS, C. F., TORNQUIST, C. S., E MARIMON, M. P. C. Indústria das enchentes: Impasses e desafios dos desastres socioambientais no vale do itajaí. **Geosul**, v. 29, n. 57, p. 197–216, 2014.

SANTOS, R. D. Vulnerabilidade ambiental. **Brasília: Ministério do Meio Ambiente**, 2007.

SILVA, E., OFICIALDEGUI, E., CIRILO, J., NETO, A. R., DANTAS, C., E ALMEIDA, K. Monitor avançado de enchentes (maven): a hydroclimatologic computational framework for early flood alert systems. In **INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT**, volume 6, 2014.

SMITH, P., PAPPENBERGER, F., WETTERHALL, F., DEL POZO, J. T., KRZEMINSKI, B., SALAMON, P., MURARO, D., KALAS, M., E BAUGH, C. **On the operational implementation of the european flood awareness system (efas)**. In **Flood Forecasting**, pp. 313–348. Elsevier, 2016.

TACHINI, M., KOBYIAMA, M., LOESCH, C., SEVERO, D. L., E DOS SANTOS, H. Avaliação de danos de inundações ocorridas em blumenau/sc nos anos 1983, 1984, 1992 e 2001. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, v. 18, p. 1–18, 2009.

TENG, J., JAKEMAN, A., VAZE, J., CROKE, B. F., DUTTA, D., E KIM, S. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, v. 90, p. 201–216, 2017.

THOMAS, J., JOSEPH, S., THRIVIKRAMJI, K., E ARUNKUMAR, K. Sensitivity of digital elevation models: The scenario from two tropical mountain river basins of the western ghats, india. **Geoscience Frontiers**, v. 5, n. 6, p. 893–909, 2014.

TSHIMANGA, R. M., TSHITENGE, J. M., KABUYA, P., ALSDORF, D., MAHE, G., KIBUKUSA, G., E LUKANDA, V. **A regional perceptive of flood forecasting and disaster management systems for the congo river basin**. In **Flood Forecasting**, pp. 87–124. Elsevier, 2016.

TWELE, A., CAO, W., PLANK, S., E MARTINIS, S. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 13, p. 2990–3004, 2016.

VU, T. T., NGUYEN, P. K., CHUA, L. H., LAW, A. W., ET AL. Two-dimensional hydrodynamic modelling of flood inundation for a part of the mekong river with telemac-2d. **British Journal of Environment and Climate Change**, v. 5, n. 2, p. 162–175, 2015.

WANG, Y., CHEN, A. S., FU, G., DJORDJEVIĆ, S., ZHANG, C., E SAVIĆ, D. A. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information

sources and urban features. **Environmental modelling & software**, v. 107, p. 85–95, 2018.

WMO, U. International glossary of hydrology. **Ženeva, Švajčiarsko**, 2012.

YATES, D., SIEBER, J., PURKEY, D., E HUBER-LEE, A. Weap21—a demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. **Water International**, v. 30, n. 4, p. 487–500, 2005.

YU, D. E LANE, S. N. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 20, n. 7, p. 1541–1565, 2006.

YUCEL, I., ONEN, A., YILMAZ, K., E GOCHIS, D. Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 49–66, 2015.

ZHI-YONG, W., GUI-HUA, L., ZHI-YU, L., JIN-XING, W., E HENG, X. Trends of extreme flood events in the pearl river basin during 1951–2010. **Advances in Climate Change Research**, v. 4, n. 2, p. 110–116, 2013.