

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

FRANCIELE MARIA VANELLI

RECONSTRUÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO EVENTO DE 1974 EM
TUBARÃO, SC

PORTO ALEGRE

2019

FRANCIELE MARIA VANELLI

RECONSTRUÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO EVENTO DE 1974 EM
TUBARÃO, SC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Coorientador: Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum

PORTO ALEGRE

2019

Vanelli, Franciele Maria
Reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento
de 1974 em Tubarão, SC / Franciele Maria Vanelli. --
2019.

153 f.

Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientador: Joel Avruch Goldenfum.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Reconstrução de cheia histórica. 2.
Retromodelagem. 3. Bacia costeira. 4. Tubarão 1974. 5.
Simulação hidrológica e hidrodinâmica. I. Fan,
Fernando Mainardi, orient. II. Goldenfum, Joel
Avruch, coorient. III. Título.

FRANCIELE MARIA VANELLI
RECONSTRUÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO EVENTO DE 1974 EM
TUBARÃO, SC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 04 de fevereiro de 2019.

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum – UFRGS
Coorientador

Prof. Dr. Walter Collischonn – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Fernando Dornelles – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe – UFSC
Examinador

A quem acredita e trabalha com esforço e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

- À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) pelo ensino de qualidade e pela estrutura fornecida.
- À Prefeitura Municipal de Tubarão e à equipe da Defesa Civil do Município pelo apoio financeiro, pelas informações fornecidas e pelo auxílio técnico.
- Ao Rafael Marques por todo compartilhamento de informações, pelo interesse nas discussões e grande entusiasmo pelo tema.
- Ao Governo Federal, representado pela CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, essencial para minha permanência em Porto Alegre.
- Ao professor Juan Martín Bravo por sua dedicação e trabalho exemplar como coordenador do Programa da Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.
- Ao professor Joel Avruch Goldenfum pela coorientação e pela oportunidade de integrar sua equipe de trabalho, viabilizando meu ingresso no mestrado.
- Ao professor Fernando Mainardi Fan pela disposição em me orientar ao longo do desenvolvimento deste trabalho.
- Aos membros da banca, professores Fernando Dornelles, Pedro Chaffe e Walter Collischonn, pelas valiosas contribuições;
- Aos funcionários do IPH que prezam pelo ambiente acadêmico e aos professores que compartilham seus conhecimentos.
- A todos os colegas sempre dispostos a ajudar, esclarecer dúvidas e compartilhar seus conhecimentos, em especial: Aline, Ayan, Benício, Daniele, João Paulo, Juan, Juliana, Hugo, Leonardo e Sly.
- Aos colegas que se tornaram amigos transformando o IPH em um lar com conversas agradáveis, café, risadas altas e encontros nos corredores. Sou imensamente grata pela confiança e amizade. Sem vocês, a caminhada não seria tão linda.
- Às amigadas sinceras;
- Aos meus pais, Vania e Flávio, pelo amor, paciência e compreensão.

Por fim, sou imensamente grata pela oportunidade de trilhar esse caminho de aprendizado onde encontrei pessoas maravilhosas que despertam o melhor em mim.

“Mais fácil me foi encontrar as leis com que se movem os corpos celestes, que estão a milhões de quilômetros, do que definir as leis do movimento da água, que escoam frente aos meus olhos.”

Galileu Galilei (1564 – 1642)

RESUMO

A magnitude dos eventos de cheia, em geral, prejudica o registro sistemático das variáveis hidrológicas e limita o conhecimento sobre esses eventos que ocorrem raramente. O uso de dados provenientes de outras fontes, como observações humanas e evidências físicas, pode complementar os dados sistemáticos. Estudos de reconstrução de eventos hidrológicos extremos de máxima contribuem para a investigação sobre essas ocorrências, os fatores e interações envolvidas, possibilitando que os resultados sejam utilizados para ampliar o conhecimento sobre esses eventos de rara ocorrência e auxiliar na gestão de desastres hidrológicos. As bacias hidrográficas costeiras apresentam alta densidade populacional e em decorrência da localização sofrem influência das precipitações, dos processos fluviais e das alturas da maré. A interação entre essas variáveis gera eventos compostos cuja análise de ocorrência é complexa. A Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar se localiza no estado de Santa Catarina, sul do Brasil, entre a encosta da Serra Geral e o Oceano Atlântico. Inserido nessa bacia costeira está o município de Tubarão cujo histórico de inundações data desde o início do século XIX, ocorrendo em 1974 um evento de grande magnitude que repercutiu em grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Considerando a importância das bacias costeiras e os conhecimentos limitados sobre esse desastre hidrológico, o presente estudo teve como objetivo a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 nessa bacia hidrográfica com enfoque no município de Tubarão. Diferentes combinações entre as variáveis foram testadas no modelo hidrológico e hidrodinâmico calibrado e validado. Os resultados apontaram para a subestimativa dos dados de precipitação, principalmente, pela pequena quantidade de estações pluviométricas na bacia hidrográfica no ano do evento. Esse estudo de reconstrução possibilitou ampliar os conhecimentos hidrológicos e hidrodinâmicos sobre o desastre hidrológico de 1974 em Tubarão, fornecendo informações relevantes que podem apoiar o sistema de monitoramento e alerta do município.

Palavras-chave: Reconstrução de cheia histórica. Retromodelagem. Bacia costeira.

ABSTRACT

The significant floods can prejudice the systematic recording of hydrological variables and to limit the knowledge about these rarely events. The use of data from other sources, such as human observations and physical evidence, may complement systematic records. Past flood reconstruction contributes to the investigation of these occurrences, the factors and interactions involved, allowing to increase the knowledge about these events of rare occurrence and to assist in the management of hydrological disasters. The coastal basins present high population density and due to their location, these locals are influenced by precipitation, river discharges and height coastal tide. The interaction between these variables generates compound events whose occurrence analysis is complex. The Tubarão River Basin and Lagunar Complex is located in the state of Santa Catarina, southern Brazil, between the Serra Geral elevation and the Atlantic Ocean. Tubarão city is inserted in this coastal basin and presents historic of flooding dates from the beginning of the nineteenth century, occurring in 1974 an event of great magnitude that had economic, social and environmental damages. Considering the importance of the coastal basins and the limited knowledge about this hydrological disaster, the present study had the objective of the hydrological and hydrodynamic reconstruction of the event of 1974 in this basin enfatizing Tubarão city. Different combinations between the variables were tested in the hydrological and hydrodynamic model calibrated and validated. The results demonstrate to the underestimation of precipitation data, mainly due to the small number of rainfall stations in the basin in the year of the event. This reconstruction study made it possible to expand hydrological and hydrodynamic knowledge about the 1974 hydrological disaster in Tubarão city, providing an estimate about the flood drivers and identifying their interactions and understanding the relation between the dominant processes and the characteristics of the basin. These relevant informations that can support the municipality's monitoring and alerting system.

Keywords: Historical flood reconstruction. Retromodelling. Coastal basins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação entre fenômenos naturais e sociedade resultando na ocorrência dos desastres naturais. Fonte: Adaptado de Kobiyama et al., (2018).	20
Figura 2 – Metodologia para reconstrução de inundações históricas. Fonte: Adaptado de Barriendos et al., (2014).	28
Figura 3 – Estratégia metodológica do presente estudo.	37
Figura 4 – Metodologia para Reconstrução hidrológica de evento.	39
Figura 5 - Metodologia para reconstrução hidrodinâmica de evento.	41
Figura 6 – Unidades territoriais que a área de estudo se insere.	46
Figura 7 – Linha do tempo diária com os registros provenientes de observações humanas sobre o evento.	48
Figura 8 – Municípios Lauro Müller, Orleans, Tubarão e bairros inundados dia 23/04/1974. Detalhe para a Barra do Camacho.	49
Figura 9 – Lodo, troncos e entulhos depositados em Tubarão. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal.	50
Figura 10 – Trilho da ferrovia retorcido pela força das águas do Rio Tubarão. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal.	50
Figura 11 – Conforme anotação manuscrita, a manchete foi veiculada em 27/03/1974 no periódico “O Estado” e trata sobre a tragédia decorrente da inundação. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal.	51
Figura 12 – (a) Estabelecimento Vinhos Cardeal atingido pela inundação, posteriormente passou a se denominar Vinícola Abramo Silvestre Ltda. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal. (b) Local inundado (rosa) localizado aproximadamente 150 m da margem do Rio Tubarão e em verde, a Prefeitura Municipal. Fonte: Google Earth (2017).	51
Figura 13 – Resultados obtidos na etapa de Investigação.	55
Figura 14 – Resultados obtidos na etapa de Processamento e/ou Recuperação.	56
Figura 15 – Estações pluviométricas com dados em março de 1974 identificadas de 1 a 15 inseridas no mapa de relevo da bacia hidrográfica.	59
Figura 16 – Estações pluviométricas com dados em março de 1974 identificadas de 1 a 15 conforme indicação na Tabela 3 e precipitação acumulada (Pacum) em mm entre os dias 22 a 26 de março.	60
Figura 17 – Hietograma dados observados e média dos dados provenientes de reanálise. Fonte: Vanelli et al. (2018a).	63
Figura 18 – Estações fluviométricas com dados em março de 1974.	64
Figura 19 – Fotografias do início da cheia: (a) Rio Tubarão extravasando a Ponte Nereu Dias; (b) Águas do Rio Tubarão inundaram a Rua Coronel Colaço próximo a Ponte Nereu Dias atingindo aproximadamente 0,50 m de altura. Fonte: Machado (2005).	68
Figura 20 – Mancha de inundação da cheia histórica de 1974 gerada pela reclassificação do modelo HAND. Fonte: Adaptado de Zanandrea et al. (2018).	68
Figura 21 – Adaptado de Rodríguez et al. (2006) dados de Maré extrema obtidos da base de dados DOW para o período de 1948 a 2008: Altura de onda significativa excedida por 12 h (m) ao longo da costa brasileira.	70
Figura 22 –Traçado do Rio Tubarão e do Rio Capivari com meandros conforme Cartas do Exército de 1976 sobreposto ao traçado retificado pela DNOS.	74
Figura 23 – (a) MDT com traçado do Rio Tubarão retificado; (b) resultado da etapa (vi) com trechos de 1.000 m, buffer de 150 m para cada lado do traçado central e valores representativos do somatório da média e desvio padrão; (c) MDT com traçado meandrante do Rio Tubarão.	75

Figura 24 – Mapa de uso do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.	78
Figura 25 – Mapa de tipo do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.	80
Figura 26 – Procedimentos da etapa de configurações do modelo.	81
Figura 27 – Mapa das Classes de Resposta Hidrológica.	82
Figura 28 – Distribuição espacial das estações climatológicas e estações pluviométricas na área de estudo e entorno.	85
Figura 29 – Disponibilidade temporal dos dados de precipitação das estações localizadas na bacia hidrográfica e em seu entorno no período de 1940 a 2004.	86
Figura 30 - Localização das estações fluviométricas existentes na área de estudo com destaque para as estações fluviométricas selecionadas para calibração e validação do modelo hidrológico.	89
Figura 31 - Disponibilidade temporal dos dados de vazão das estações fluviométricas no período de 1940 a 2004: sendo azul indicativo de ano completo, branco de dados indisponíveis no ano e cores intermediárias representam anos com falhas.	90
Figura 32 - Reconstrução hidrológica do evento de 1974 em Tubarão, SC.	91
Figura 33 - Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Tubarão: (a) Agosto/1977; (b) Julho/1973; (c) Dezembro/1972; (d) Fevereiro/1971; (e) Fevereiro/1967; (f) Agosto/1965.	95
Figura 34 - Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Tubarão: (g) Março/1963; (h) Fevereiro e Março/1960; (i) Março/1958; (j) Abril/1948.	96
Figura 35 - Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Capivari: (a) Agosto/1977; (b) Maio/1976.	96
Figura 36 – Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Capivari: (c) Fevereiro/1973; (d) Fevereiro/1967; (e) Março/1963; (f) Fevereiro e Março/1960; (g) Setembro e Outubro/1959; (h) Outubro e Novembro/1958; (i) Março e Abril/1954; (j) Julho/1948.	97
Figura 37 – Hidrogramas observados (código 8458000 e 84600000) e simulados (Rio Tubarão e Rio Capivari) para o evento de 1974 e localização em relação ao município de Tubarão.	99
Figura 38 - Reconstrução hidrodinâmica do evento de 1974 em Tubarão, SC.	100
Figura 39 – Máxima área inundada do Cenário 1 para o período do evento com detalhe para o município de Tubarão e circunvizinhança.	103
Figura 40 – Comparação das áreas inundadas no Cenário 1, mancha do HAND e pontos levantados em campo.	104
Figura 41 – Comparação áreas inundadas na margem direita do Rio Tubarão entre os Cenário 1 e 3.	106
Figura 42 – Comparação áreas inundadas na margem direita do Rio Tubarão entre os Cenário 3 e 5.	108
Figura 43 – Comparação áreas inundadas do Cenário 5 com dados de referência.	109
Figura 44 – Rio Tubarão: hidrograma observado da estação fluviométrica código 84580000 e hidrograma simulado resultante da precipitação com 50% de acréscimo.	112
Figura 45 - Comparação das áreas inundadas no Cenário 12, mancha do HAND e pontos levantados em campo.	113
Figura 46 - Comparação das áreas inundadas no Cenário 13, mancha do HAND e pontos levantados em campo.	114
Figura 47 – Relação entre a compatibilidade obtida dos cenários simulados com a mancha de inundação do HAND (eixo x) e dos cenários simulados com os pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil (eixo y).	117
Figura 48 – Destaque para os pontos não afetados pela inundação simulada no Cenário 13.	118

Figura 49 – Comparação entre o hidrograma da estação fluviométrica 84580000 proveniente da curva-chave (Q_Curva-chave), o hidrograma do estudo da DNOS (Q_DNOS) e os hidrogramas estimados considerando os dados disponíveis de precipitação (Q_Pobs), o acréscimo de 50% na precipitação (Q_1,5xPobs)..... 120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de desempenho para modelo hidrológico.	43
Tabela 2 – Fontes de pesquisa e material coletado.	53
Tabela 3 – Estações pluviométricas com dados no ano de 1974.	59
Tabela 4 – Dados de precipitação total anual anos de 1983 e 1974. Fonte: Marques (2010).	61
Tabela 5 – Identificação das estações fluviométricas com registros em março de 1974.	64
Tabela 6 – Valores de nível de água e vazão referentes a estação Rio do Pouso estimados pelo estudo prévio às obras no Rio Tubarão e pela base de dados da ANA.	66
Tabela 7 – Dados de identificação das cartas topográficas usadas para recuperação do MDT.	73
Tabela 8 – Dados de identificação das cartas topográficas que compõem a área de estudo.	77
Tabela 9 – Tipos de solo da área de estudo e respectiva reclassificação.	80
Tabela 10 – Coeficientes das relações geomorfológicas (a, b, c, d) e correlação (R^2) obtida para os dados das sub-bacias do Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão.	83
Tabela 11 – Estações climatológicas selecionadas.	85
Tabela 12 – Informações das estações fluviométricas.	87
Tabela 13 – Análises estatísticas com classificação de desempenho.	93
Tabela 14 – Análises estatísticas para validação de eventos de máxima para a Sub-bacia Rio do Braço Norte e Formadores do Rio Tubarão.	93
Tabela 15 – Análises estatísticas para validação de eventos de máxima para a Sub-bacia Rio Capivari.	94
Tabela 16 – Descrição dos Cenários 2 e 3 e respectivas análises em relação aos limites territoriais de Tubarão.	105
Tabela 17 – Variação percentual das vazões resultantes dos Cenários 1 e 3 (22 a 26/03/1974) e longitudinalmente da foz até 40 km a montante.	106
Tabela 18 – Resultados dos Cenários 4 e 5.	108
Tabela 19 – Resultados do Cenário 6 a 9.	110
Tabela 20 – Resultados dos Cenários 10 a 12.	112
Tabela 21 – Resultado do Cenário 13.	115
Tabela 22 – Resumo dos Cenários 1 a 13.	115
Tabela 23 – Resumo dos resultados obtidos nos Cenários 1 a 13.	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Escala Beaufort e aspecto do mar.....	45
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

BDGEx: Banco de Dados Geográfico do Exército Brasileiro

Cd: Coeficiente de atrito

CEMADEN: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CIRAM: Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina

CN: Número de Curva

CRH: Classe de resposta hidrológica

DNOS: Departamento Nacional de Obras de Saneamento

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPAGRI: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

ERA-20CM: Twentieth-Century Atmospheric Model Ensemble

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

HEC-HMS: Hydrologic Modeling System

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center-River Analysis System

KGE: Índice de Eficiência de Kling-Gupta

Landsat: Land Remote Sensing Satellite

MDT: Modelo Digital de Terreno

MGB-IPH: Modelo Hidrológico de Grandes Bacias

NCDC: National Climatic Data Center

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NSE: Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe

PBIAS: percentual de viés

RSR: relação entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados

SC: Santa Catarina

SDS: Secretaria do Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável

SIGSC: Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina

SNIRH: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

UNISDR. United Nations International Strategy for Disaster Reduction

UNISUL: Universidade do Sul de Santa Catarina

URH: Unidade de resposta hidrológica

USGS: United States Geological Survey

VANTs: Veículos Aéreos Não Tripulados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	DESASTRE HIDROLÓGICO	20
3.2	GESTÃO DE DESASTRES HIDROLÓGICOS	21
3.3	INCERTEZAS NOS DADOS DA REDE HIDROMETEOROLÓGICA	22
3.4	FONTES DE DADOS SOBRE INUNDAÇÕES PASSADAS	23
3.5	RECONSTRUÇÃO DE INUNDAÇÕES HISTÓRICAS	25
3.6	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA APLICADA A RECONSTRUÇÃO DE EVENTOS DE CHEIA	30
3.6.1	Modelos utilizados em estudos anteriores	30
3.6.2	Modelo de Grandes Bacias – MGB- IPH	31
3.7	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
4	METODOLOGIA	37
4.1	FASE 1	37
4.2	FASE 2	38
4.2.1	Análise de desempenho do modelo hidrológico	41
4.2.2	Análise de desempenho do modelo hidrodinâmico	43
4.2.3	Formulação dos cenários	43
5	OBJETO DE ESTUDO: EVENTO DE 1974 EM TUBARÃO, SC	46
6	FASE 1: DADOS	53
6.1	INVESTIGAÇÃO DAS FONTES	53
6.2	ANÁLISE DOS DADOS	55
6.2.1	Condições meteorológicas	56
6.2.2	Precipitação	58
6.2.3	Vazão	63
6.2.4	Marcas de cheia e locais afetados	66
6.2.5	Maré	69
6.2.6	Modelo Digital do Terreno	71
6.2.7	Uso do solo	76
6.2.8	Tipos de solo	79
7	FASE 2: MODELAGEM	81
7.1	CONFIGURAÇÕES DO MODELO	81

7.1.1	Dados climáticos.....	84
7.1.2	Dados pluviométricos	86
7.1.3	Dados fluviométricos	86
7.2	RECONSTRUÇÃO HIDROLÓGICA.....	91
7.2.1	Calibração e validação do modelo.....	92
7.2.2	Estimativa do hidrograma e da vazão máxima	98
7.3	RECONSTRUÇÃO HIDRODINÂMICA.....	99
7.3.1	Área inundada sem influência da maré	101
7.3.2	Área inundada com influência de maré	104
7.3.3	Área inundada com influência de maré e vento.....	107
7.3.1	Área inundada com redução na área do canal	109
7.3.2	Área inundada com acréscimo na precipitação	111
7.3.3	Área inundada com cenários combinados.....	113
7.3.4	Estimativa da área inundada	115
8	SÍNTESE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	119
9	CONCLUSÕES	123
10	RECOMENDAÇÕES.....	125
	REFERÊNCIAS.....	126

1 INTRODUÇÃO

Eventos hidrológicos extremos de máxima, em geral, não são bem documentados, sendo caracterizados pela escassez e/ou baixa qualidade dos dados. Os desastres hidrológicos de grande magnitude com danos econômicos, sociais e ambientais significativos ocorrem raramente, sendo necessário investigar os eventos ocorridos para ampliar os conhecimentos e aprender com o passado.

Para quantificar as variáveis do ciclo hidrológico, o ser humano desenvolveu equipamentos e implementou a coleta sistemática dos dados. No entanto, na ocorrência de cheias, o registro pode ser prejudicado em virtude da periculosidade à vida do profissional que realiza a medição, destruição da estação de monitoramento (Brázdil et al., 2006), ou ainda, pelas incertezas relacionadas ao instrumento de medição, como por exemplo, a ação do vento prejudicar o registro do pluviômetro (McMillan et al. 2018) ou ainda pelo método de estimativa aplicado, como no caso da curva-chave (Dymond e Christian, 1982; Clarke, 1999; Clarke et al., 2000; Benito et al., 2004; Brázdil et al., 2006; Westerberg et al., 2011; Di Baldassarre e Claps, 2011; Domeneghetti et al., 2012; Oliveira et al., 2016). Tendo em vista as limitações espaciais e temporais dos dados sistemáticos, as informações dos eventos passados podem ser complementadas por dados provenientes de observações humanas, tais como, crônicas (Brázdil et al., 2006) ou veículos aéreos não tripulados (VANTs) (Tauro et al., 2016), dentre outros.

A escassez de informações sobre o evento e as interações ocorridas denota a relevância dos estudos de reconstrução dos eventos passados. A reconstrução tem por objetivo ampliar a compreensão dos processos hidrológicos (Velásquez et al., 2018) e hidrodinâmicos envolvidos na ocorrência do evento extremo hidrológico de máxima. Ampliar o conhecimento sobre os fatores e os processos envolvidos em desastre hidrológicos de grande magnitude pode apoiar a gestão de desastres nas bacias hidrográficas (Bürger et al. 2006; Remo e Pinter, 2007, Sudhaus et al., 2008; Masoero et al., 2013; Segura-Beltrán et al., 2016; Fortunato et al., 2017; Velásquez et al., 2018), visto que esses eventos são raros e com registros limitados.

A complexidade dos desastres hidrológicos ocorridos em bacias costeiras é ainda maior em decorrência dos mecanismos envolvidos e pela alta densidade populacional da região costeira. Aproximadamente 40% da população mundial reside dentro de uma faixa de 100 km da costa (United Nations, 2017). No Brasil, em 2010

cerca de 26,6% da população se distribuía em 463 municípios costeiros (IBGE, 2010), conforme definição de zona costeira do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (Brasil, 1997). Por se tratar de uma região de transição, os mecanismos para ocorrência de cheias na região costeira estão relacionados aos fatores: nível do mar, vazão (processo fluvial) e precipitação (processo fluvial) (Moftakhari et al. 2017), cujas interações geram eventos compostos que podem desencadear desastres hidrológicos. Nas bacias costeiras do Brasil, apesar de identificada a influência da maré nos processos hidrológicos (CEMADEN, 2017), a altura da maré não integra o sistema de monitoramento e alerta na maioria dos municípios costeiros.

A Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar se localiza no sul do estado de Santa Catarina e se encontra delimitada pela encosta da Serra Geral e pelo Oceano Atlântico. Sendo assim, sofre influência dos mecanismos de cheia associados à região costeira e está sujeita a ocorrência de eventos compostos. O município de Tubarão se desenvolveu no entorno do rio homônimo, cujo nome se origina do tupi-guarani “Tuba-nharô” que significa “Pai Feroz”. Sinônimo de desenvolvimento e portador de muitas alegrias, o caudaloso Rio Tubarão deixou marcas nos tubaronenses, como poderia indicar o nome em tupi-guarani. Transbordamentos do rio são relatados desde o século XIX, sendo 1880 um dos registros mais antigos (Machado, 2005). Em 1974, a inundação em Tubarão tomou proporções catastróficas resultando na perda de vidas, desestabilização da economia local, bem como perdas intangíveis e modificação das estruturas sociais, seja em decorrência da evasão de seus habitantes ou pela gentrificação.

O desastre hidrológico ocorrido na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar em 1974 apresenta escassez de informações e incertezas quanto a representatividade e qualidade dos registros existentes. Supõe-se que a magnitude dessa inundação foi resultante de um evento composto, com influência da altura da maré e dos processos fluviais, ou seja, transformação das precipitações em vazão.

A presente pesquisa realizou a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica da inundação histórica de 1974 ocorrida na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar, com enfoque no município de Tubarão. A motivação levou em consideração a relevância de ampliar a compreensão sobre esse desastre hidrológico de magnitude significativa ocorrido em uma bacia costeira, visando aprender com eventos passados, já que atualmente esse evento possui conhecimento limitado.

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral realizar a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento extremo ocorrido em 1974 na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar com enfoque no município de Tubarão, SC, Brasil.

O trabalho visa atingir os seguintes objetivos específicos:

- (i) Ampliar a compreensão do comportamento hidrológico e hidrodinâmico da bacia hidrográfica mediante a ocorrência desse evento hidrológico extremo de máxima;
- (ii) Compreender a interação entre as variáveis: precipitação, vazão, altura de maré e vento na ocorrência do evento em estudo;
- (iii) Identificar os fatores que contribuíram para a magnitude desse desastre hidrológico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a revisão conceitual de trabalhos que embasam essa pesquisa. Inicialmente, ressalta-se a motivação de estudos de reconstrução. Em seguida, são apresentadas as metodologias existentes, os conceitos de hidrologia histórica e uma breve revisão do modelo matemático utilizado e seus equacionamentos.

3.1 DESASTRE HIDROLÓGICO

Desastre pode ser definido como um sério distúrbio em decorrência da interação de um perigo natural com as condições de exposição, vulnerabilidade e capacidade de resposta de uma comunidade, resultando em perdas humanas, econômicas e ambientais, podendo requerer auxílio externo para se recuperar (UNISDR, 2016). Kobiyama et al. (2018) apresentam uma definição ilustrativa (Figura 1) que demonstra a ocorrência do desastre natural em decorrência da proximidade entre o fenômeno natural e a sociedade.

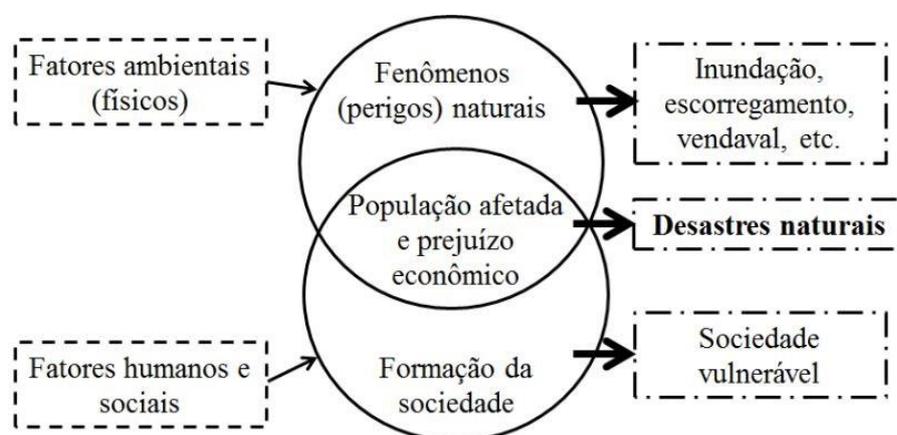


Figura 1 – Relação entre fenômenos naturais e sociedade resultando na ocorrência dos desastres naturais. Fonte: Adaptado de Kobiyama et al., (2018).

Muitos municípios se desenvolveram nas proximidades de rios visando o uso de suas águas. No entanto, o crescimento populacional das regiões inseridas nas planícies de inundações pode contribuir para o aumento no número de desastres hidrológicos (Goerl et al., 2013). Os desastres hidrológicos são aqueles associados à dinâmica das águas e predominam no Brasil e no mundo (Kobiyama et al., 2018).

3.2 GESTÃO DE DESASTRES HIDROLÓGICOS

A ocorrência de desastres hidrológicos demanda ações do Poder Público para minimização dos impactos negativos da convivência homem-rio. Em geral, são adotadas medidas estruturais que consistem em obras, como diques e barragens, projetadas para determinados períodos de retorno. Essas medidas podem aumentar o risco aos desastres hidrológicos, estimulando a ocupação das planícies de inundação devido à sensação de segurança (Di Baldassare, 2017). Ao ocorrer um fenômeno natural com período de retorno superior ao projetado, a medida estrutural pode não ser suficiente para proteger a comunidade, resultando no desastre hidrológico.

As medidas não-estruturais, adotadas conjuntamente ou não com as medidas estruturais, baseiam-se no planejamento urbano e na conscientização da população sobre os fenômenos e podem auxiliar na prevenção e redução dos impactos causados por inundações (Samela et al., 2017). Para apoiar essas medidas, os modelos computacionais podem ser usados para delimitar as áreas sujeitas a inundações contribuindo para o planejamento do uso e ocupação do solo (Monteiro et al., 2013; Vanelli et al., 2017).

Nesse sentido, a União Europeia, em 2007, publicou a Diretriz 2007/60/CE (União Europeia, 2007) relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. Entre seus itens, indica que na etapa de avaliação preliminar dos riscos de inundações sejam utilizados registros e estudos sobre a evolução a longo prazo, descrevendo as inundações significativas ocorridas no passado que possam causar perdas, caso ocorram novamente. A publicação dessa diretriz contribuiu para o aumento de estudos de reconstrução de inundações para uso na avaliação de risco de inundação (Ruiz Bellet et al., 2015).

Portanto, o estudo de eventos passados está para a gestão de prevenção de desastres hidrológicos, assim como a análise dos registros atuais está para a previsão das condições futuras. A reconstrução de eventos por meio da aplicação dos registros existentes e dos modelos computacionais disponíveis pode fornecer informações relevantes para nortear a tomada de decisões dos gestores (Remo e Pinter, 2007), principalmente, ao que tange o gerenciamento de risco de inundações (Bürger et al. 2006; Sudhaus et al., 2008; Masoero et al., 2013; Velásquez et al., 2018).

3.3 INCERTEZAS NOS DADOS DA REDE HIDROMETEOROLÓGICA

As variáveis hidrológicas apresentam incertezas provenientes de diferentes origens, tais como da medição do equipamento, do método de estimativa, do método de interpolação espacial ou temporal, de falhas humanas, dentre outros (McMillan et al. 2018). Ao tratar de eventos extremos de máxima que resultam em desastres hidrológicos, as incertezas podem ser ainda maiores.

A periculosidade à vida humana e os danos ou completa destruição dos equipamentos de medição podem justificar a escassez de dados mensurados por instrumentos na ocorrência desses eventos (Brázdil et al., 2006). Quando efetuado o registro, pelo equipamento ou pelo observador, ainda podem ocorrer incertezas em decorrência das proporções do evento. Frequentemente, precipitações intensas são subestimadas, principalmente se acompanhadas por ventos intensos, pois a turbulência dificulta a deposição da gota de chuva no pluviômetro ou pluviógrafo (McMillan et al. 2018).

A vazão referente a eventos extremos de máxima possui baixa qualidade (Benito et al., 2004). A medição da vazão associada às inundações é uma tarefa muito perigosa (Corato et al., 2014). Em geral, essa variável hidrológica é estimada pela relação entre nível de água e vazão obtida por valores medidos em campo, denominada curva-chave. Para estimar essa relação para valores superiores aos dados observados, aplica-se a extrapolação, em geral, na forma potencial (Mosley e McKerchar, 1992). Sem a inclusão de valores amostrais mais altos e sem considerar as condições físicas do trecho de rio, como por exemplo, a ocorrência de níveis de água altos que acarretam o extravasamento do leito menor do corpo hídrico, a extrapolação da curva-chave pode não ser representativa, pois a alteração da seção fluvial gera mudança na curva de tendência (Oliveira et al., 2016). Muitos estudos apontam a significativa incerteza na estimativa da vazão por esse método, principalmente na zona de extrapolação: Dymond e Christian (1982); Clarke (1999); Clarke et al. (2000); Westerberg et al. (2011); Di Baldassare e Claps, (2011); Domeneghetti et al. (2012); Oliveira et al., (2016); entre outros.

Sendo assim, observa-se a escassez e/ou baixa qualidade dos dados hidrológicos associados a eventos extremos de máxima. Além disso, no Brasil, a rede hidrometeorológica começou a ser implantada no início do século XX (ANA, 2007), de modo que as séries temporais não são longas e/ou apresentam períodos sem

informações ou com falhas nas observações em decorrência de problemas com os aparelhos de registro e/ou com o operador do posto (Tucci, 2000). Mediante o exposto, denotam-se as limitações em termos espaciais e temporais dos dados provenientes de estações de monitoramento. Portanto, a compreensão de eventos hidrológicos extremos de máxima pode ser prejudicada em virtude dessa carência de informações, bem como limitar a compreensão do comportamento da bacia hidrográfica mediante a ocorrência desses eventos.

3.4 FONTES DE DADOS SOBRE INUNDAÇÕES PASSADAS

Brázdil et al. (2006) sugerem três formas para obtenção dos dados hidrológicos para estudos de reconstrução de inundações passadas: evidências físicas (*"paleoflood hydrology"*), observações humanas (*"historical hydrology"*) e medições diretas por equipamentos (*"instrumental hydrology"*). Os termos empregados podem ser interpretados equivocadamente em função do tempo, assim ressalta-se que a denominação é dada considerando a forma de obtenção das informações, independente do período em que ocorreu o registro.

A medição por equipamentos, também denominada hidrologia instrumental (*"instrumental hydrology"*), é representada pela rede hidrometeorológica, cujos dados são obtidos pelo registro sistemático em estações de monitoramento, como por exemplo, nível de água, vazão, entre outras variáveis hidrológicas. Suas limitações foram expostas no item anterior, demonstrando a importância de ampliar o conhecimento sobre os eventos de cheia ocorridos apontam para a necessidade de outras fontes para complementar as informações desses eventos.

A partir das observações humanas sobre as inundações passadas, surgiu a hidrologia histórica (*"historical hydrology"*). Esse novo campo de pesquisa situado na interface entre hidrologia e história lida, principalmente, com registros e usa metodologias hidrológicas e históricas. Essa fonte de dados pode apresentar detalhes sobre os impactos dos eventos hidrológicos extremos de máxima na sociedade, bem como a percepção humana do evento dentro de um contexto histórico (Brázdil et al., 2006).

Entre as informações obtidas por observações humanas, podem ser citadas: narrativas a amigos e familiares, canções, pinturas, registros em cartórios de óbitos, registros em livros contábeis das prefeituras, correspondências, notícias veiculadas

nos meios de comunicação, marcas visuais nos locais afetados, livros, vídeos, relatórios técnicos (Brázdil et al., 2006). Nas últimas décadas, tecnologias emergentes têm sido empregadas como instrumento para realizar o registro, como os veículos aéreos não tripulados (VANTs), câmeras de alta qualidade dos celulares, bem como aplicativos para celulares capazes de estimar vazão por meio de imagens (Lüthi et al., 2014, Tauro et al., 2016). Todos esses registros da hidrologia histórica devem ser reunidos de modo a construir uma coleção de dados que viabilize o uso dessas informações com qualidade, quantidade e aplicabilidade, evitando que se torne um acúmulo de informações (Barriendos et al., 2014).

As evidências físicas (*"paleoflood hydrology"*) não são definidas pela escala temporal de ocorrência da inundação (Brázdil et al., 2006). São registros de inundações recentes, seculares ou, até mesmo milenares, ocorridas sem observações humanas ou medições por equipamentos (Baker, 1987). Os registros das inundações ocorrem no ambiente natural, sem a presença humana, e podem ser identificados por técnicas de geologia, sedimentologia, estratigrafia, dentre outras. Esse tipo de dado possibilita estimar as vazões de inundações ocorridas em áreas remotas (Thorndycraft et al., 2005; Herget e Meurs, 2009), ou ainda, juntamente com análises do clima possibilita entender interações entre as inundações e as mudanças climáticas globais (Guiming Hu et al., 2016).

Benito et al. (2004) indicam o uso de dados sistemáticos (medições por instrumentos) e não-sistemáticos (registros de observações humanas e por evidências físicas) de modo que as informações se complementem e melhorem os estudos de reconstrução. A combinação das diferentes fontes dos dados mostra grande potencial na redução das incertezas e fornece uma visão holística sobre a inundação passada (Brázdil et al., 2006). Considerando que os dados provenientes de estações de monitoramento são relativamente de curta extensão, quando existentes, a complementaridade das diferentes fontes também pode contribuir para análises de probabilidade de ocorrência (Barriendos et al., 2014).

Na Europa, em virtude da quantidade de dados disponíveis provenientes da hidrologia histórica, alguns estudos remetem a inundações ocorridas em outros séculos. Como, por exemplo, no estudo de Llasat et al. (2005) que localizou informações sobre inundações passadas em documentos das autoridades municipais com informações detalhadas sobre o comportamento do fenômeno, contendo dados

sobre o aumento dos níveis, duração, magnitude, bem como da precipitação associada.

Giglio e Kobiyama (2011) recomendam a criação de uma cultura de registro de eventos extremos e desastres naturais, bem como a aplicação de uma metodologia para que as informações essenciais, tais como nível máximo atingido com referência descrita, dia e hora dessa ocorrência, duração da inundação, volume precipitado no período anterior à inundação, mapeamento das áreas inundadas, sejam coletadas. Em muitos casos, a análise do comportamento da bacia hidrográfica é impossibilitada em virtude da pouca quantidade e qualidade das informações disponíveis. Portanto, as diferentes formas de registro são relevantes para auxiliar os estudos, seja com o uso de dados do passado para o presente, como o registro dos dados atuais para estudos futuros. Assim, além da quantidade, deve-se prezar pela qualidade do registro que é fundamental para assegurar confiabilidade ao estudo das inundações passadas.

3.5 RECONSTRUÇÃO DE INUNDAÇÕES HISTÓRICAS

O estudo de eventos hidrológicos extremos de máxima ocorridos no passado pode ser denominado de diferentes maneiras: retromodelagem – tradução da expressão inglês *retro-modeling* ou *retromodelling* – (Remo e Pinter, 2007; Remo et al., 2009; Balasch et al. 2011), reconstrução – tradução do inglês *reconstruction* (Bürger et al., 2006; Elleder, 2010; Balasch et al., 2010a; Balasch et al., 2010b; Masoero et al., 2013; Barriandos et al., 2014) e reconstituição (Ribeiro Neto et al., 2015). Entretanto, apesar dos termos distintos, pode ser definido de forma simplificada como o emprego de registros históricos e demais dados disponíveis em modelos numéricos para representar condições passadas (Remo e Pinter, 2007) de modo que as informações históricas possam contribuir para melhorar os conhecimentos sobre esses eventos (Naulet et al., 2005).

A primeira metodologia de reconstrução de eventos hidrológicos extremos de máxima foi apresentada por Balasch et al. (2010a) visando obter o hidrograma e a magnitude da precipitação associados ao evento. Essa metodologia consiste em duas etapas: (i) reconstrução hidrodinâmica, aplicação de modelo hidráulico para estimar a vazão de pico ou, se possível, o hidrograma da inundação e, (ii) reconstrução hidrológica, uso do modelo hidrológico para determinar o hietograma da chuva de projeto que causou a inundação.

Ainda sobre a metodologia proposta por Balasch et al. (2010a), nota-se que ela é uma abordagem inversa ao que geralmente se utiliza na simulação de inundações. Os autores propuseram que a primeira etapa seja com base no que, em geral, são considerados os resultados do evento: as manchas de inundação. As marcas de cheias disponíveis são os dados tidos como corretos, assim diferentes hidrogramas hipotéticos são testados a fim de obter resultados condizentes com os pontos observados. O hidrograma com melhor representação da mancha inundada é então o dado considerado correto para a etapa seguinte. No modelo hidrológico, diferentes hietogramas sintéticos são testados a fim de obter a melhor representação do hidrograma da etapa anterior.

Os autores empregaram marcas de cheia obtidas por meio de observações humanas (“*historical hydrology*”) em residências e demais construções, de modo que as cotas da inundação eram conhecidas. Assim, eles propuseram a reconstrução hidrodinâmica como a primeira etapa, utilizando como entrada as características hidráulicas do canal do rio e a vazão máxima hipotética, de modo que os resultados são comparados com os registros das cotas disponíveis. Em um processo iterativo, diferentes vazões são testadas buscando obter resultados de altura de água com diferença menor do que 1 cm entre o valor simulado e as marcas de cheia (registros históricos). Posteriormente, no modelo hidrológico são inseridas as características hidrológicas da bacia hidrográfica e um hietograma de projeto hipotético para representar a precipitação associada à inundação. Novamente, aplica-se um processo iterativo onde o hietograma é alterado até resultar uma vazão simulada com diferença relativa menor do que 1% em relação ao valor estimado na reconstrução hidrodinâmica.

Alguns estudos anteriores a Balasch et al. (2010a), utilizaram apenas modelos hidrodinâmicos para estudar inundações passadas. Naulet et al. (2005) e Remo e Pinter (2007), por exemplo, aplicaram registros históricos de nível máximo de água para estimar a vazão de pico de inundações com aplicação do modelo hidrodinâmico com discretização unidimensional. Enquanto que Masoero et al. (2013) empregaram alguns dados disponíveis de vazão e de nível de água como entrada do modelo hidrodinâmico com discretização uni e bidimensional e estimaram as áreas inundadas e o comportamento da inundação ao longo do tempo. Apesar de aplicar apenas o modelo hidrodinâmico, esses estudos possibilitaram a investigação dos impactos nas áreas propensas a inundação devido à implantação de medidas estruturais e

mudanças no uso do solo (Remo e Pinter, 2007; Remo et al., 2009; Di Baldassarre et al., 2009).

Barriendos et al. (2014) adaptaram a metodologia de Balasch et al. (2010a) e incluíram a etapa de reconstrução meteorológica (Figura 2), visando analisar os processos meteorológicos antes e durante o evento que causou a inundação. Similarmente a Balasch et al. (2010a), Barriendos et al. (2014) baseiam sua metodologia considerando que os dados disponíveis para retratar a inundação são as marcas de cheia. Na reconstrução hidrodinâmica, o hidrograma hipotético deve apresentar resultados próximos às cotas observadas. O hietograma hipotético resultante da reconstrução hidrológica deve ser coerente com os resultados da reconstrução meteorológica. Além disso, os autores descreveram a relevância da pesquisa de informações históricas sobre a inundação e propuseram uma metodologia para a criação de uma base de dados das inundações históricas com classificação das fontes de informação visando apoiar os estudos de reconstrução. Dispondo desses dados organizados sobre os eventos já ocorridos, aumenta a confiabilidade na representação do evento.

Ruiz-Bellet et al. (2015) aplicaram a metodologia proposta por Barriendos et al. (2014) e realizaram a reconstrução hidrodinâmica, hidráulica e meteorológica a partir de informações históricas da inundação ocorrida em 1874, na Catalunha, nordeste da Península Ibérica. O estudo contemplou dez locais inundados em cinco bacias hidrográficas possibilitando avaliar a distribuição espacial do evento. Os resultados apontam que o erro relativo da estimativa da vazão máxima variou entre $\pm 5\%$ e $\pm 44\%$, resultado considerado aceitável (Barriendos et al., 2003). Já a estimativa do hietograma de projeto apresentou maiores incertezas em decorrência da sensibilidade às mudanças nos dados de entrada, tais como, condição de saturação do solo e número de curva (CN). Portanto, nota-se que a incerteza associada aos dados de entradas dos estudos de reconstrução, inevitavelmente são transferidos para os resultados. Apesar disso, os autores consideram os resultados da reconstrução uma boa aproximação da realidade.

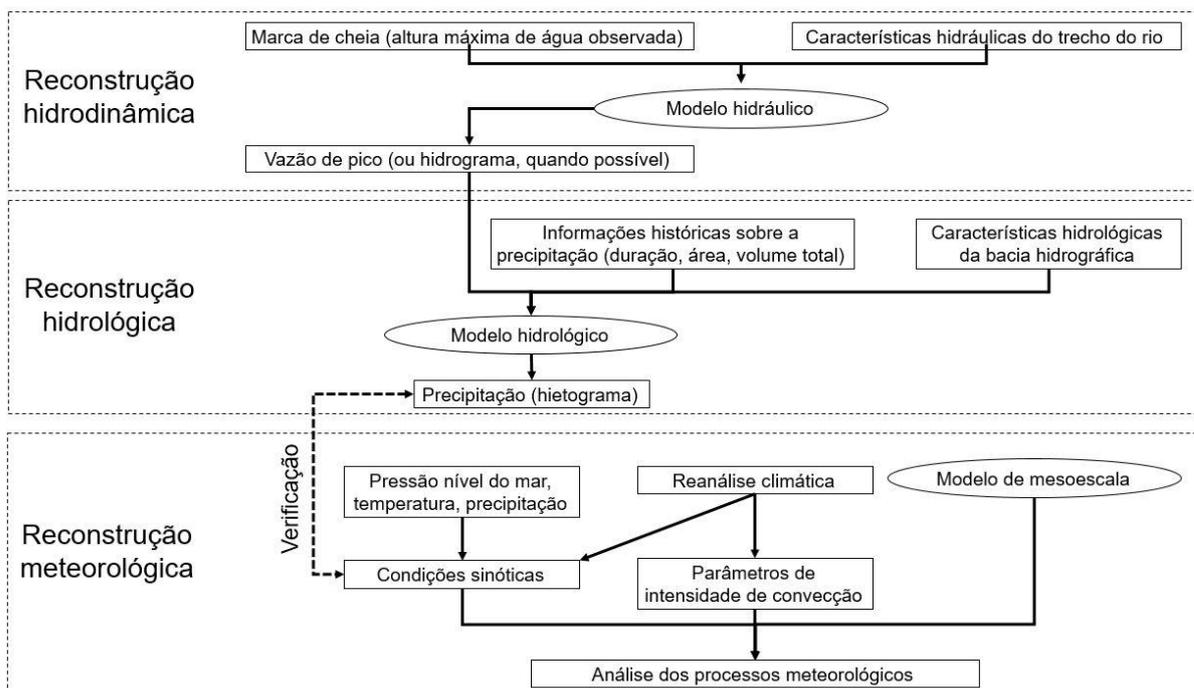


Figura 2 – Metodologia para reconstrução de inundações históricas. Fonte: Adaptado de Barriendos et al., (2014).

Masoero et al. (2013) também apontam a dificuldade de representação de inundações históricas, em virtude das incertezas nos dados de entrada. Entretanto, eles sugerem que quanto melhor documentado o evento, maior exatidão na calibração e validação do modelo. Dessa forma, apesar das incertezas existentes, a reconstrução da inundação baseada em um conjunto de registros pode fornecer uma estimativa de vazão com menor incerteza do que o valor oriundo da extrapolação da curva-chave.

Em alguns estudos de reconstrução, a metodologia utilizada consiste na reconstrução hidrológica antes da reconstrução hidrodinâmica. Emprega-se um modelo hidrológico calibrado e validado com dados da série histórica de precipitação, para estimar a vazão do evento. Posteriormente, aplicam-se esses valores de vazão no modelo hidrodinâmico a fim de estimar as áreas inundadas comparando com dados existentes de marcas de cheias (Ribeiro Neto et al., 2015).

Para aplicar essa metodologia, Ribeiro Neto et al. (2015) realizaram a calibração contínua do modelo hidrológico por eventos de cheia. Entretanto, em virtude da subestimativa das manchas de inundação no modelo hidrodinâmico, eles optaram por ajustar os parâmetros do modelo hidrológico realizando a calibração por eventos. O resultado do modelo hidrodinâmico foi comparado com os registros de marcas de cheia disponíveis. Após a reconstrução do evento de 2010 na bacia do Rio

Una, em Pernambuco, os modelos empregados foram associados a um módulo de previsão das chuvas, de modo a integrar o sistema de previsão e alerta de cheias no Rio Una. Esse estudo demonstra o uso complementar dos dados instrumentais e das observações humanas em modelos computacionais. Além disso, sua inserção na gestão de desastres como uma ferramenta de apoio, contribui para a minimização dos impactos das cheias naquela região.

A partir da análise de dados obtidos em diferentes fontes, Elleder (2010) enfocou na compreensão do hidrograma do evento inundação ocorrida em 1784, na República Tcheca. Ele identificou que o evento foi extremamente rápido e atingiu a segunda maior vazão máxima da história desse país. Com o uso de observações humanas, foi possível estimar a vazão desse evento ocorrido há séculos, auxiliando na compreensão de cheias com maiores períodos de retorno. Ele sugere que o impacto da inundação provavelmente seria menor em decorrência de um conjunto de barragens que armazenariam parte do volume. A aplicação do resultado desse estudo em modelos computacionais, poderia assegurar se essa afirmação está correta ou não, de modo a apoiar a gestão de riscos, bem como o planejamento pelo Poder Público.

As evidências físicas também podem ser utilizadas para complementar as informações sobre o evento. Como por exemplo, Segura-Beltrán et al. (2016) que combinaram modelos hidrológicos e hidráulicos com mapeamento geomorfológico e informações de levantamento pós-inundação. Em decorrência da pequena quantidade de dados disponíveis, a calibração do modelo hidrológico foi realizada para bacias hidrográficas similares a área de estudo. A combinação de diferentes tipos de fontes de dados permitiu compreender e generalizar os mecanismos que regem as inundações nos leques aluviais do Rio Girona.

É importante salientar que o estudo de reconstrução pretende representar determinado evento hidrológico extremo de máxima ocorrido no passado cujas variáveis envolvidas são parcialmente desconhecidas ou com incertezas. Dessa forma, o uso de modelos numéricos permite que diversas hipóteses sejam testadas. Sendo assim, a investigação das informações em diferentes fontes auxilia na representação e verificação se os resultados se aproximam do evento ocorrido.

Estudos de reconstrução de eventos são relevantes pois, em geral, tratam de inundações de proporções significativas, cujos danos afetaram a população local. Além disso, possibilita determinar os fatores associados aos diferentes processos

físicos na ocorrência desses eventos (Fortunato et al., 2017), e avaliar as interações entre as precipitações e o escoamento superficial e subsuperficial possibilitando uma melhor compreensão dos mecanismos hidrológicos (Velásquez et al., 2018). Com base nisso, é possível ampliar a compreensão sobre o evento e do comportamento hidrológico e hidrodinâmico da bacia hidrográfica na ocorrência de inundações.

Os estudos de reconstrução dos eventos hidrológicos extremos de máxima podem contribuir para a análise de probabilidade, como por exemplo, estimativas do período de retorno (Balasch et al., 2010a; Elleder, 2010), para avaliação de medidas estruturais mediante a ocorrência do mesmo conjunto de variáveis associadas ao evento e para avaliação de cenários futuros (Remo e Pinter, 2007; Remo et al., 2009; Di Baldassarre et al., 2009), dentre outras possibilidades. Todas essas informações contribuem para embasar análises de risco, elaborar planos de alerta e políticas de mitigação de risco, dentre outras ferramentas que apoiam a gestão de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica (Bürger et al. 2006; Remo e Pinter, 2007, Sudhaus et al., 2008; Masoero et al., 2013; Segura-Beltrán et al, 2016; Fortunato et al., 2017; Velásquez et al., 2018).

3.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA APLICADA A RECONSTRUÇÃO DE EVENTOS DE CHEIA

O presente item elenca os modelos empregados em estudos anteriores para reconstrução hidrológica e hidrodinâmica de eventos hidrológicos extremos de máxima e, em seguida, descreve o modelo utilizado no presente estudo.

3.6.1 Modelos utilizados em estudos anteriores

Na metodologia proposta por Balasch et al. (2010a) e depois modificada por Barriendos et al. (2014), os autores sugerem o uso do modelo hidrológico HEC-HMS (*“Hydrologic Modeling System”*) e do modelo hidrodinâmico HEC-RAS (*“Hydrologic Engineering Center-River Analysis System”*) para realizar a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica de eventos de cheias. Ambos foram desenvolvidos pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Exército dos Estados Unidos da América (*“Hydrologic Engineering Center – US Army Corps of Engineers”*).

Na literatura revisada, observa-se que esses modelos são amplamente utilizados para reconstrução hidrológica e/ou hidrodinâmica de inundações. Entre os estudos que empregaram ambos os modelos, podem ser citados alguns exemplos como: Ribeiro Neto et al. (2015). Já Remo e Pinter (2007), Remo et al. (2009), Balasch et al. (2011) utilizaram apenas o modelo hidrodinâmico HEC-RAS com discretização unidimensional, enquanto Di Baldassare et al. (2009) e Masoero et al. (2013) empregaram além do HEC-RAS com discretização unidimensional, algum outro com discretização bidimensional. Somente a partir da versão 5.0 (USACE-HEC, 2016) do modelo hidrodinâmico foi disponibilizada a discretização bidimensional.

Ao tratar da reconstrução hidrológica e hidrodinâmica, a aplicação desses modelos computacionais apresentam algumas limitações, tais como, (i) módulo hidrológico e hidrodinâmico desacoplados; (ii) extensão da área simulada pelo módulo hidrodinâmico limitam a trechos (Ribeiro Neto et al., 2015; Masoero et al., 2013; Remo e Pinter, 2007). Portanto, uma alternativa a essas limitações se refere ao uso de um modelo computacional capaz de representar os processos hidrológicos e hidrodinâmicos em toda extensão da bacia hidrográfica.

3.6.2 Modelo de Grandes Bacias – MGB- IPH

O Modelo de Grandes Bacias, MGB-IPH, foi inicialmente desenvolvido por Collischonn e Tucci (2001) e apresentado internacionalmente por Collischonn et al. (2007). É um modelo matemático que permite a representação de processos hidrológicos e hidráulicos em bacias com área de drenagem superior a 3.000 km² (Collischonn et al., 2007). Com o uso desse modelo computacional se obtém os hidrogramas produzidos a partir dos dados de precipitação e as áreas inundadas resultantes da propagação desses hidrogramas pela rede de drenagem.

3.6.2.1 *Discretização espacial*

A aquisição das características topográficas e a hidrografia da bacia a partir do processamento do MDT é realizada com o emprego da ferramenta de geoprocessamento *IPH-Hydro Tools* (Siqueira et al., 2016). Entre os resultados desse procedimento são geradas a rede de drenagem e as delimitações das bacias e sub-bacias hidrográficas. Posteriormente, aplica-se a segmentação da rede de drenagem,

cujo comprimento do trecho seccionado influencia na discretização espacial. O resultado desse procedimento possibilita a geração das unidades irregulares denominadas minibacias. Portanto, a discretização da bacia adotada no MGB-IPH leva em consideração as características do terreno por meio do processamento do MDT (Fan e Collischonn, 2014a).

Os processos hidrológicos verticais de cada minibacia levam em consideração as classes de resposta hidrológica (CRH), regiões com comportamento hidrológico semelhante assumido em função do mesmo tipo de solo e cobertura vegetal ou uso do solo (Pontes, 2016). Para determinar essas regiões, utiliza-se a mesma ferramenta de geoprocessamento para sobrepor os mapas de tipo de solo e de uso do solo (ou cobertura vegetal) resultando o mapa das CRHs.

3.6.2.2 *Equacionamento do modelo*

O modelo inclui os processos de balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. A evapotranspiração é calculada pela equação de Penman-Monteith. O balanço hídrico vertical no solo é realizado considerando as características das classes de respostas hidrológicas e os parâmetros definidos, com intervalo de tempo adotado é de 1 dia:

$$W_2 = W + P - T - D_{SUP} - D_{BAS} + D_{cap} \quad (1),$$

onde: W_2 é o armazenamento na camada de solo ao final do intervalo de tempo (mm), W é o armazenamento na camada de solo ao início do intervalo do tempo (mm), P é a precipitação incidente menos a interceptação ao longo do intervalo do tempo (mm), T é a evapotranspiração da água da camada de solo ao longo do intervalo de tempo (mm), D_{SUP} é o escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo, drenagem rápida (mm), D_{INT} é o escoamento sub-superficial ao longo do intervalo de tempo, drenagem lenta (mm), D_{BAS} é o escoamento subterrâneo ao longo do intervalo de tempo, drenagem muito lenta (mm), D_{CAP} é o fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo (mm).

Os escoamentos passam por reservatórios conceituais sofrendo retardo e amortecimento dentro de cada minibacia. Essa representação matemática emprega a equação de reservatório linear simples. Cada escoamento vai para o respectivo reservatório, ocorrendo ali o somatório dos escoamentos referentes às classes de

resposta hidrológica de toda a minibacia. Os equacionamentos são detalhados em Collischonn et al. (2007).

A propagação das vazões na rede de drenagem é realizada pelo modelo inercial implementado no MGB-IPH por Pontes et al. (2015). A representação matemática é realizada pela simplificação do conjunto de equações de Saint-Venant formado pela equação da continuidade e dinâmica, respectivamente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2),$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (3),$$

onde: Q é a vazão (m^3s^{-1}), A é a área da seção transversal ao escoamento (m^2), x é a distância no sentido longitudinal (m), t é o tempo (s), h é a profundidade do rio (m), S_0 é a declividade do fundo do rio ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$), S_f é a perda de energia por atrito com o fundo e as margens ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$), g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}).

A aproximação inercial despreza o segundo termo da equação dinâmica que representa a inércia advectiva, obtendo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (4),$$

O valor de S_f pode ser estimado pela equação empírica de Manning e a seção transversal de rios naturais pode ser simplificada pela representação de uma calha retangular, cuja largura e profundidade podem ser estimadas com base na área de drenagem por equações como:

$$X = a \cdot A^b \quad (5),$$

onde X é largura ou profundidade (m), A é a área de drenagem (km^2) e, a e b são coeficientes das relações geomorfológicas.

Admitindo que rios naturais, em geral, possuem sua largura muito maior que a profundidade da sua calha, é possível aproximar o raio hidráulico pela profundidade. Assim, a equação empregada no MGB-IPH é:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gBh \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{|Q|Qn^2}{h^{7/3}} = 0 \quad (6),$$

onde: B é largura da calha (m) e n : coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional). Enquanto que a equação da continuidade é reescrita por:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (7),$$

sendo: V o volume de água no trecho do rio (m^3), Q_{in} as vazões que entram nesse trecho incluindo as vazões das minibacias a montante e a vazão gerada na própria minibacia (m^3s^{-1}) e Q_{out} as vazões que saem do trecho de rio (m^3s^{-1}), ou seja, a vazão que escoar para jusante contabilizando eventuais perdas por evaporação.

A propagação unidimensional em redes de rio pelo modelo inercial apresenta resultados similares ao comparar com a solução completa das equações de Saint-Venant (Fan et al., 2014b). O modelo inercial apresenta vantagem em relação a métodos mais simplificados, pois é capaz de representar a propagação das vazões com efeito de jusante e armazenamento nas planícies de inundação (Paiva, 2009).

A inclusão da influência do vento no algoritmo inercial de propagação de vazões do MGB-IPH foi proposta por Lopes (2017). A introdução da força de atrito provocada pelo vento ocorre na equação dinâmica do método inercial:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gBh \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{|Q|Qn^2}{h^{7/3}} - BC_D|U|U = 0 \quad (8),$$

onde: CD é o coeficiente adimensional de atrito do vento considerado a combinação da densidade do ar e do coeficiente de arraste do vento, U é a velocidade do na direção do escoamento, sendo que valores positivos de U tem sentido contrário ao escoamento e valores negativos a favor do mesmo.

3.6.2.3 *Dados de entrada necessários*

Os dados de entrada requeridos pelo modelo consistem em dados climáticos provenientes de normal climatológica e séries históricas de pluviometria e fluviometria. Os dados das estações de monitoramento são interpolados espacialmente pelo método do inverso da distância ao quadrado considerando o centroide de cada minibacia (Pontes et al., 2015).

3.7 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme discutido ao longo desta revisão, a ocorrência de desastres é inevitável ao considerar a proximidade entre o ser humano e o fenômeno natural. Para apoiar no planejamento territorial dos municípios e minimizar os impactos associados aos desastres podem ser elaboradas medidas não-estruturais com o auxílio de modelos computacionais capazes de delimitar as áreas sujeitas à inundações.

Os dados sobre eventos de cheia provenientes de rede hidrometeorológica possuem incertezas e/ou podem ser escassos. Isto limita a compreensão dos eventos hidrológicos extremos de máxima, bem como dificulta a compreensão do comportamento da bacia hidrográfica mediante a ocorrência desses eventos. Portanto, registros provenientes de observações humanas e/ou de evidências físicas podem complementar os dados provenientes das estações de monitoramento.

Nessa linha, empregando dados de diferentes tipos de registros de eventos hidrológicos extremos de máxima ocorridos no passado e o uso de modelos computacionais podem ser realizados estudos de reconstrução de eventos passados. O estudo pode contemplar: apenas a reconstrução hidrodinâmica (Remo e Pinter, 2007); a reconstrução hidrodinâmica e hidrológica, nessa ordem (Balasch et al., 2010a), ou na ordem inversa (Ribeiro Neto et al., 2015), ou ainda, reconstrução hidrodinâmica e hidrológica e meteorológica (Barriendos et al. 2014).

Estudos de reconstrução são geralmente realizados para eventos excepcionais nas séries históricas de algum local. Isso se deve, principalmente, aos registros históricos da população afetadas pelo evento de proporções superiores a outros já ocorridos no local. E, também, estão associados às informações que podem ser extraídas desses eventos extremos.

Os resultados desses estudos possibilitam ampliar a compreensão sobre o evento e do comportamento hidrológico e hidrodinâmico da bacia hidrográfica na ocorrência de inundações. Com base dessas informações, é possível embasar análises de risco, elaborar planos de alerta e políticas de mitigação de risco, dentre outras ferramentas que apoiam a gestão de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica (Bürger et al. 2006; Remo e Pinter, 2007, Sudhaus et al., 2008; Masoero et al., 2013; Segura-Beltrán et al, 2016; Fortunato et al., 2017; Velásquez et al., 2018).

A partir da revisão bibliográfica foi possível identificar que no Brasil existem poucos estudos de reconstrução de inundações históricas. Tendo em vista que as estações de monitoramento começaram a ser instaladas no Brasil no início do século XX, esses estudos cujas informações são complementadas com registros históricos e/ou evidências físicas podem contribuir para compreensão de eventos hidrológicos extremos de máxima, inclusive podendo auxiliar na estimativa dos períodos de retorno desses eventos excepcionais.

Grande parte dos estudos identificados na revisão bibliográfica apontam para o uso de modelos desacoplados, em geral, o modelo hidrodinâmico HEC-RAS seguido

pelo modelo hidrológico HEC-HMS. Pelas limitações do modelo, a reconstrução hidrodinâmica realizadas nos estudos revisados foram realizadas para trechos do rio. Sendo assim, a aplicação de um único modelo capaz de representar os processos hidrológicos e hidrodinâmicos pode representar vantagem em relação aos demais estudos já realizados.

O modelo MGB-IPH, com o equacionamento descrito no item 3.6.2, demonstra ser uma alternativa viável para execução do estudo proposto. Além de estar apto para simular o armazenamento em planícies de inundação, computa os efeitos de jusante e ainda inclui a influência do vento sobre o escoamento do rio. Ressalta-se, ainda, como uma de suas vantagens, o acoplamento dos módulos hidrológico e hidrodinâmico facilitando os processos iterativos necessários para reconstrução de eventos. Outra vantagem é de ser capaz de simular toda a extensão da bacia hidrográfica tanto para o modelo hidrológico como para o hidrodinâmico.

Considerando a relevância dos desastres hidrológicos já ocorridos no Brasil, sugere-se o estudo de reconstrução hidrológica e hidrodinâmica de um desses eventos de proporções significativas. Para isso, foi selecionado um estudo de caso localizado em um área com particularidades e elaborada uma proposta baseada nas metodologias existentes. A área de estudo é detalhada no capítulo 4.

4 METODOLOGIA

O presente estudo de reconstrução hidrológica e hidrodinâmica de eventos hidrológicos extremos de máxima foi dividido em cinco etapas: (i) Investigação das fontes, (ii) Análise dos dados, (iii) Configurações do modelo, (iv) Reconstrução hidrológica, e (v) Reconstrução hidrodinâmica. As duas primeiras etapas se referem aos dados e compõem a Fase 1. As demais etapas constituem a Fase 2 e se referem ao uso dos modelos computacionais. É importante salientar que mediante as incertezas dos dados pode ser necessário revisá-los a fim de atingir a representação das áreas inundadas pelo modelo. O diagrama ilustrado na Figura 3 apresenta a visão geral da estratégia metodológica.

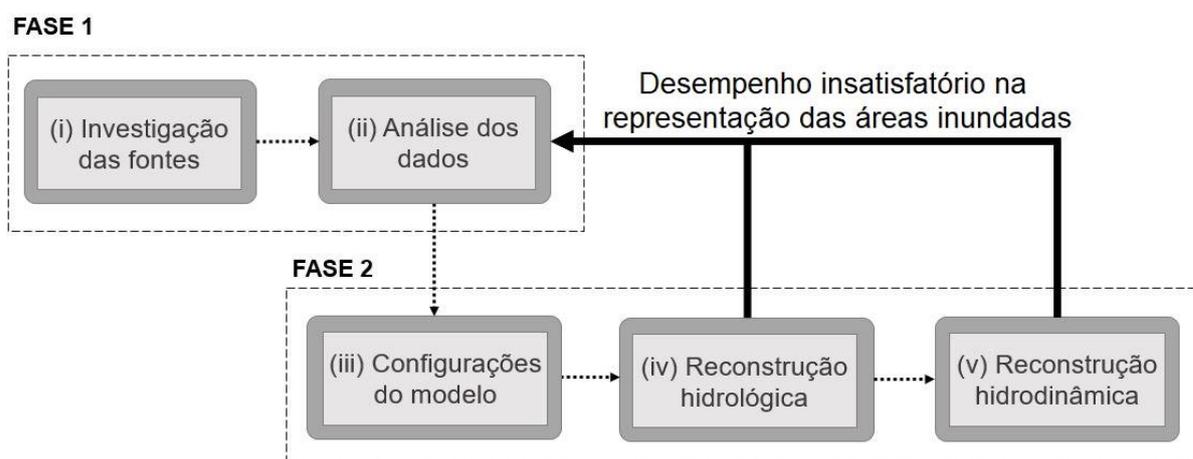


Figura 3 – Estratégia metodológica do presente estudo.

4.1 FASE 1

A etapa (i) Investigação das fontes consiste no levantamento e aquisição de informações sobre a área de estudo e sobre o evento em diferentes fontes de dados: instrumentais (*“instrumental hydrology”*), observações humanas (*“historical hydrology”*) e/ou evidências físicas (*“paleoflood hydrology”*). Para nortear a busca, as variáveis pertinentes ao estudo de reconstrução podem ser elencadas previamente.

Na etapa seguinte, (ii) Análise dos dados, realiza-se a avaliação e verificação dos dados e, se necessário, manipulação dos dados a fim de recuperar o cenário na data do evento. A avaliação crítica das fontes e registros históricos é necessária,

assim como analisar os dados disponíveis (Sudhaus et al. 2008) e se baseia nas seguintes considerações:

- a) A informação deve ser analisada de modo a contribuir na compreensão do evento;
- b) Caso a mesma variável seja disponível em diferentes fontes deve ser realizada a confrontação dos dados;
- c) Caso uma informação não se encontre disponível para o ano do evento, deve ser analisada a representatividade das informações de outros anos e, se possível, realizar a recuperação da informação por meio de ferramentas disponíveis.

Observa-se que a etapa (ii) Análise dos dados pode ser revisitada, caso nas etapas seguintes ocorra falha na avaliação do desempenho. O resultado da Fase 1 consiste na criação de um acervo dos dados organizados e disponíveis em uma única plataforma, como preconizado por Barriendos et al. (2014).

4.2 FASE 2

O presente estudo propôs o uso de apenas um modelo computacional capaz de representar os processos hidrológicos e hidrodinâmicos. Sendo assim, a primeira etapa dessa fase, (iii) Configurações do modelo, consiste em executar os procedimentos inerentes ao modelo hidrológico-hidrodinâmico. Portanto, essa etapa está diretamente relacionada ao modelo selecionado para efetuar a reconstrução do evento.

Após a realização dos procedimentos inerentes ao modelo, foi necessário assegurar que o modelo gera resultados próximos à realidade. Para isso, foi realizada a calibração que consiste em um processo iterativo, manual ou por algoritmos de otimização, para o ajuste dos valores dos parâmetros a fim de obter a melhor combinação entre as previsões do modelo e as observações disponíveis (Beven, 2001). Em seguida, aplicou-se esse conjunto de valores dos parâmetros em outro período na mesma área de estudo a fim de comparar com os dados observados e validar a qualidade da resposta para uma situação diferente da simulada durante a calibração.

Deve-se ressaltar que não existe um único conjunto de parâmetros capaz de representar todos os processos hidrológicos, pois conforme Bravo et al. (2009) na

modelagem hidrológica existem incertezas nos dados, nas simplificações do modelo e na representatividade dos valores dos parâmetros. Além disso, Beven (2001) aborda as inconsistências nos dados observados disponíveis, tais como as chuvas medidas e as vazões geradas pelas curvas-chave, de modo que se deve atentar ao uso de dados inconsistentes ou questionáveis, pois podem resultar em estimativas tendenciosas dos valores dos parâmetros.

A calibração e a validação do modelo hidrológico leva em consideração as áreas de contribuição da área de estudo. A série histórica dos dados deve ser dividida em dois períodos, de modo que o ano do evento em estudo não integre o período empregado para calibração do modelo hidrológico. Além de realizar a validação para o período selecionado, foi realizada a validação por eventos para demonstrar a capacidade de representação de inundações. Para cada área de contribuição, foram elencados os dez maiores picos de vazão no período selecionado para validação, desprezando o ano do evento de estudo. A comparação entre os valores observados e simulados foi realizada por meio de visualização dos hidrogramas e da aplicação de análises estatísticas e classificação de desempenho, descritas com detalhamento no subitem a seguir. A Figura 4 apresenta a estratégia metodológica proposta para reconstrução hidrológica de eventos. As análises estatísticas e os valores assumidos na classificação de desempenho mencionados no fluxograma são discutidos no item 4.2.1.

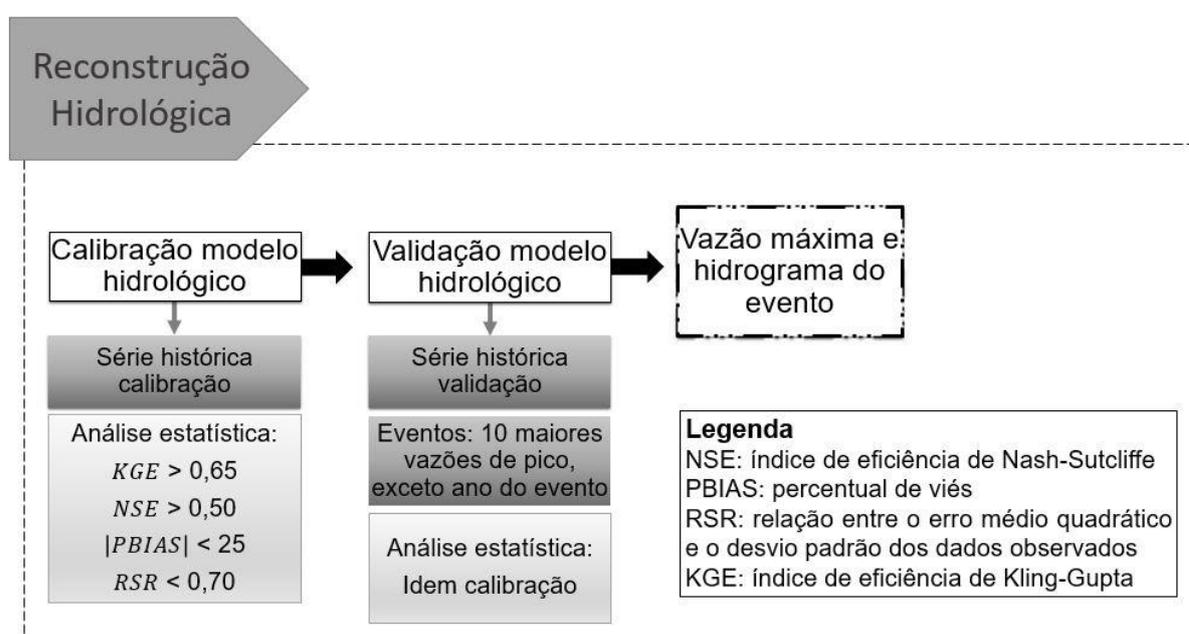


Figura 4 – Metodologia para Reconstrução hidrológica de evento.

O modelo calibrado e validado possibilita realizar a reconstrução hidrológica antes da reconstrução hidrodinâmica. Isso se deve, principalmente, à existência de séries históricas de precipitações e vazões. Assim, diferente da proposta de Balasch et al. (2010a), a simulação hidrológica antecede a hidrodinâmica, resultando na estimativa da vazão máxima e do hidrograma do evento de 1974.

Dessa forma, obtém-se a condição de contorno de montante do modelo hidrodinâmico para iniciar a (v) Reconstrução hidrodinâmica. Essa etapa se refere a propagação dessas vazões ao longo do curso da água e na planície de inundação, caso ocorra o extravasamento da calha.

Considerando a influência a jusante, devem ser incluídas no modelo hidrodinâmico as condições de contorno de jusante. No entanto, os valores dessas variáveis na data do evento são desconhecidos. Assim, em um processo iterativo, cenários hipotéticos dos valores da condição de contorno de jusante podem ser simulados a fim de obter áreas inundadas similares aos registros do evento de estudo.

Inicialmente, avaliou-se a influência da condição de contorno de montante sobre a geração de áreas inundadas. Em seguida, foram criados cenários hipotéticos com diferentes valores para as condições de contorno a jusante. O desempenho dos resultados simulados foi mensurado pela compatibilidade com os dados de áreas inundadas disponíveis, denominados dados de referência, conforme descrito no item 4.2.2.

Caso não se obtenha desempenho satisfatório na representação das áreas sujeitas à inundação somente alterando o valor da condição de jusante, a metodologia propõe que os dados coletados e analisados na Fase 1 sejam novamente avaliados. Dessa forma, podem ser sugeridas hipóteses que alterem a condição de contorno ou as condições hidráulicas, por exemplo.

Espera-se que os resultados dos cenários hipotéticos possam indicar os fatores de influência do evento e estimar seus valores com ocorrência provável. A Figura 5 ilustra a estratégia metodológica proposta para reconstrução hidrodinâmica de eventos hidrológicos extremos de máxima.

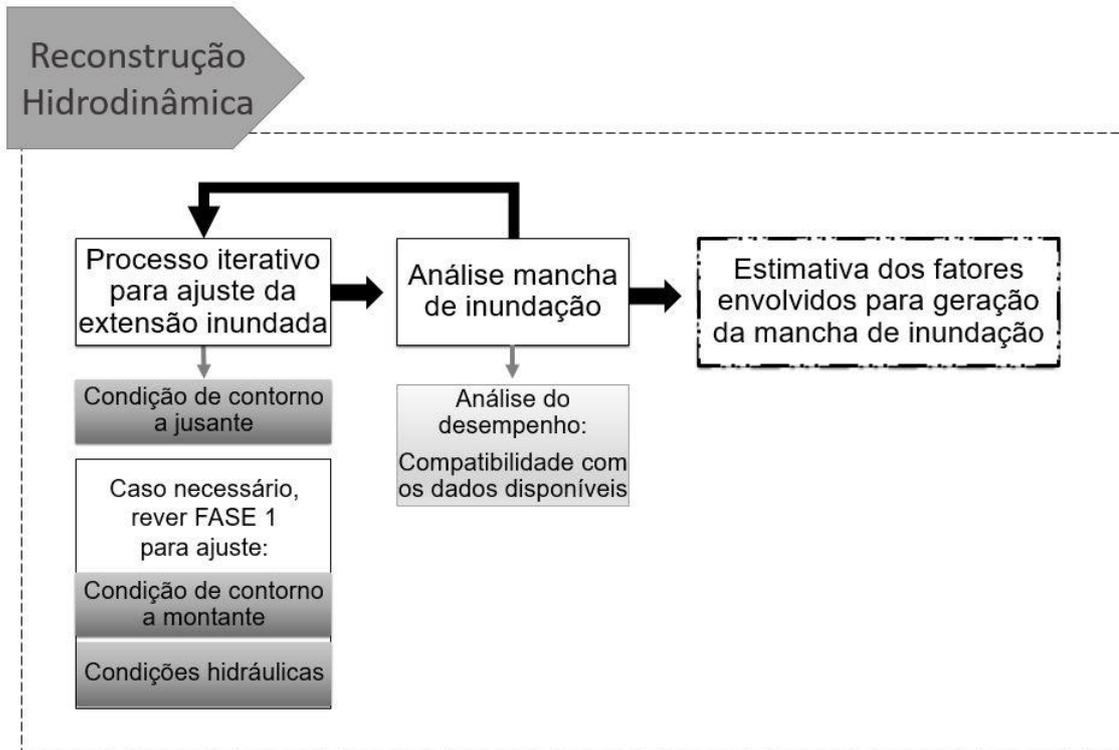


Figura 5 - Metodologia para reconstrução hidrodinâmica de evento.

As metodologias propostas nesse item foram apresentadas de forma genérica a fim de viabilizar a sua aplicação em outros estudos.

4.2.1 Análise de desempenho do modelo hidrológico

Para a análise comparativa entre os valores observados e os resultados do modelo hidrológico foi necessário aplicar estatísticas de desempenho. A escolha se embasou nos critérios que se desejava avaliar. Assim, optou-se pelo uso de quatro estatísticas, cujas equações são descritas a seguir: índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), percentual de viés (PBIAS), relação entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados (RSR), e índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE), apresentadas respectivamente:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_{Med})^2} \quad (9),$$

$$PBIAS = \frac{\sum (QO_i - QC_i)}{\sum QO_i} \cdot 100 \quad (10),$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (QO_i - QC_i)^2}}{\sqrt{\sum (QO_i - QO_{Med})^2}} \quad (11),$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (12),$$

$$r = \frac{\sum((QO_i - QO_{Med}) \cdot (QC_i - QC_{Med}))}{\sqrt{\sum(QO_i - QO_{Med})^2} \cdot \sqrt{\sum(QC_i - QC_{Med})^2}} \quad (13),$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \quad (14),$$

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} \quad (15),$$

onde: QC_i é a vazão simulada (m^3s^{-1}), QO_i é a vazão observada (m^3s^{-1}), QO_{Med} é a média das vazões observadas (m^3s^{-1}), QC_{Med} é a média das vazões simuladas (m^3s^{-1}), r é o coeficiente de correlação linear de Pearson entre vazão simulada e observada, α é a relação de variabilidade, β é a relação média, σ_{sim} é o desvio padrão das vazões simuladas, σ_{obs} é o desvio padrão das vazões observadas, μ_{sim} é a média das vazões simuladas e μ_{obs} é a média das vazões observadas.

A primeira estatística, NSE, é adimensional e mensura a magnitude relativa da variância residual (“ruído”) em relação a variância dos observados (“informação”) de modo que 1 é o valor ótimo (Nash e Sutcliffe, 1970). A segunda estatística, PBIAS, é expressa em porcentagem e mede a tendência média dos simulados serem maiores ou menores do que os observados. O valor ideal dessa estatística é 0, sendo que valores positivos indicam viés de subestimativa do modelo e valores negativos, superestimativa do modelo (Gupta et al., 1999). Já o RSR consiste em padronizar o erro quadrático médio usando o desvio padrão das observações de modo que incorpora os benefícios das estatísticas de índices de erros e inclui um fator de normalização (Moriasi et al., 2007). Quanto menor o valor do RSR, melhor o desempenho da simulação.

Por fim, o KGE, adimensional, apresenta valor ideal igual a 1 e analisa o desempenho do modelo usando mais componentes: correlação, variabilidade e viés (Gupta et al. 2009). Essa estatística é mais indicada para analisar desempenho para vazões máximas do que NSE, principalmente porque os resultados do NSE subestimam a variabilidade das vazões observadas (Mizukami et al., 2018).

Para qualificar o desempenho do modelo foi empregada a classificação apresentada na Tabela 1 que se baseia na proposta de Moriasi et al. (2007), com inclusão do KGE com mesmas faixas que o NSE.

Tabela 1 – Classificação de desempenho para modelo hidrológico.

Desempenho	KGE	NSE
Muito bom (Mb)	$0,75 < KGE \leq 1,00$	$0,75 < NSE \leq 1,00$
Bom (B)	$0,65 < KGE \leq 0,75$	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfatório (S)	$0,50 < KGE \leq 0,65$	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfatório (I)	$KGE \leq 0,50$	$NSE \leq 0,50$
Desempenho	PBIAS	RSR
Muito bom (Mb)	$ PBIAS < 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
Bom (B)	$10 \leq PBIAS < 15$	$0,50 < RSR \leq 0,60$
Satisfatório (S)	$15 \leq PBIAS < 25$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
Insatisfatório (I)	$ PBIAS \geq 25$	$RSR > 0,70$

Fonte: Modificado de Moriasi et al., (2007).

4.2.2 Análise de desempenho do modelo hidrodinâmico

Para analisar o desempenho dos resultados da simulação hidrodinâmica foi necessário mensurar o ajuste entre os resultados simulados e os dados disponíveis sobre áreas inundadas. Para isso, foi aplicada a medida proposta por Horritt et al. (2007) denominada $F^{(2)}$ que analisa a compatibilidade entre os dados observados e os resultados simulados, penalizando os modelos que superestimam as áreas inundadas significativamente:

$$F^{(2)} = \frac{A-B}{A+B+C} \quad (16),$$

onde: A é a área inundada simulada compatível com os dados observados disponíveis, B é a área inundada no modelo, porém não inundada nos dados observados, indicando superestimativa e C é a área não inundada na simulação, mas inundada nos dados observados, apontando a subestimativa do modelo hidrodinâmico.

4.2.3 Formulação dos cenários

O presente item apresenta um breve resumo de sugestões dos critérios adotados para formulação dos cenários hipotéticos para reconstrução hidrodinâmica. Para exemplificar, leva-se em consideração o objeto de estudo dessa pesquisa.

Para definição dos cenários hipotéticos para estimar as áreas inundadas foi levado em conta a representação dos processos hidrológicos e hidrodinâmicos de modo integrado pelo modelo. A partir da entrada dos registros de precipitação no

modelo se obtém a condição de contorno a montante que se refere ao hidrograma do evento, resultado da reconstrução hidrológica. Assim, inicialmente, supõe-se que essa condição é conhecida. Dessa forma, a metodologia proposta sugere que as condições de contorno de jusante sejam alteradas em um processo iterativo até obter melhor compatibilidade com os dados de referência. A escolha das variáveis que representam a condição de jusante depende de cada bacia hidrográfica em estudo.

No presente estudo, a localização da bacia hidrográfica na zona costeira denota a influência das marés no escoamento do Rio Tubarão. Dessa forma, a primeira tentativa para geração das áreas inundadas do evento de 1974 propôs analisar iterativamente diferentes alturas de maré como condição de jusante. Os valores testados foram estimados com base em alturas de marés descritas na literatura.

Além disso, os registros históricos apontaram a presença do vento que poderia atuar como condição de contorno a jusante conjuntamente com a altura da maré. Os valores testados foram baseados na escala de Beaufort. Considerando a proximidade da bacia hidrográfica com o Oceano Atlântico, a estimativa dos ventos foi realizada com base na escala Beaufort (Quadro 1) elaborada por Sir Francis Beaufort em 1805 (NCDC/NOAA, 2018), onde as velocidades dos ventos são associadas a efeitos no solo e na água. Ao representar conjuntamente altura de maré e vento, foi possível uma melhor representação da influência do vento no ambiente oceânico, afetando indiretamente nas alturas da maré, visto que essa região não foi contemplada na simulação.

Após a realização de cada cenário foram analisadas as estatísticas de desempenho em relação a compatibilidade com os pontos de referência, conforme equação 16 do item 5.2.2. Verificando-se que os cenários testados não resultaram em áreas inundadas compatíveis com os dados de referência, a etapa (ii) Análise dos dados pode ser revisitada de modo que outros testes possam ser realizados a fim de obter resultados de área inundada com melhor desempenho de simulação.

Considerando que os testes levando em consideração as condições de jusante foram esgotadas, pode ser sugerida a alteração da condição de contorno de montante e/ou das condições hidráulicas. Os registros históricos podem contribuir para a formulação das hipóteses.

Quadro 1 – Escala Beaufort e aspecto do mar

Grau	Designação	Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	Aspecto do mar
0	Calmo	$v < 0,3$	Superfície do mar espelhada
1	Aragem	$0,3 \geq v \leq 1,5$	Pequenas ondulações na superfície do mar
2	Brisa leve	$1,6 \geq v \leq 3,3$	Ligeira ondulação com alturas até 0,20 m, sem rebentação
3	Brisa fraca	$3,4 \geq v \leq 5,4$	Ondulação com altura até 0,60 m
4	Brisa moderada	$5,5 \geq v \leq 7,9$	Ondulação com altura até 1,00 m
5	Brisa forte	$8,0 \geq v \leq 10,7$	Ondulação com altura até 1,80 m, com cristas
6	Vento fresco	$10,8 \geq v \leq 13,8$	Ondas com altura até 3,00 m
7	Vento forte	$13,9 \geq v \leq 17,1$	Mar revolto, ondas com altura até 4,00 m
8	Ventania	$17,2 \geq v \leq 20,7$	Mar revolto, ondas com altura até 5,50 m
9	Ventania forte	$20,8 \geq v \leq 24,4$	Mar revolto, ondas com altura até 7,00 m
10	Tempestade	$24,5 \geq v \leq 28,4$	Mar revolto, ondas com altura até 9,00 m
11	Tempestade violenta	$28,5 \geq v \leq 32,6$	Mar revolto, ondas com altura até 11,00 m
12	Furacão	$v \geq 32,7$	Mar todo de espuma, ondas com altura até 14,00 m e visibilidade nula

O detalhamento sobre os cenários propostos no presente estudo e os resultados obtidos são apresentados e discutidos no item 6.5.

5 OBJETO DE ESTUDO: EVENTO DE 1974 EM TUBARÃO, SC

A Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar, é uma das oito bacias hidrográficas com registros de desastres acima da média no estado de Santa Catarina, região sul do Brasil (Tasca et al., 2017). Localizada no sul do estado de Santa Catarina, essa bacia possui área de aproximadamente 5.700 km² e é composta pelas sub-bacias: Formadores do Rio Tubarão, Rio Braço do Norte, Rio Capivari, Baixo Tubarão e Rio D'Una (Figura 6). O município de Tubarão, inserido na sub-bacia Baixo Tubarão, possui área de 301,75 km² (IBGE, 2017b) e população estimada de 104.937 habitantes (IBGE, 2018). O Rio Tubarão, que atravessa o município homônimo, nasce nas encostas da Serra Geral e percorre cerca de 120 km até desembocar na sua foz, a Lagoa de Santo Antônio. Seus principais tributários são os rios Braço do Norte e Capivari. A foz do Rio Tubarão, a Lagoa Santo Antônio, se localiza na sub-bacia do Rio D'Una.

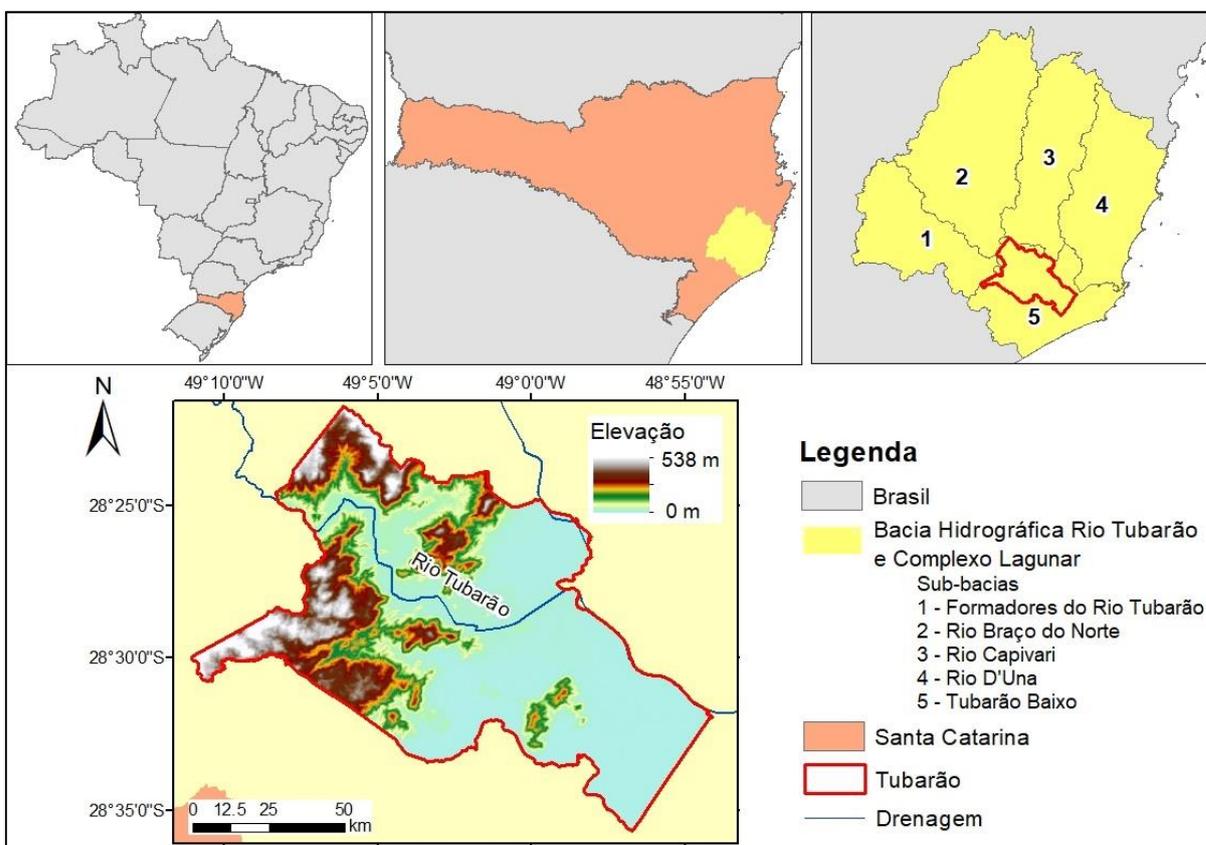


Figura 6 – Unidades territoriais que a área de estudo se insere.

A localização da bacia hidrográfica entre a Serra Geral e a zona costeira representa um sistema com particularidades que a tornam uma área de estudo

relevante. As altas declividades que ocorrem a montante contribuem para uma rápida transformação da precipitação em escoamento, enquanto que, a jusante, o efeito de remanso decorrente das marés e, até mesmo dos ventos, podem retardar o escoamento até a foz. Estudos realizados por técnicos do CEMADEN (2017) demonstram que a maré agravou as ocorrências hidrológicas em municípios costeiros. Entretanto, apesar de relevante, o controle da altura de marés não integra o sistema de monitoramento e alerta de Tubarão.

Existem relatos de inundações no município de Tubarão datados desde o século XIX (Machado, 2005). De acordo com Marques (2010), esse fato se deve à pequena declividade da bacia sedimentar do Rio Tubarão e sua localização a poucos metros acima do nível do mar de modo a receber as contribuições das regiões com maior altitude repercutindo em inundações bruscas. Conforme Vettoretti (1992), eventos de proporções significativas ocorrem pela concomitância entre as precipitações intensas em decorrência do efeito orográfico da formação Serra Geral acompanhadas do vento com predominância na direção leste.

De acordo com Bigarella et al. (1975), as Bacias Hidrográficas de Tubarão e Araranguá, região sul de Santa Catarina, foram afetadas por precipitações intensas durante os dias 23 a 25/03/1974 que repercutiram em inundações e movimentos de massa. Os autores destacam os impactos no município de Tubarão, localizado na planície da bacia hidrográfica, que ficou parcialmente inundado. O número registrado no Cartório de Registro Civil de Tubarão é de 49 óbitos com causa relacionada diretamente a inundação (Machado, 2005). Entretanto, estimam-se 199 mortes em decorrência desse evento (Vettoretti, 1992; 2004), sendo 40 mortes em decorrência de fluxo de detritos (Kobiyama et al., 2015; Marques, 2010).

Ainda nos dias de hoje, nota-se a sensibilização dos tubaronenses quanto ao evento de março de 1974. Apesar de ocorrido há mais de 40 anos, ao fazer menção sobre o assunto é comum ouvir relatos sobre até que altura as águas do Rio Tubarão atingiram e sobre as perdas sofridas por familiares. Alguns registros foram realizados por moradores de Tubarão (Machado, 2005; Vettoretti, 2004; Vettoretti, 1992) apresentando a visão de quem vivenciou o evento (Figura 7).

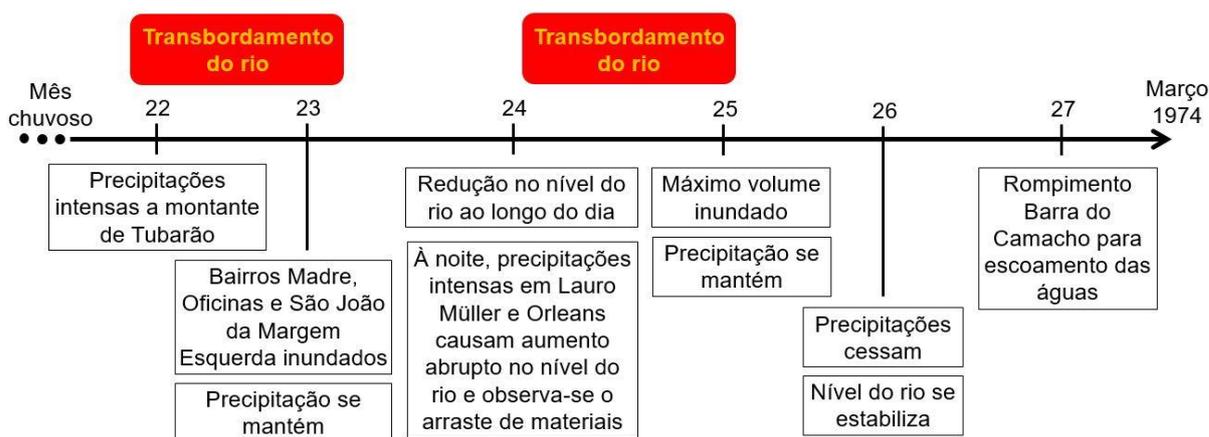


Figura 7 – Linha do tempo diária com os registros provenientes de observações humanas sobre o evento.

Os relatos indicam que no dia 23/03/1974, as áreas próximas à foz do Rio Tubarão na região do bairro Madre, e os bairros Oficinas e São João da Margem Esquerda (Figura 8) já estavam inundados em decorrência de precipitações à montante no dia anterior (Vettoretti, 1992). Segundo depoimentos de moradores, o nível do Rio Tubarão aumentou lentamente e até o 24/03/1974 afetou cerca de 50% da área urbana de Tubarão. Ao longo desse dia, ocorreu redução no nível do Rio Tubarão, de modo que muitas famílias regressaram para suas casas (Vettoretti, 2004; Machado, 2005). Entretanto, à noite, nos municípios localizados a montante, Lauro Müller e Orleans, as precipitações intensas causaram o repentino aumento dos níveis do Rio Tubarão arrastando troncos, casas e entulhos (Vettoretti, 2004; Machado, 2005).

Após o transbordamento no dia 23/03, novamente o Rio Tubarão extravasa entre o dia 24 e 25 atingindo abruptamente as pessoas que haviam retornado para suas casas (Vettoretti, 2004; Machado, 2005). De acordo com Marques (2010), o volume máximo da inundação ocorreu no dia 25/03/1974. No dia 26/03/1974, a precipitação cessou e o nível do rio se manteve estável (Machado, 2005). Para escoamento das  guas foi necessário a a o do Exército. No dia 27/03/1974, utilizando dinamites foi feita uma abertura de cerca de 10 m na Barra do Camacho (Figura 8). Entretanto, a força das águas estendeu essa abertura por cerca de 1 km (Frasson, 2011).

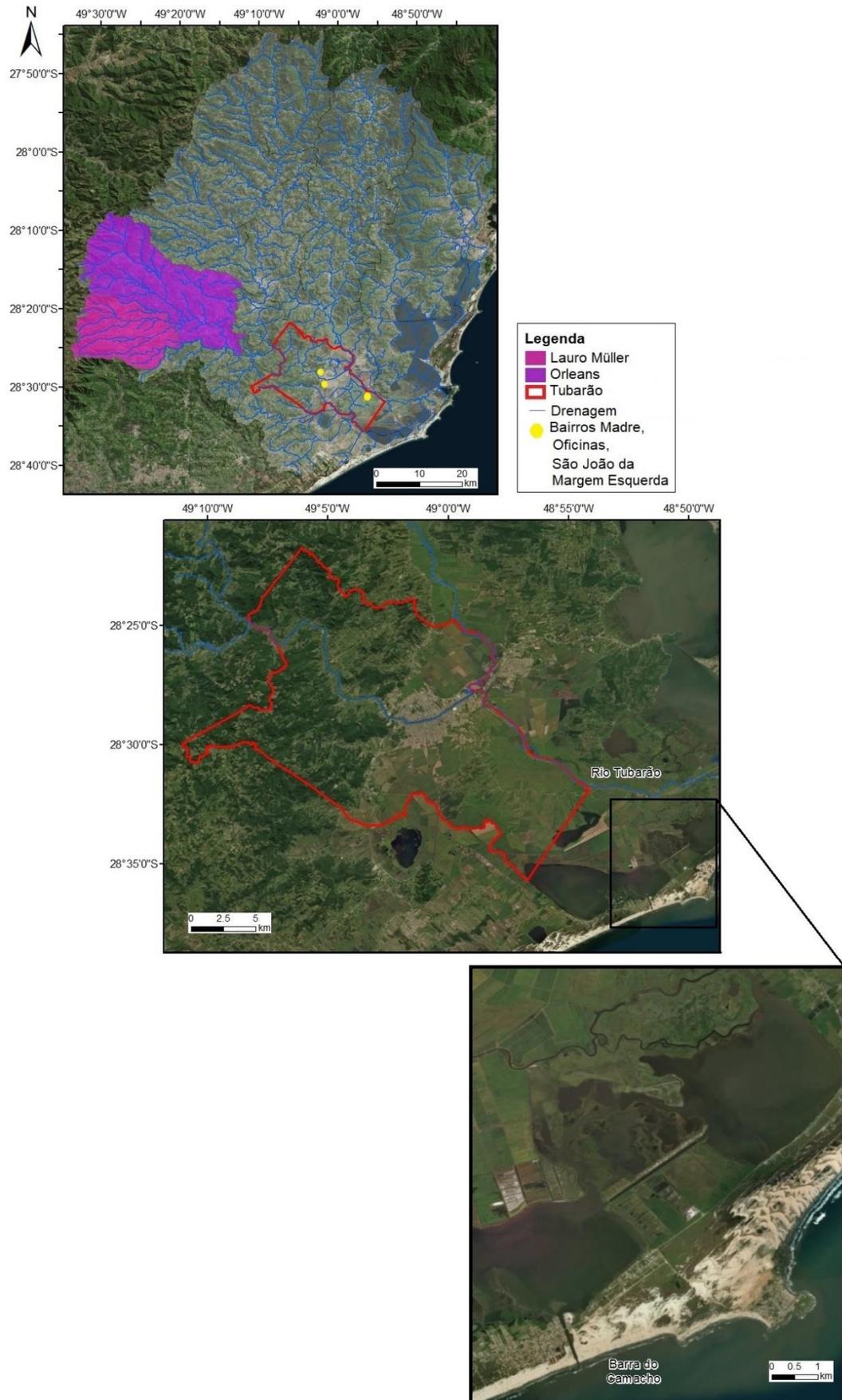


Figura 8 – Municípios Lauro Müller, Orleans, Tubarão e bairros inundados dia 23/04/1974. Detalhe para a Barra do Camacho

De acordo com Bigarella et al. (1975), a planície do Rio Tubarão foi consideravelmente afetada durante a inundação de 1974. Eles sugerem que além da contribuição dos movimentos de massa, uma grande quantidade de sedimentos foi carregada para o rio em virtude da ação intensiva dos escoamentos nas encostas desprotegidas durante as precipitações. Na Figura 9 se observa grande quantidade de lodo, troncos de árvores e entulhos no município de Tubarão.



Figura 9 – Lodo, troncos e entulhos depositados em Tubarão. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal.

Existe um acervo de fotografias e notícias sobre o evento ocorrido em Tubarão. Na Figura 10 se ilustra a imagem emblemática da força das águas do Rio Tubarão, capaz de erguer os trilhos da ferrovia. A manchete veiculada no periódico “O Estado” no dia 27 de março de 1974, Figura 11, refere-se ao drama das cheias e traz a notícia intitulada “Calamidade pública”. Já na Figura 12 é possível observar o nível d’água atingido em um estabelecimento comercial e demonstrado sua localização em relação ao Rio Tubarão, aproximadamente 150 m de sua margem.



Figura 10 – Trilho da ferrovia retorcido pela força das águas do Rio Tubarão. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal.



Figura 11 – Conforme anotação manuscrita, a manchete foi veiculada em 27/03/1974 no periódico “O Estado” e trata sobre a tragédia decorrente da inundação. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal.



(a)



(b)

Figura 12 – (a) Estabelecimento Vinhos Cardeal atingido pela inundação, posteriormente passou a se denominar Vinícola Abramo Silvestre Ltda. Fonte: Patrimônio Histórico Municipal. (b) Local inundado (rosa) localizado aproximadamente 150 m da margem do Rio Tubarão e em verde, a Prefeitura Municipal. Fonte: Google Earth (2017).

Apesar do histórico de inundações no município de Tubarão, as consequências do evento de 1974 o destacam como o mais catastrófico dessa bacia hidrográfica. As proporções desse evento em Tubarão resultaram em prejuízos à economia local e em perdas intangíveis, como vidas perdidas, evasão e gentrificação resultando em modificação das estruturas sociais. Muitos moradores não acreditavam que seria possível recuperar o Município em virtude de tantos danos.

Quase 45 anos após esse desastre hidrológico, os tubaronenses ainda recordam essa tragédia. Desde 2009, um seminário é organizado para relembrar a inundação e a possibilidade de ocorrência de eventos similares é questionada. Apesar das hipóteses existentes, a falta de dados torna incertas as condições que desencadearam sua ocorrência. Sendo assim, um estudo de reconstrução hidrológica e hidrodinâmica da inundação de 1974 pode contribuir para compreender as variáveis envolvidas e suas interações, além de ampliar a compreensão do comportamento da bacia hidrográfica mediante a ocorrência de eventos hidrológicos extremos de máxima. Ao compreender o passado, as informações desse evento podem apoiar o sistema de gestão de desastres e evitar ou minimizar a ocorrência de danos similares.

6 FASE 1: DADOS

Nos itens a seguir são apresentados os resultados de cada uma das etapas da Fase 1 da estratégia metodológica proposta no presente estudo.

6.1 INVESTIGAÇÃO DAS FONTES

A etapa (i) Investigação das fontes consistiu no levantamento e aquisição de informações sobre a área de estudo e sobre o evento em base de dados de órgãos nacionais, tais como, Exército Brasileiro, Marinha do Brasil, Agência Nacional de Águas, em base de dados globais, em registros históricos e em pesquisas precedentes.

Algumas fontes de pesquisa estavam disponíveis em meio eletrônico e a aquisição dos materiais foi realizada gratuitamente. A Tabela 2 apresenta essas fontes catalogadas e o material coletado.

Tabela 2 – Fontes de pesquisa e material coletado.

Fonte de pesquisa	Material
Banco de Dados Geográfico do Exército Brasileiro (BDGEx) < https://bdgex.eb.mil.br/mediador/ >	Cartas topográficas
Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) < http://sigsc.sds.sc.gov.br/download/index.jsp >	Aerofotogrametria – Modelo Digital do Terreno
<i>United States Geological Survey (USGS), Earth Explorer</i> < https://earthexplorer.usgs.gov/ >	Imagens satélite Landsat 8
Agência Nacional de Águas (ANA), Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), base de dados Hidroweb < http://www.snirh.gov.br/hidroweb >	Estações de monitoramento - fluviométrico e pluviométrico
Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) Banco de dados interno do MGB-IPH	Normais climatológicas
Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM) < http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1172&Itemid=543 >	Mapa de tipo de solos do estado de Santa Catarina baseado no levantamento realizado pela Embrapa Solos (2004)
Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil < https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare >	Tábuas de maré
<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), base de dados de reanálise Twentieth-Century Atmospheric Model Ensemble (ERA-20CM)</i> < http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20cm-daily/levtype=sfc/ >	Precipitação proveniente de reanálise climática

Para reconstrução do evento ocorrido no município de Tubarão, registros históricos fornecidos por membros da equipe técnica da Defesa Civil de Tubarão foram consultados. Um dos estudos possui identificação do Ministério do Interior e do Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS) e denomina-se “Estudo global para proteção do vale do Rio Tubarão contra inundações”. Outro estudo foi fornecido, denominado “Análise e simulações do plano proposto para a bacia do Rio Tubarão”. Apesar de não possuir identificação de autoria ou data, o conteúdo indica que esse estudo foi complementar ao outro e ambos foram elaborados com vistas às obras de proteção contra inundações no Baixo Tubarão após a enchente de 1974. Algumas partes desses estudos se encontram ilegíveis, dificultando a compreensão dos dados.

Alguns escritores tubaronenses relataram o evento de 1974 em livros. Machado (2005), Vettoretti (1992; 2004) escreveram narrativas sobre o transcorrer do evento, incluindo a descrição dos locais afetados, além de disponibilizar algumas fotografias e documentos. Em 2011, a enchente de 1974 foi tema de um documentário denominado “Pai Feroz” dirigido por Marcos Blasius, disponível gratuitamente em endereço eletrônico: <<https://www.youtube.com/watch?v=4nVtgIJPg>>, bem como algumas reportagens.

Algumas pesquisas precedentes sobre a área de estudo e sobre o evento também foram empregadas como fontes de materiais e foram referenciadas na etapa (ii) Análise dos dados.

Os resultados obtidos na presente etapa são apresentados no diagrama da Figura 13 que ilustra a fonte de pesquisa utilizada, material coletado e as informações extraídas.

Essa etapa foi essencial para reunir as fontes dos dados sobre o objeto de estudo do presente trabalho. Assim, a organização das fontes viabilizou estruturar o presente estudo e pretende incentivar a elaboração de outras pesquisas que podem ser norteadas por esse acervo, bem como complementá-lo.

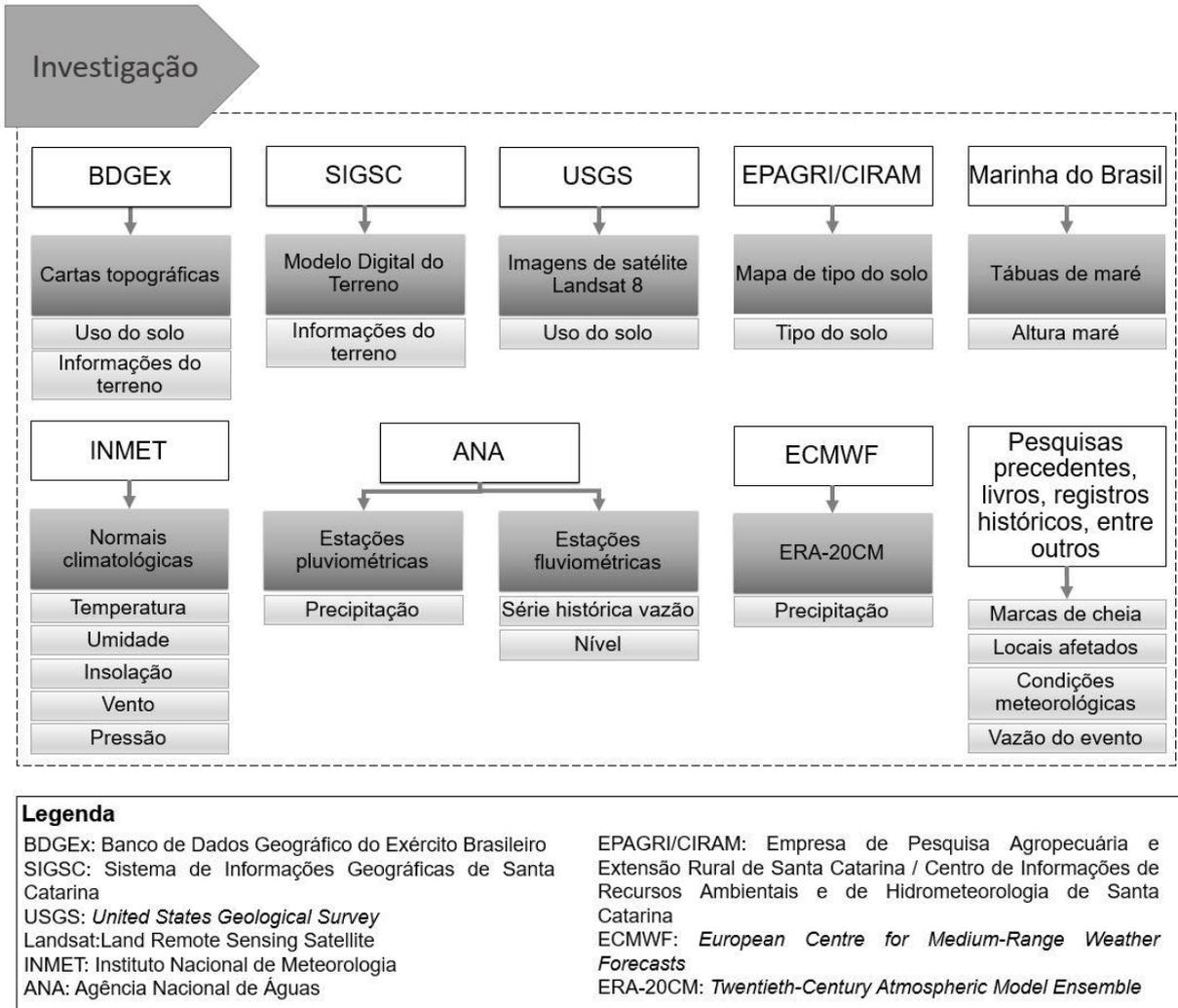


Figura 13 – Resultados obtidos na etapa de Investigação.

6.2 ANÁLISE DOS DADOS

A presente etapa foi essencial para explorar os dados coletados nas fontes disponíveis. A análise crítica dos dados foi recomendada na literatura e proposta na metodologia visando denotar confiabilidade ao uso dos dados do evento. Inicialmente, verificou-se se os dados contribuíam para compreensão do evento. Quando necessário, as diferentes fontes foram confrontadas. Em alguns casos, não foram localizados dados para o ano de 1974, de modo que foi necessário analisar outros anos e realizar a recuperação da informação por meio de ferramentas disponíveis.

Como principais resultados dessa etapa (Figura 14), foi possível recuperar os meandros dos canais retificados do Rio Tubarão e do Rio Capivari, gerando um Modelo Digital do Terreno com características similares à situação na data do evento.

Já quanto ao pico de vazão e ao hidrograma, identificou-se conflito entre as fontes consultadas, reforçando a necessidade da reconstrução hidrológica. Ainda, destaca-se que dados de altura da maré e do vento referente a março de 1974 não foram localizados.

As análises de cada dado coletado são apresentadas com maior detalhamento nos subitens a seguir.

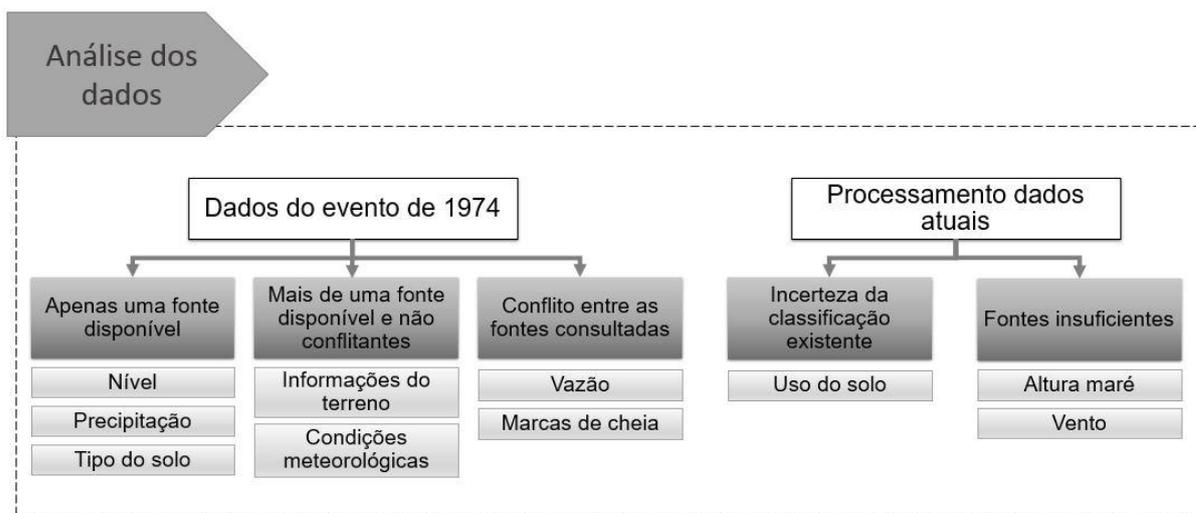


Figura 14 – Resultados obtidos na etapa de Processamento e/ou Recuperação.

6.2.1 Condições meteorológicas

A análise dos processos meteorológicos ocorridos antes e durante a inundação pode contribuir para compreender as precipitações envolvidas no evento. Essa análise tem duas aplicações diretas: estimar a condição de umidade do solo e classificar as inundações de acordo com causas meteorológicas apoiando sistemas de previsão e alerta (Barriendos et al., 2014). O presente estudo não contemplou a reconstrução meteorológica do evento, porém são apresentados resultados de outros estudos que demonstraram uma condição meteorológica diferenciada, denotando particularidades ao evento de 1974.

A precipitação no sul do Brasil é influenciada por diferentes sistemas atmosféricos ao longo do ano: os sistemas frontais, os ciclones, os complexos convectivos de mesoescala, as linhas de instabilidade, os sistemas convectivos alongados persistentes, os vórtices ciclônicos de altos níveis e as circulações de brisa (Reboita et al., 2012). De acordo com Lima et al. (2009), a ocorrência de eventos

hidrológicos extremos de máxima ao longo do ano em municípios de Santa Catarina pode ser atribuída à atuação de forma conjunta de sistemas atmosféricos que mantêm o aporte de umidade nas áreas do litoral.

As condições meteorológicas de março de 1974 na Bacia do Rio Tubarão e Complexo Lagunar foram estudadas por Lima et al. (2009) e Marques (2010). No primeiro trabalho, o objeto de estudo foram os campos atmosféricos obtidos de dados de reanálise disponibilizados por *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), enquanto que no segundo foram utilizadas as cartas sinóticas.

Lima et al. (2009) afirmaram que, nos campos em superfície e de baixos níveis, a circulação anti-horária do sistema de alta pressão na altura do litoral da Argentina e Uruguai e a circulação horária do sistema de baixa pressão com centro no mar entre o litoral de Santa Catarina e sudeste do Brasil formaram uma pista de vento leste no oceano. A umidade do mar foi transportada para o continente pela circulação marítima concentrando-se na bacia em decorrência dos paredões da Serra Geral que atuam como barreiras orográficas, contribuindo para intensificação das chuvas. Eles concluíram que as condições meteorológicas de 1974 foram decorrentes da atuação conjunta do efeito da circulação marítima no litoral, da predominância de ventos na direção leste e do vórtice ciclônico em médios e altos níveis da atmosfera, intensificados pelo efeito orográfico. A direção predominante do vento na costa pode ter contribuído para elevação do nível do Rio Tubarão em 1974 em decorrência do efeito de remanso.

Marques (2010), analisando as cartas sinóticas, identificou uma frente fria estacionária no litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo e a massa polar com centro sobre o litoral sul do Brasil nos dias 22 e 24 com formação de ventos leste. No dia 25 verificou a aproximação de uma nova frente fria e o aumento de intensidade do vento, ocorrendo a melhora do tempo no dia 27 devido à entrada de uma massa polar com deslocamento sobre o continente. O autor atribuiu a precipitação ocorrida no evento pela atuação do vento predominante do quadrante leste resultante de um sistema de alta pressão estacionário na costa catarinense e conjuntamente, a presença de um vórtice ciclônico em média altitude (sistema de baixa pressão).

MCTaggart-Cowan et al. (2006) analisaram bloqueios atmosféricos do tipo dipolo na região sul do Brasil com ênfase em Santa Catarina a partir de dados de reanálise disponibilizados pela base do *National Center for Atmospheric Research Reanalysis* (NNRA) - NCEP do período entre 1971 e 2001. Os autores apontaram que

ao longo desses 30 anos foram identificados seis casos de bloqueios atmosféricos do tipo dipolo que ocorreram nos anos de 1974, 1979 e 1992. Um deles foi entre os dias 18 e 28 de março, período que engloba a data da inundação em Tubarão. O impacto sinótico mais relevante do bloqueio atmosférico tipo dipolo é sua ação como barreira para a migração dos sistemas meteorológicos transientes provenientes de latitudes mais altas (Ambrizzi et al., 2009).

Os estudos precedentes apontam que as condições meteorológicas ocorridas em março de 1974 foram diferenciadas de outros eventos hidrológicos extremos de máximas. Eles apontam que a precipitação foi decorrente da atuação conjunta de sistemas de alta e baixa pressão, predominância do vento leste e ocorrência de efeito orográfico. Além disso, a persistência da condição pode ser atribuída a um bloqueio atmosférico. Assim, pode-se supor que o vento leste predominante pode ter intensificado o efeito de remanso das marés e afetado o escoamento das águas até a foz, bem como sugerir que o solo se encontrava saturado, contribuindo para redução na parcela infiltrada.

6.2.2 Precipitação

Uma variável relevante no processo hidrológico de inundação é a precipitação. Em decorrência dos processos fluviais, a precipitação que ocorre a montante da bacia hidrográfica se transforma em vazão e é propagada pela rede de drenagem. A obtenção dos dados pluviométricos pode ser realizada por estações de monitoramento *in situ*, observações de satélite e, mais recentemente, por reanálise climática.

O levantamento de estações pluviométricas da base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA) resultou em 38 postos com dados na bacia hidrográfica e em seu entorno, dos quais 15 (Tabela 3) apresentam registros para o período do evento e apenas sete estão dentro da área de estudo. A pequena quantidade de estações pluviométricas na bacia hidrográfica na data do evento (Figura 15) pode causar prejuízos na representação das precipitações, principalmente na região das cabeceiras.

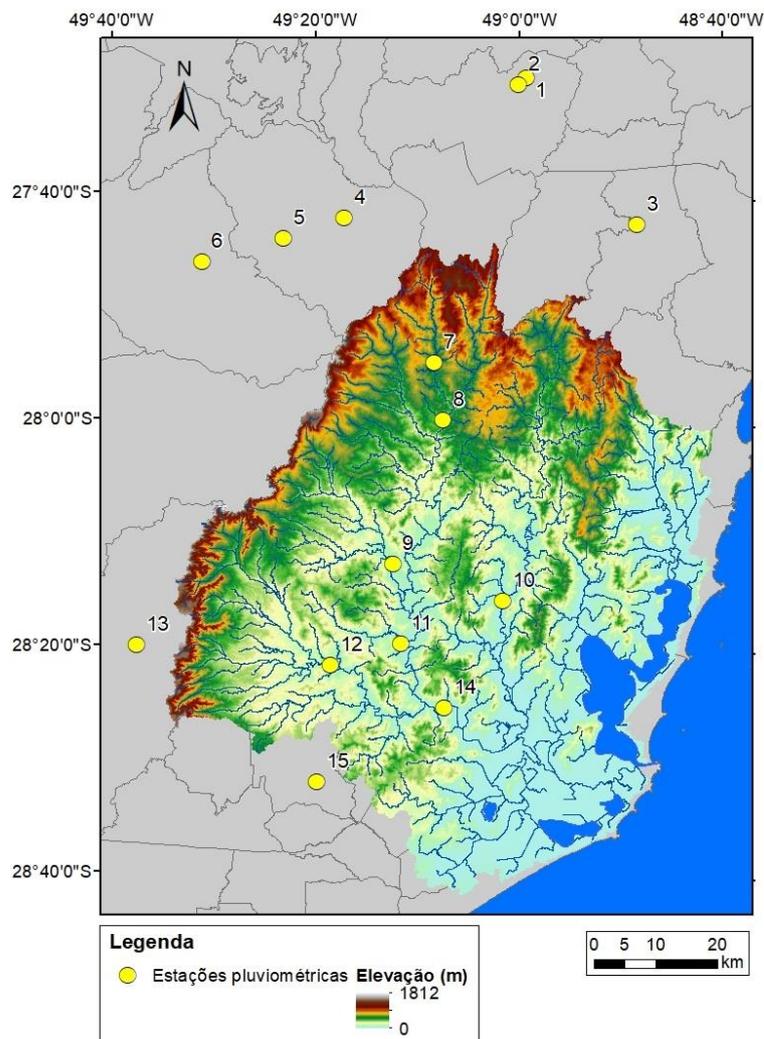


Figura 15 – Estações pluviométricas com dados em março de 1974 identificadas de 1 a 15 inseridas no mapa de relevo da bacia hidrográfica.

Tabela 3 – Estações pluviométricas com dados no ano de 1974.

Código	ID	Nome	Município	Latitude	Longitude
02748003	1	Garcia de Angelina	Angelina	-27,49°	-48,99°
02749019	2	Barragem Sul	Angelina	-27,50°	-49,00°
02748005	3	Poço Fundo	Santo Amaro da Imperatriz	-27,70°	-48,80°
02749014	4	Alfredo Wagner	Alfredo Wagner	-27,42°	-49,17°
02749007	5	Lomba Alta	Alfredo Wagner	-27,73°	-49,38°
02749032	6	Vila Canoas	Bom Retiro	-27,77°	-49,52°
02749027	7	Anitápolis	Anitápolis	-27,91°	-49,13°
02749012	8	Divisa de Anitápolis	Anitápolis	-28,00°	-49,12°
02849008	9	Rio Pequeno	Grão Pará	-28,21°	-49,20°
02848000	10	Armazém Capivari	Armazém	-28,26°	-49,01°
02849002	11	São Ludgero I	São Ludgero	-28,33°	-49,18°
02849001	12	Orleans - Montante	Orleans	-28,36°	-49,29°
02849009	13	Bom Jardim da Serra	Bom Jardim da Serra	-28,34°	-49,62°
02849000	14	Rio do Pouso	Tubarão	-28,42°	-49,11°
02849011	15	Urussanga	Urussanga	-28,53°	-49,31°

A estação pluviométrica código 02849002, localizada em São Ludgero, a montante do município de Tubarão registrou o valor de 205 mm no dia 25/03/1974. Por se tratar de registro feito em pluviômetros, o valor do dia da leitura inclui parte da precipitação ocorrida no dia anterior (ANA, 2014). Já no município de Tubarão, o registro na estação pluviométrica código 02849000, para o dia 25/03/1974 foi de apenas 15 mm.

Com base nas estações pluviométricas com registro de precipitação durante o evento, foi realizada a interpolação espacial pelo método da distância ao quadrado. A precipitação acumulada entre os dias 22 e 26 de março de 1974 indicou um valor máximo de aproximadamente 485 mm. Considerando a área de contribuição a montante do Rio Tubarão, identificou-se a ocorrência de precipitação com valor acumulado superior a 400 mm em uma área de aproximadamente 75 km² (Figura 16).

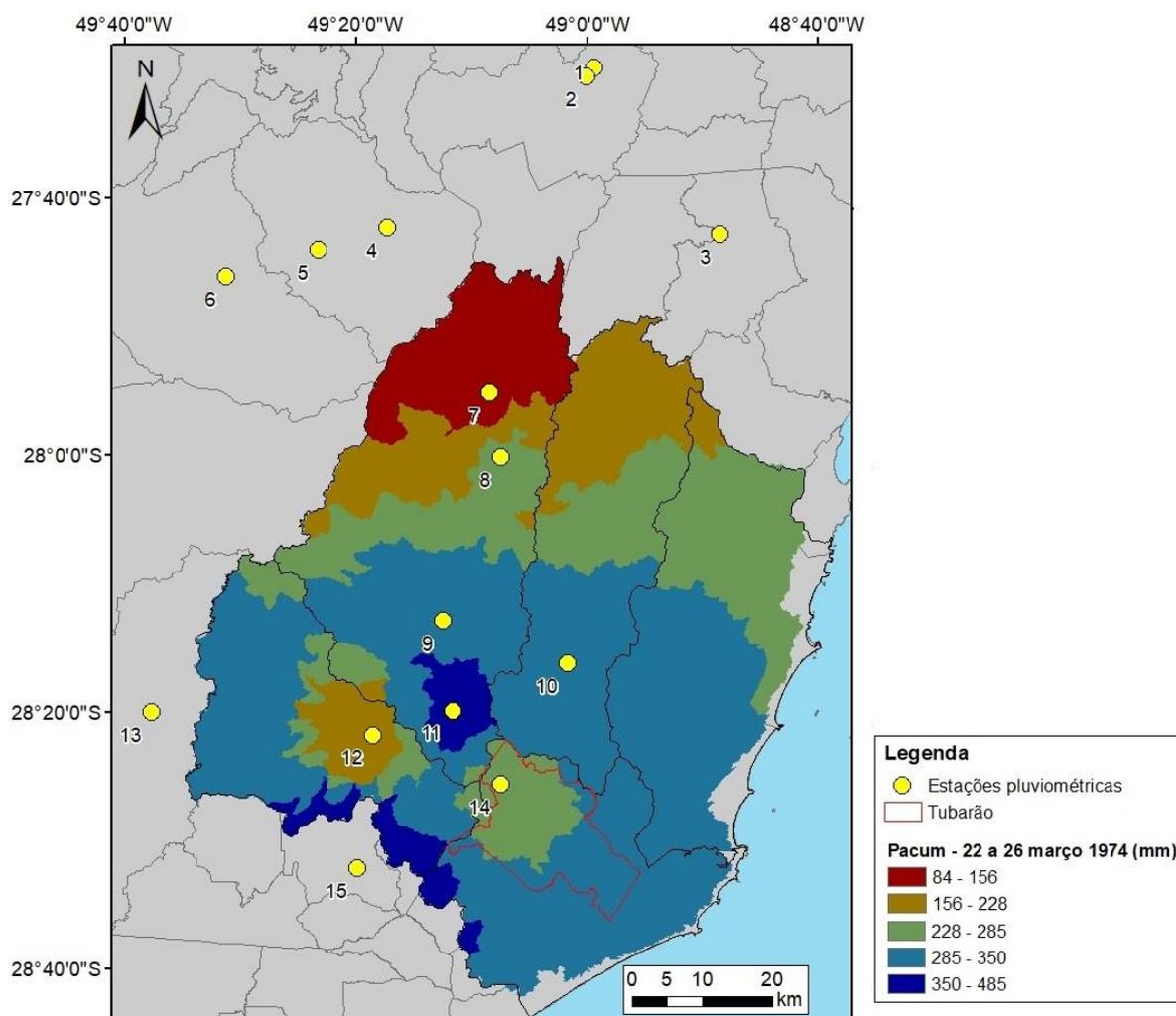


Figura 16 – Estações pluviométricas com dados em março de 1974 identificadas de 1 a 15 conforme indicação na Tabela 3 e precipitação acumulada (Pacum) em mm entre os dias 22 a 26 de março.

Os dados disponíveis indicam uma precipitação concentrada espacialmente. Entretanto, deve-se ressaltar que a quantidade limitada de estações com dados durante o evento pode influenciar esse resultado. A baixa densidade de estações de monitoramento pode afetar a representatividade das precipitações, gerando a subestimativa dos valores. Para complementar os dados disponíveis, outras fontes de dados podem ser avaliadas.

Em estudo sobre a variabilidade das precipitações na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar, Marques (2010) indica a ocorrência de chuva anual acima da média no ano de 1974, destacando o mês de março com registros acima de 500 mm nas estações pluviométricas códigos 02849001 (ID12 - Orleans), 02849000 (ID 14 - Tubarão), 02848000 (ID 10 - Armazém), 02849008 (ID 9 - Grão Pará), 02849002 (ID 11 - São Ludgero), 02749012 (ID 8 - Anitápolis). O total anual precipitado de 1974 para as estações supracitadas foi superado no ano de 1983, porém o volume foi distribuído em um maior número de dias com chuva ao longo do ano (Tabela 4) (Marques, 2010). A ausência de registros de inundações em 1983 no município de Tubarão denotam particularidades ao evento do ano de 1974, principalmente, quanto à condição de saturação do solo.

Tabela 4 – Dados de precipitação total anual anos de 1983 e 1974. Fonte: Marques (2010).

Código	ID	Município	Precipitação total anual (mm)	Precipitação total anual (mm)
			Ano 1983	Ano 1974
02749012	8	Anitápolis	2.655	1.907
02849008	9	Grão Pará	2.203	1.319
02848000	10	Armazém	2.334	1.532
02849002	11	São Ludgero	2.294	1.739
02849001	12	Orleans	2.664	1.423
02849000	14	Tubarão	2.150	1.539

Uma alternativa para complementar os dados de precipitações se trata do uso do sensoriamento remoto para complementar o monitoramento de precipitações, cujo potencial é reconhecido desde a década de 1970 com os satélites geoestacionários (Rast et al., 2014). Entretanto, não foram identificados produtos de sensoriamento com dados para a área de estudo no período de ocorrência do evento.

A terceira fonte de dados pluviométricos é a reanálise climática. O método da reanálise foi desenvolvido nas áreas da meteorologia e oceanografia visando gerar registros coerentes de diversas variáveis por meio da aplicação de modelos climáticos

e técnicas de assimilação de dados (Dee et al., 2014). Sendo assim, os dados de reanálise provenientes da combinação entre modelos atmosféricos, satélites e estações de monitoramento apresentam melhor desempenho do que dados gerados apenas por modelos atmosféricos (Wonchuig et al., 2017).

Dentre as bases de dados de reanálise disponíveis gratuitamente conforme levantamento realizado por Wonchuig et al. (2017) apenas duas contemplam o ano de ocorrência do evento: ERA-20CM (Herbasch et al., 2013) e NOAA V2c (Compo et al. 2011). A base de dados de reanálise da *Twentieth-Century Atmospheric Model Ensemble*, ERA-20CM, desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) foi analisada por Vanelli et al. (2018a) para a Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar para os dados de precipitação do período de 1970 a 1979. Para comparação entre os valores foi calculada a média ponderada em função da área das minibacias para cada uma das séries de dados. No período do evento, entre 22 e 26 de março de 1974, o hietograma (Figura 17) ilustra a subestimativa das máximas dos membros da reanálise em relação aos dados pluviométricos. Analisando ambos os picos, nota-se uma diferença de aproximadamente duas semanas.

Vanelli et al. (2018a) apontam que os dados de precipitação dessa base de dados não apresentaram resultados satisfatórios para a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974. Os autores apontaram que um dos fatores limitantes para a representação dessa variável pode ter sido a base de dados ERA-20CM consistir apenas em modelos atmosféricos. Outro fator apontado pelos autores, refere-se à área da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar ser relativamente pequena em relação aos produtos da reanálise que são gerados em escala global. A escolha dos autores levou em consideração a alta resolução espacial da ERA-20CM em comparação com a base de dados NOAA V2c, logo, os autores empregaram os dados com a melhor resolução espacial disponível.

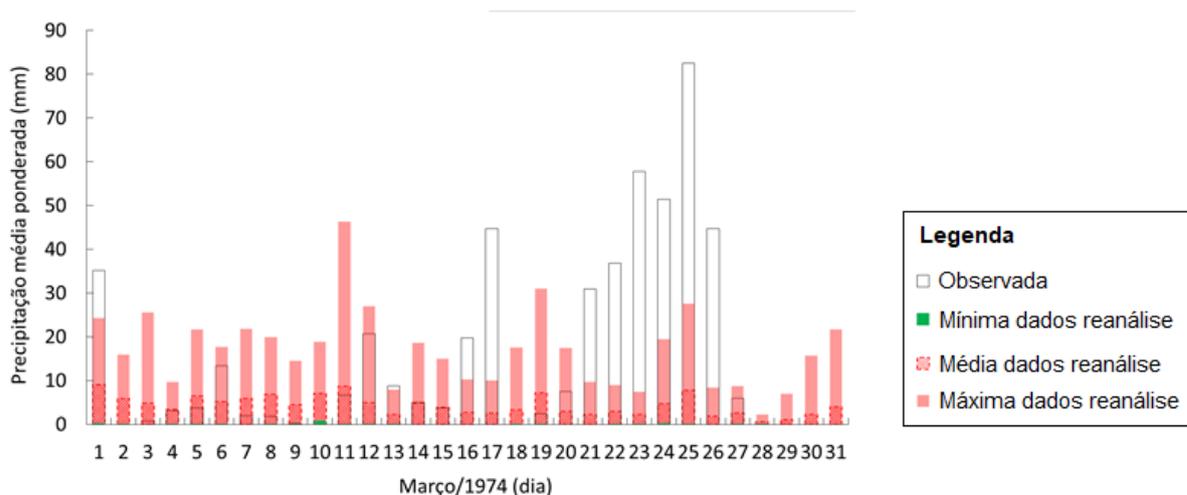


Figura 17 – Hietograma dados observados e média dos dados provenientes de reanálise.
Fonte: Vanelli et al. (2018a)

Considerando as fontes existentes e os resultados obtidos, esse estudo empregou apenas os dados das estações pluviométricas interpolados espacialmente pelo método do inverso da distância ao quadrado.

6.2.3 Vazão

Os dados fluviométricos provenientes de estações de monitoramento são disponibilizados na base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). No levantamento das estações fluviométricas com dados disponíveis para o mês de março de 1974 foram identificadas seis estações fluviométricas (Tabela 5), cuja distribuição espacial e os respectivos hidrogramas são apresentados na Figura 18. Um fator relevante sobre a área desse estudo se refere a sua proximidade com a zona costeira, que implica na influência das marés no Rio Tubarão, ocasionando efeito de remanso alterando o valor da vazão nas proximidades do exutório (Loitzenbauer e Mendes, 2016). Entretanto, essas seis estações fluviométricas estão localizadas a montante da área central do município, sem influência do efeito de remanso.

A estação fluviométrica Rio Pequeno, código 84551000, apresentou falhas nos dias 26 a 31 de março de 1974. Parte da contribuição da sub-bacia Formadores do Rio Tubarão é monitorada pela estação fluviométrica código 84250000. Na sub-bacia do Rio Braço do Norte, o posto código 84560002 é o mais próximo ao exutório. A contribuição de ambas sub-bacias pode ser mensurada na estação fluviométrica Rio do Pouso, código 84580000.

Tabela 5 – Identificação das estações fluviométricas com registros em março de 1974.

Código	Nome	Rio	Área de drenagem (km ²)	Latitude	Longitude
84250000	Orleans II	Tubarão	606	-28,35	-49,28
84520000	Divisa de Anitápolis	Braço Norte	380	-28,00	-49,12
84551000	Rio Pequeno	Pequeno	379	-28,21	-49,20
84560002	São Ludgero II	Braço Norte	1.560	-28,32	-49,15
84580000	Rio do Pouso	Tubarão	2.740	-28,42	-49,11
84600000	Armazém Capivari	Capivari	770	-28,26	-49,01

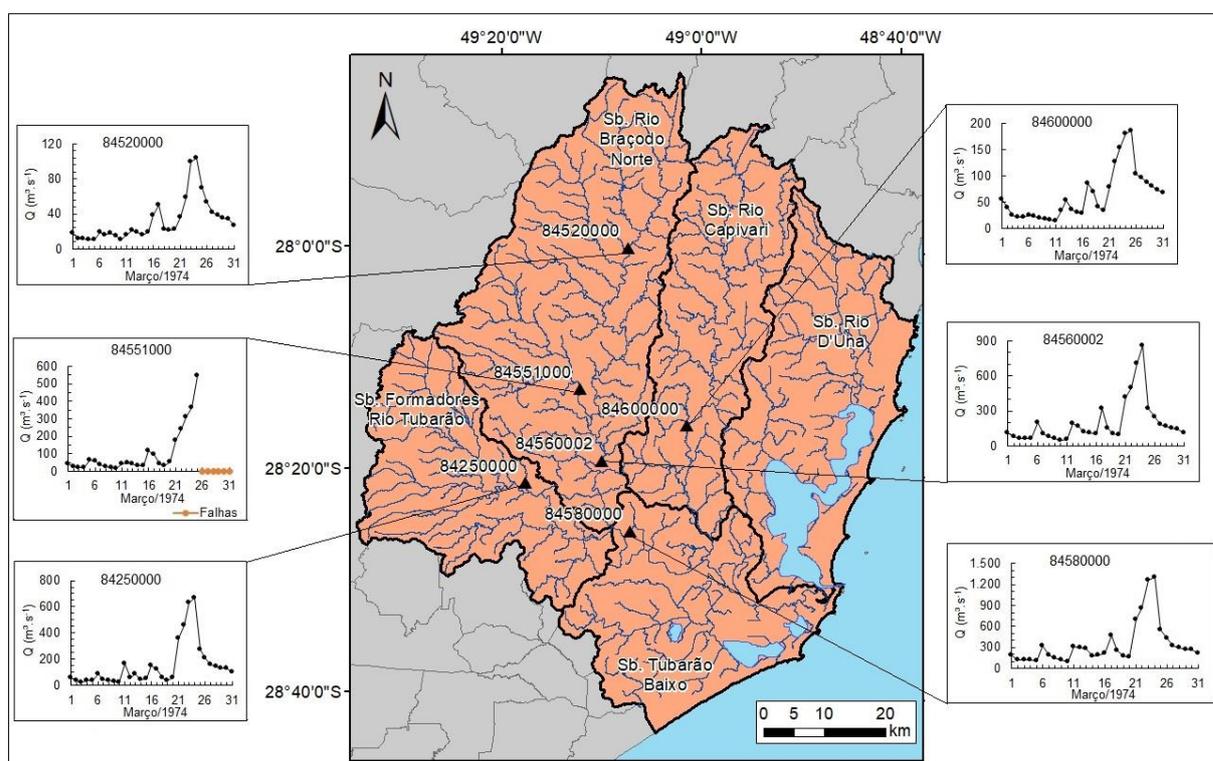


Figura 18 – Estações fluviométricas com dados em março de 1974.

Considerando a contribuição das sub-bacias Formadores do Rio Tubarão e Rio Braço do Norte na estação fluviométrica código 84580000, o valor de pico é estimado em $1.307,50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no dia 24/03/1974. Já a contribuição da sub-bacia do Rio Capivari no Rio Tubarão, é parcialmente registrada pela estação fluviométrica Armazém Capivari, código 8460000, o valor máximo estimado é de $185,20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Esses valores de vazão diária das estações de monitoramento são estimados pelo método da curva-chave. Considerando apenas as incertezas do método da curva-chave, Vanelli et al. (2018b) apresentaram uma relação cota x vazão por simulação hidrodinâmica para a estação fluviométrica Rio do Pouso, código 84580000. Os autores empregaram o modelo hidrodinâmico HEC-RAS versão 5.0.4

(USACE-HEC, 2016) com discretização unidimensional e em regime permanente para estimar vazões de até $2.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ considerando as condições físicas da seção transversal. Para isso, os autores calibraram o modelo hidrodinâmico com os dados disponíveis para a estação de monitoramento de nível de água, vazão e perfil transversal.

No estudo realizado, os autores utilizaram a seção transversal de 2004 e os dados consistidos do período de 1998 a 2004. Entre os resultados obtidos, têm-se que a curva-chave da ANA em relação à curva-chave obtida por simulação hidrodinâmica apresenta variação de até 10% para valores na faixa de $900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Essa variação foi considerada aceitável e se refere a uma extrapolação dos dados observados correspondente a aproximadamente quatro vezes o maior valor observado no período analisado. Entretanto, para valores superiores a $900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, relacionados a eventos de inundação, a curva-chave da ANA os subestima. No período analisado, existe o registro de 730 cm em outubro de 2001, cuja vazão estimada pela curva-chave da ANA é de $1.315 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto o modelo hidrodinâmico aponta uma vazão de $1.820 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Analogamente, foi possível analisar o evento de 1974, cujo nível de água máximo registrado é 727 cm estimando a vazão de $1.307,50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pela curva-chave da ANA. Apesar das alterações da seção transversal ao longo do tempo, os valores de cota registrados em 1974 e 2001 são similares. Dessa forma, apenas analisando a incerteza da extrapolação da curva-chave e considerando os resultados obtidos na simulação hidrodinâmica, o registro da ANA sobre a vazão máxima do evento de 1974 foi subestimada. Maior detalhamento sobre a relação cota x vazão obtida por simulação hidrodinâmica para a estação fluviométrica Rio do Pouso pode ser encontrado em Vanelli et al. (2018b).

Após o evento de 1974, em um dos projetos de proteção contra inundações possivelmente de responsabilidade da DNOS, foram realizados estudos para determinação da curva-chave com extrapolação pelo método de Stevens. Para a estação Rio do Pouso, código 84580000, os autores obtiveram a seguinte equação de curva-chave: $Q = 85,7015 \cdot H^{1,1845}$, sendo válida para nível (H) superior a 0,67 m e determinação de vazões (Q) posteriores a 04/04/1967. Os valores dos níveis de água estimados pelos autores para os dias 25 e 31 de março são diferentes dos valores da base de dados da ANA, conforme segue na Tabela 6. Segundo relatos de técnicos,

essa estimativa se baseou nas marcas da régua linimétrica coletadas dias após o evento, porém suspeita-se do deslocamento da régua em virtude das forças da água.

Os valores de vazão estimados pelo estudo prévio às obras no Rio Tubarão, relacionam o valor de cota 727 cm a uma vazão inferior à estimada pela curva-chave da ANA. No entanto, a vazão máxima indicada é de 1.870,12 m³s⁻¹ associada a uma cota de 13,50 m que eles determinaram como o máximo nivelado. Um valor de vazão superior no dia seguinte ao dia 24/03/1974 foi considerado condizente com os registros de precipitação da estação pluviométrica código 028490002 localizada em São Ludgero, a montante do Rio Tubarão, que apontam o máximo precipitado de 205 mm em 25/03/1974.

Tabela 6 – Valores de nível de água e vazão referentes a estação Rio do Pouso estimados pelo estudo prévio às obras no Rio Tubarão e pela base de dados da ANA.

Data	Dados estimados no estudo		Dados obtidos ANA	
	H (m)	Q (m ³ s ⁻¹)	H (m)	Q (m ³ s ⁻¹)
20/03/1974	1,67	157,32	1,68	162,60
21/03/1974	4,78	546,73	4,78	699,60
22/03/1974	5,50	645,58	5,50	865,00
23/03/1974	7,07	869,21	7,08	1.260,00
24/03/1974	7,27	898,41	7,27	1.307,50
25/03/1974	12,00*	1.626,59	4,11	558,00
26/03/1974	13,50**	1.870,12	3,43	429,40
27/03/1974	7,00*	859,03	2,83	325,10
28/03/1974	4,30*	482,32	2,68	300,20
29/03/1974	3,00*	314,88	2,49	273,60
30/03/1974	2,05*	200,57	2,46	269,40
31/03/1974	1,42*	129,83	2,06	215,80

Notas do estudo:

** Máximo nivelado, admitindo-se que tenha ocorrido na data assinalada

* Valores estimados pela curva de depleção da bacia

Como descrito na literatura, existem muitas incertezas nas estimativas da vazão relacionadas a inundações. Em Tubarão, não foi diferente: a análise dos dados de vazão disponíveis denotou incertezas quanto às estimativas do valor de pico e do comportamento do hidrograma. Portanto, um dos objetivos desse estudo foi a reconstrução hidrológica do evento possibilitando a comparação com os valores da literatura.

6.2.4 Marcas de cheia e locais afetados

Não foram identificados estudos da mancha de inundação do evento de 1974 contemplando toda a área da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.

Segundo Machado (2005), além de Tubarão, a inundação atingiu Braço do Norte, Armazém, Treze de Maio e Azambuja. Em relação ao município de Tubarão, Machado (2005) estima que a inundação de 1974 afetou aproximadamente 90% da área urbana do município.

Entre os anos de 2014 e 2015, em ação promovida pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão foi realizado um levantamento em campo sobre o a inundação de 1974. Essa atividade consistiu em entrevistas com moradores que residiam no município na data do evento e identificou pontos atingidos ou não pela inundação. Foram 193 registros, dos quais apenas sete indicam local não inundado.

Em estudo sobre a cheia histórica no município de Tubarão, Zanandrea et al. (2018), utilizando o modelo descritor de terreno HAND (Nobre et al., 2011), geraram uma mancha de inundação correspondente a 45% do território municipal. Como dados de entrada do modelo, os autores empregaram o Modelo Digital do Terreno (MDT) e a marca de cheia referente a 1974 localizada na longitude $-49,008094^{\circ}$ e latitude $-28,482059^{\circ}$ que indica uma altura de aproximadamente 1,50 m e está a cerca de 70 m da margem do Rio Tubarão, proximidades da ponte geminada Nereu Ramos e Heriberto Hulse (Figura 19). Para validação da mancha gerada pelo HAND foram utilizados os pontos coletados pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil. O modelo HAND acertou 78% em comparação com os pontos elencados como inundados, enquanto para os pontos não inundados obteve 86% de acerto. A mancha das áreas potencialmente inundadas pela cheia histórica de 1974 resultante do modelo HAND (Figura 20) teve acerto de 151 dos 193 pontos levantados.

O modelo HAND apresenta limitações na representação das áreas inundadas pois leva em consideração um único ponto a partir do qual a reclassificação é aplicada. Em locais de baixa declividade, esse modelo subestima as áreas potencialmente inundadas (Goerl et al., 2017). Entretanto, conforme exposto por Zanandrea et al. (2018), apesar de suas limitações, o modelo HAND pode fornecer uma estimativa preliminar de áreas potencialmente inundadas.



(a)

(b)

Figura 19 – Fotografias do início da cheia: (a) Rio Tubarão extravasando a Ponte Nereu Dias; (b) Águas do Rio Tubarão inundaram a Rua Coronel Colaço próximo a Ponte Nereu Dias atingindo aproximadamente 0,50 m de altura. Fonte: Machado (2005)

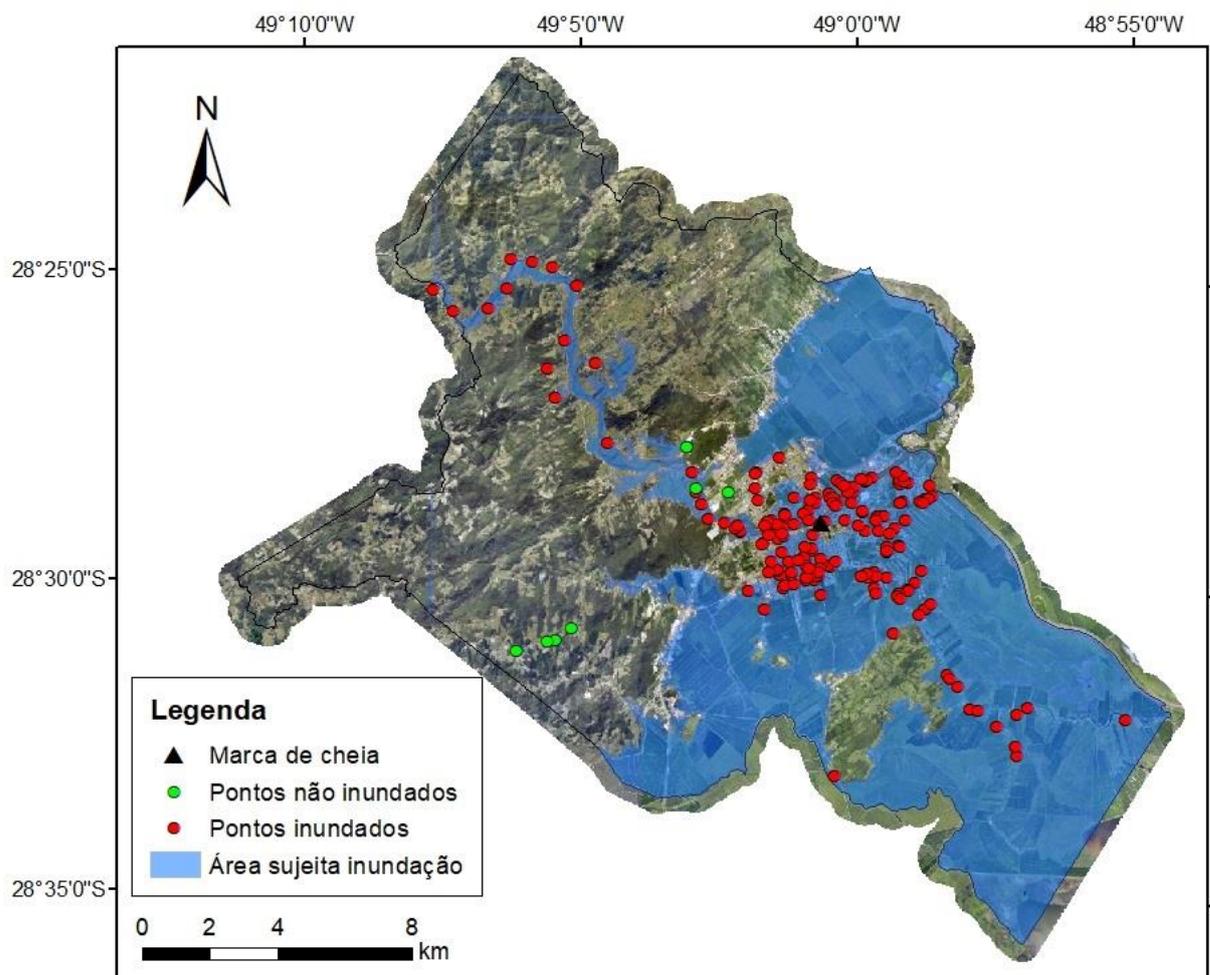


Figura 20 – Mancha de inundaçãõ da cheia hist3rica de 1974 gerada pela reclassificaçãõ do modelo HAND. Fonte: Adaptado de Zanandrea et al. (2018).

Esses dados disponíveis auxiliam na etapa de reconstrução hidrodinâmica. No processo iterativo de alteração das condições de contorno, os resultados do modelo foram comparados com esses dados, possibilitando avaliar a compatibilidade entre eles. Portanto, a coleta dessas informações foi fundamental para o presente estudo, pois os resultados simulados foram comparados com esses dados de referência, possibilitando apontar os cenários com maior compatibilidade.

6.2.5 Maré

Em virtude da proximidade com o Oceano Atlântico, as marés exercem influência nessa bacia hidrográfica. As marés podem ser classificadas como astronômica e meteorológica. A primeira é um fenômeno de oscilações periódicas no nível do mar e em corpos hídricos ligados ao oceano resultante da atração gravitacional exercida pela Lua e pelo Sol sobre a Terra (CEMADEN, 2017). Nas fases da lua cheia e nova é denominada maré de sizígia e atinge alturas maiores do que normalmente. Já a maré meteorológica é decorrente da sobrelevação do nível do mar por efeitos meteorológicos, tais como vento e pressão atmosférica.

Conforme exposto por Lima et al. (2009), a predominância do vento na direção leste por cerca de quatro dias consecutivos, entre os dias 23 a 26/03/1974 atuou sobre as águas do oceano, contribuindo para a formação de ondas sucessivas, também denominada de trem de ondas. Além disso, Lago (1983) menciona a ocorrência da maré de sizígia, que pode ser ratificado analisando o calendário lunar que demonstra que em 23 a 30/03/1974 a lua se encontrava na fase nova. Corroborando, assim, a influência de fatores meteorológicos e astronômicos na altura da maré durante o evento de 1974.

Entre o período de 1948 a 2008, Rodríguez et al. (2016) apontaram que nas latitudes meridionais a altura de onda significativa excedida por 12 h foi de até 5 m (Figura 21). Entretanto, essas ondas tendem a se deteriorar rapidamente devido à atenuação na plataforma continental. Analisando valores de altura de onda significativa em um período de 60 anos, Klein et al. (2016) indicam que frentes frias de baixa pressão geram alturas de maré entre 1 m e 3,5 m. Já ao tratar da maré astronômica a costa do estado de Santa Catarina apresenta valor médio de 1 m de altura de maré na análise do período de 1949 a 2009 (Rodríguez et al., 2016). Na análise da série histórica da Estação 2904 – Laguna – SDS do período de 22/08/2014

a 05/07/2016 com intervalo de medição de 15 minutos apontou como altura máxima da maré 0,95 m sem considerar o efeito de amortecimento causado pela Lagoa Santo Antônio (Monte et al., 2017).

Mediante os valores encontrados na literatura e tendo em vista que durante o evento ocorreu associação entre maré astronômica e maré meteorológica, delimita-se como intervalo de análise entre 1 m a 3 m para altura de maré. O limite superior enquadra-se como um valor extremo, cuja probabilidade de ocorrência é baixa. Entretanto, a excepcionalidade do evento de 1974 inclui esse valor nos testes.

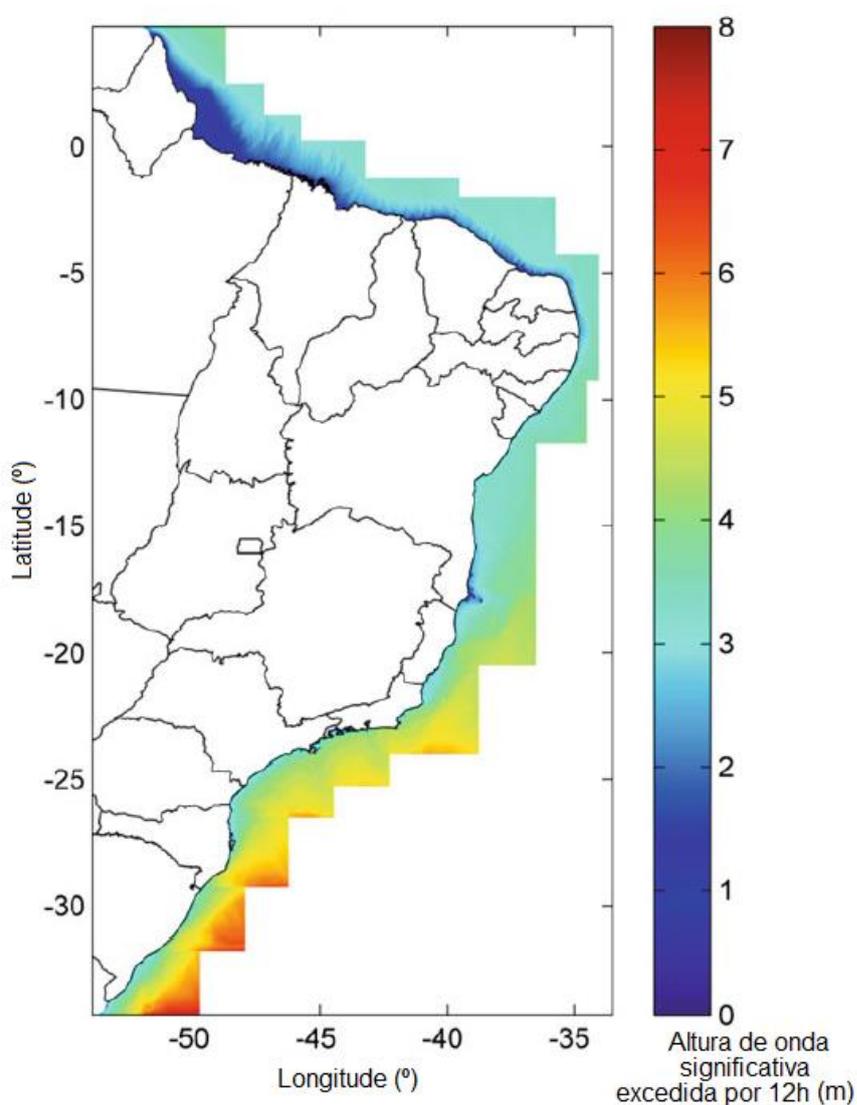


Figura 21 – Adaptado de Rodríguez et al. (2006) dados de Maré extrema obtidos da base de dados DOW para o período de 1948 a 2008: Altura de onda significativa excedida por 12 h (m) ao longo da costa brasileira.

D'Aquino et al. (2011) identificaram uma cunha salina a 27 km do estuário. Os autores realizaram essa análise em campo com ocorrência de maré de sizígia cuja

altura não é especificada e vazão média histórica de $181 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, máxima e mínima, $694 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $50,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, registrada para a estação fluviométrica Rio do Pouso, código 84580500, que não sofre efeito de remanso. Loitzenbauer e Mendes (2016), considerando apenas a maré astronômica, obtiveram uma penetração no Rio Tubarão correspondente a 20,7 km a montante em condições de vazão mínima afluente. Portanto, foi evidenciada a influência da maré no escoamento do Rio Tubarão em seu trecho próximo a foz.

6.2.6 Modelo Digital do Terreno

Na hidrologia, o Modelo Digital do Terreno (MDT) pode ser empregado como entrada em programas de geoprocessamento, a fim de extrair informações sobre as características morfológicas do terreno, tais como, depressões topográficas, direções de fluxo, que permitem a delimitação de bacias hidrográficas, definição dos caminhos de fluxo, dentre outras informações (Jenson e Domingue, 1988).

A área de estudo se localiza no estado de Santa Catarina, onde entre os anos de 2010 e 2012 foi realizado o levantamento aerofotogramétrico sob responsabilidade da Secretaria do Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS). Esse produto resultou no MDT de todo o estado em alta resolução espacial com *pixels* de 1,0 m e resolução vertical de 0,39 m do solo, disponível no Sistema de Informações Geográficas do Estado de Santa Catarina (SIGSC) na plataforma eletrônica: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>. Após a aquisição do MDT, foi realizada a conversão dos *pixels* de 1 m para 10 m, visando a representação das planícies e, ao mesmo tempo, não comprometendo o tempo computacional de simulação conforme estimado em testes preliminares.

A análise do MDT permitiu observar que em comparação com o ano de 1974, a alteração mais significativa se refere às obras de retificação em um trecho do Rio Tubarão a jusante da área central do Município e no Rio Capivari nas proximidades da sua confluência com o Rio Tubarão. Essas retificações foram executadas pelo DNOS entre os anos 1978 a 1982, posteriormente a ocorrência do evento de 1974 como uma medida de proteção das cheias. Na dragagem efetuada no trecho do Rio Tubarão foram retirados aproximadamente $16.000.000 \text{ m}^3$ de sedimentos do rio (Marques, 2010).

No presente estudo, o MDT exerceu duas funções. Em uma delas, as informações do MDT foram usadas para a geração da rede de drenagem, cuja segmentação dos trechos originou as minibacias, unidades de discretização do modelo. Para isso, foi necessário realizar a recuperação do MDT com base em cartas topográficas para representação da rede de drenagem sem as obras de retificação do Rio Tubarão e do Rio Capivari.

A outra função do MDT se refere a representação da área inundada. Para isso, foi necessário extrair a curva hipsométrica, empregando o MDT sem a recuperação do traçado, porém com a adição das profundidades do sistema lagunar existente. A decisão por esse MDT foi baseada considerando: (i) a similaridade entre as cotas do terreno independente do traçado, por se tratar de uma região de planície, (ii) pela unidade de discretização ser a minibacia, cuja definição é realizada empregando o MDT recuperado e, (iii) pelo alto tempo de processamento necessário para viabilizar a extração dos valores das cotas. Remo e Pinter (2007) realizaram procedimento semelhante na recuperação do MDT do Rio Mississippi Médio. Possuindo um acervo bem documentado, os autores utilizaram a batimetria do rio referente ao ano de 1888 e 1889, porém devido à não inclusão da topografia da planície de inundação no levantamento, os autores extraíram essa informação de um MDT do ano de 1998.

6.2.6.1 Recuperação dos canais meandantes no MDT para geração da rede de drenagem

Com vistas à reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 em Tubarão, uma das etapas consiste em remover o traçado retificado do Rio Tubarão e do Rio Capivari, recuperando o curso sinuoso do rio existente na data do evento. A recuperação do MDT se refere aos locais onde houve a retificação dos rios nas proximidades do município de Tubarão. Para embasar essa etapa, foi realizado o levantamento de registros e cartas topográficas cujos dados apresentam o traçado antes das obras de retificação.

Nas cartas topográficas do Exército em escala de 1:50.000, cujas identificações são elencadas na Tabela 7, foi possível identificar os meandros dos rios antes das obras de retificação. Essas cartas estão disponibilizadas em formato *raster*

no Banco de Dados Geográficos do Exército pelo endereço eletrônico: <<https://bdgex.eb.mil.br/mediador/>>.

Tabela 7 – Dados de identificação das cartas topográficas usadas para recuperação do MDT.

Nome da Folha	MI	Índice de Nomenclatura	Data de Conclusão
Lagoa de Garopaba do Sul	2041-1	SH-22-X-B-V-1	01/01/1976
Laguna	2925-3	SH-22-X-B-II-3	01/01/1976
Tubarão	2924-4	SH-22-X-B-I-4	10/01/1970

Fonte: Banco de Dados Geográficos do Exército.

O primeiro procedimento se refere ao “aterramento” do canal retificado. As curvas de nível fornecidas pelas cartas topográficas poderiam ser usadas para auxiliar na recuperação das cotas do terreno. Entretanto, essa região é plana, de modo que as cartas topográficas existentes com curvas de nível equidistantes em 20 m, não foram capazes de representar a variação altimétrica. Portanto, para áreas com pouca ou nenhuma variação de altitude, a recuperação do MDT não pode utilizar as curvas de nível provenientes das cartas topográficas do Exército com escala de 1: 50.000. Dessa forma, optou-se por utilizar as informações do próprio MDT para realizar a correção do terreno. O procedimento adotado consistiu em:

- (i) criar um arquivo vetorial traçando o centro dos canais retificados tendo por base uma imagem de satélite atual (Figura 22);
- (ii) dividir em trechos com declividade aproximadamente constante em torno de 1.000 m cada trecho;
- (iii) gerar uma área de influência para cada trecho utilizando a ferramenta de geoprocessamento *buffer*;
- (iv) para cada um dos trechos, calcular a média e o desvio padrão aplicando recursos da ferramenta de geoprocessamento;
- (v) assumir para cada um dos trechos, o respectivo somatório entre a média e o desvio padrão;
- (vi) no MDT original, sobrepor os trechos com valores constantes de modo a eliminar as cotas os canais retificados.

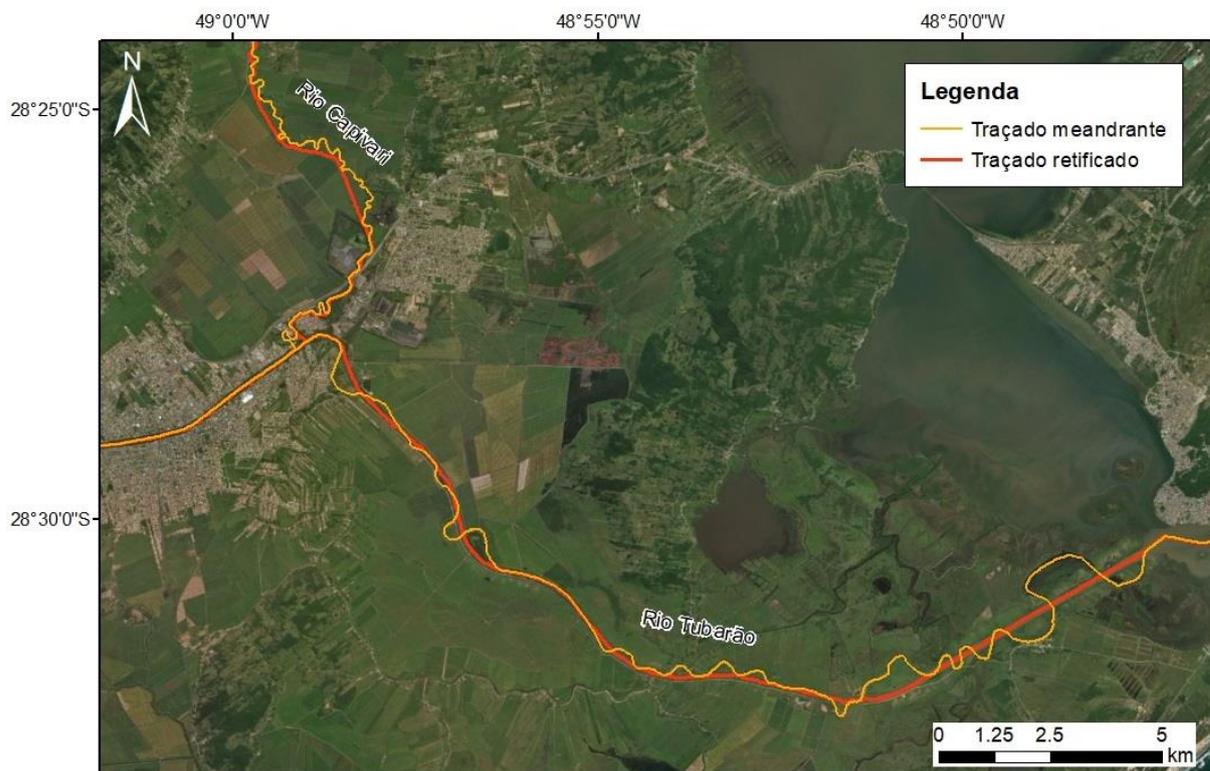


Figura 22 –Traçado do Rio Tubarão e do Rio Capivari com meandros conforme Cartas do Exército de 1976 sobreposto ao traçado retificado pela DNOS.

Do exutório do Rio Tubarão até 15 km a montante se verificou que a variação dos valores entre o canal do rio e o entorno foi inferior a 0,30 m, de modo que a metodologia de recuperação do MDT foi aplicada apenas no restante do trecho retificado, cerca de 8 km. A área de influência adotada para o Rio Tubarão foi de 150 m para cada lado do traçado central. Já para o Rio Capivari, o trecho retificado apresentou cerca de 9 km, de modo a se obter 9 trechos com área de influência de 100 m para cada lado do traço central.

Posteriormente, o traçado com meandros foi incorporado no MDT corrigido. Para aquisição dos meandros foram utilizadas informações dos cursos d'água das cartas topográficas da Tabela 7 para elaboração de um arquivo vetorial. Nas imagens de satélite recentes foi possível visualizar os meandros abandonados, sendo essa uma forma de verificação (Figura 22). A aplicação de recursos de geoprocessamento possibilita a definição dos meandros no MDT corrigido. Assim, MDT recuperado foi gerado, possibilitando a definição da hidrografia referente ao período anterior a retificação do canal. A Figura 23 exemplifica a recuperação do MDT ao que tange o traçado do Rio Tubarão (c), permitindo a comparação com o MDT cuja retificação foi evidenciada (a), sendo (b) a etapa correspondente ao aterramento do canal retificado.

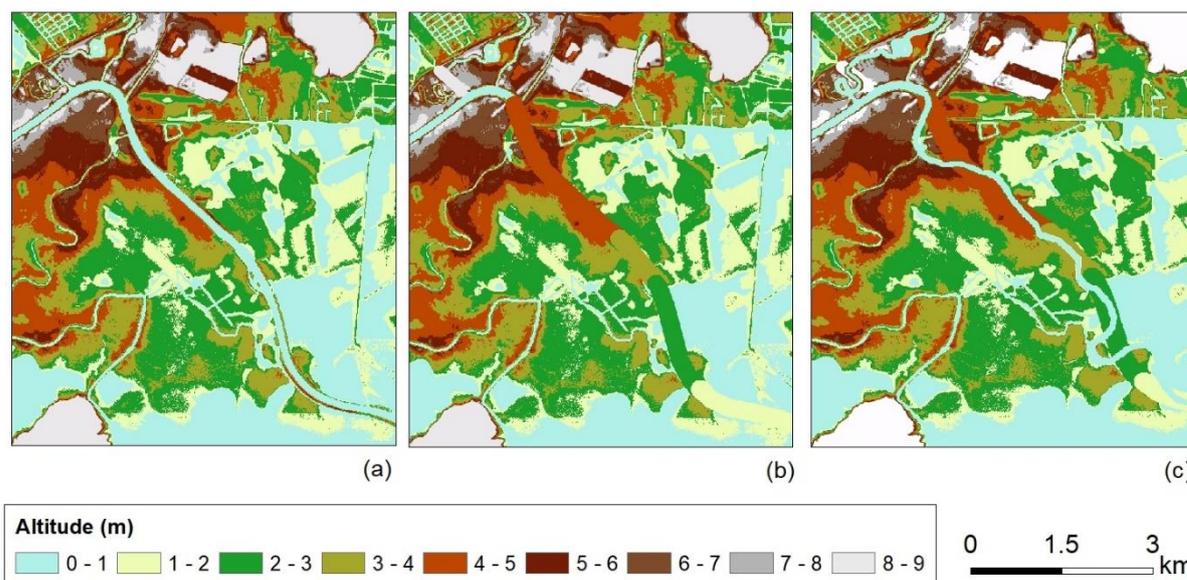


Figura 23 – (a) MDT com traçado do Rio Tubarão retificado; (b) resultado da etapa (vi) com trechos de 1.000 m, *buffer* de 150 m para cada lado do traçado central e valores representativos do somatório da média e desvio padrão; (c) MDT com traçado meandrante do Rio Tubarão.

Outro procedimento relevante no MDT, deve-se ao fato de a discretização das lagoas no modelo hidrológico ser simplificada conforme proposto por Lopes (2017), consistindo na inserção de traçados artificiais dentro das lagoas criando uma drenagem principal fictícia em cada uma delas de modo a realizar a conexão entre as lagoas e os rios.

Finalizada a etapa de recuperação do MDT, aplicaram-se os recursos de geoprocessamento para a delimitação da hidrografia por meio das informações do MDT. Entretanto, a aplicação da ferramenta IPH-Hydro Tools (Siqueira et al., 2016) para determinação das informações topológicas de geoprocessamento requer a eliminação dos valores negativos do MDT, assim adicionou-se uma altitude de 1.000 m em todos os *pixels*.

Com o MDT recuperado e aplicando as ferramentas de geoprocessamento, deve-se realizar a remoção das depressões, geração das direções de fluxo e acumulação dos fluxos, para então realizar a definição da rede de drenagem (Jenson e Domingue, 1988). Esse procedimento gerou a rede de drenagem da bacia hidrográfica com representação do traçado anterior às obras de retificação, cuja segmentação em trechos resulta nas minibacias.

6.2.6.2 MDT para propagação das vazões

Como já mencionado, outro papel relevante do MDT foi fornecer as informações para criação da curva hipsométrica para representação da área inundada. Para essa etapa, empregou-se o MDT sem a recuperação do traçado, porém com a adição das profundidades do sistema lagunar existente.

A busca pela batimetria das lagoas foi realizada nas cartas náuticas da Marinha do Brasil, disponíveis em formato *raster* na plataforma eletrônica: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>>. No entanto, não consta no levantamento do sistema lagunar.

Na indisponibilidade de dados de batimetria desses corpos d'água, foram adotados valores constantes estimados a partir de levantamento realizado pelo Instituto de Políticas Públicas e Sociais (IPPS, 2010). Para a Lagoa do Imaruí, adotou-se o valor de 7,1 m de profundidade, 2,7 m para Lagoa Mirim e 2,2 m para Lagoa de Santo Antônio. A profundidade das Lagoas de Garopaba do Sul, do Camacho e de Santa Marta foi estimada em 2,5 m e da Lagoa de Jaguaruna em 1 m.

6.2.7 Uso do solo

As cartas topográficas do Exército disponibilizadas no Banco de Dados Geográficos do Exército pelo endereço eletrônico: <<https://bdgex.eb.mil.br/mediador/>> apresentam o uso do solo, dentre outras informações. A área da bacia hidrográfica foi composta por 16 cartas topográficas em escala 1:50.000, cujos dados de identificação são listados na Tabela 8.

A análise das cartas permitiu observar que a extensão das manchas urbanas era inferior em relação ao atual, as áreas de cultivo eram maiores, enquanto as áreas de floresta eram menores e as áreas de solo exposto não foram apresentadas. Além disso, supõe-se que na elaboração das cartas considerou o uso pretendido do solo e não a situação no momento da análise.

No contexto da unidade territorial, pode-se afirmar que não ocorreram mudanças significativas em seu uso do solo. Portanto, considerando a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 como enfoque desse estudo, o uso do solo empregado como entrada do modelo hidrológico corresponde ao mapa delimitado pela aplicação de ferramentas de geoprocessamento para classificação de imagens.

Desse modo, assegura-se o domínio da metodologia aplicada e a melhor resolução espacial. A função desse mapeamento está associada a resposta hidrológica de cada classe no processo de transformação da chuva em vazão. As alterações do uso do solo ocorridas ao longo do tempo foram ajustadas pelo modelo hidrológico por meio da calibração e validação sendo capaz de representar satisfatoriamente o processo hidrológico, de acordo com as medidas de desempenho aplicadas.

Tabela 8 – Dados de identificação das cartas topográficas que compõem a área de estudo.

Nome da Folha	MI	Índice de Nomenclatura	Data de Conclusão
Aiurê	2924-1	SH-22-X-B-I-1	01/01/1976
Anitápolis	2908-4	SG-22-Z-D-IV-4	01/01/1976
Bom Jardim da Serra	2923-4	SH-22-X-A-III-4	01/01/1976
Bom Retiro	2908-3	SG-22-Z-D-IV-3	01/01/1976
Criciúma	2940-1	SH-22-X-B-IV-1	01/01/1985
Grão-Pará	2924-2	SH-22-X-B-I-2	01/01/1976
Imbituba	2925-2	SH-22-X-B-II-2	01/01/1976
Jaguaruna	2940-2	SH-22-X-B-IV-2	10/01/1970
Lagoa de Garopaba do Sul	2041-1	SH-22-X-B-V-1	01/01/1976
Laguna	2925-3	SH-22-X-B-II-3	01/01/1976
Orleans	2924-3	SH-22-X-B-I-3	10/01/1974
Paulo Lopes	2909-4	SG-22-Z-D-V-4	10/01/1965
São Bonifácio	2909-3	SG-22-Z-D-V-3	01/01/1974
São Martinho	2925-1	SH-22-X-B-II-1	01/01/1976
Tubarão	2924-4	SH-22-X-B-I-4	10/01/1970
Urubici	2923-2	SH-22-X-A-III-2	01/01/1976

Fonte: Banco de Dados Geográficos do Exército.

Inicialmente, foi feita a aquisição do produto de sensoriamento remoto pela base de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS) disponível no endereço eletrônico: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. O satélite Landsat 8 possui resolução espacial de 30 m e dispõe de cenas correspondentes a área de estudo, codificadas como: 220/079 e 220/080. Os critérios adotados para seleção consistem em imagens com cobertura de nuvens menor do que 10%, obtidas durante passagem diurna do satélite, com correção radiométrica e geométrica e obtidas na mesma data, de modo a resultar um mosaico com mesma resposta espectral para ambas as cenas. A data de aquisição das imagens de satélite foi 28 de abril de 2017, correspondente ao início de um período com menor ocorrência de precipitações.

Posteriormente, efetuou-se o mosaico das duas cenas. Para a classificação de imagens, foi alterada a composição de bandas para 6(R) 5(G) 4(B) que

corresponde, respectivamente, as bandas do infravermelho médio 1, infravermelho próximo e vermelho do Landsat 8.

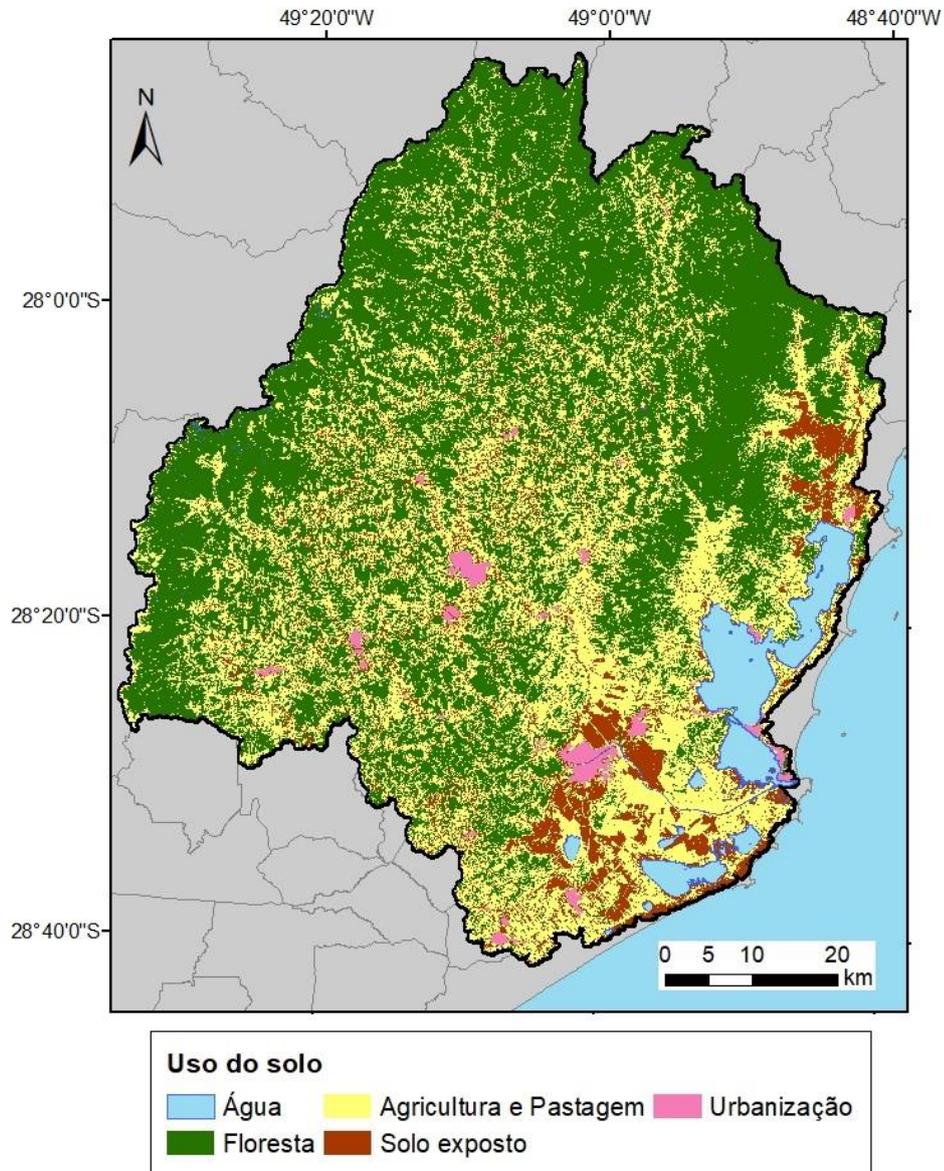


Figura 24 – Mapa de uso do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.

Levando em consideração a resposta hidrológica esperada de cada uso, as classes de uso do solo foram definidas em: “Floresta”, “Pastagem e Agricultura”, “Solo exposto”, “Urbanização” e “Água” (Figura 24). A classe “Floresta” engloba as diferentes formações e áreas de reflorestamento. As áreas degradadas em virtude da exploração de carvão mineral no município de Lauro Müller, bem como as dunas próximas à costa são incluídas na classe “Solo exposto” em decorrência da similaridade no comportamento hidrológico. Quanto à classe “Pastagem e

Agricultura”, as culturas predominantes são fumo, mandioca, feijão e milho, sendo prática dos proprietários rurais revezar entre esses cultivos cíclicos e pastagem para pecuária (SDM, 1998). No delta do Rio Tubarão, verificou-se a predominância do cultivo de arroz (SDM, 1998), observando que a ocorrência de baixas temperaturas é um fator limitante da rizicultura, seu cultivo normalmente se desenvolve nos meses entre setembro e abril (Marques, 2010; Epagri, 2017).

O mapa de uso do solo resultante, apresentado na Figura 24, indicou predominância de “Floresta” ocupando cerca de 52,1% da área total, seguido por “Agricultura e Pastagem” com 33,7% e “Solo exposto” com 8,9%. O sistema lagunar existente nas proximidades da zona costeira contribuiu para a classe “Água” atingir aproximadamente 4,0%, superando o percentual correspondente a “Urbanização” de 1,3%.

6.2.8 Tipos de solo

O tipo de solo foi obtido a partir dos dados da Embrapa (2004) com nomenclatura atualizada segundo Jacomine (2009). A área de estudo apresentou em sua composição as seguintes classes de solo: argissolo, cambissolo, neossolo litólico, neossolo quartzarênico, organossolo, espodossolo e gleissolo, além de afloramentos rochosos e dunas. A variação do solo ao longo do tempo é lenta, portanto considera-se que a composição permanece igual a de 1974.

Objetivando simplificar a classificação dos tipos de solo, foi atribuído uma categorização embasada na tendência de geração de escoamento superficial e na capacidade de armazenamento de água. De acordo com Jardim et al. (2017), argissolos e as dunas apresentam tendência a gerar menos escoamento superficial em comparação com os demais, assim foram categorizados como “solo profundo”. Já os cambissolos, os neossolos, os espodossolos, os gleissolos e os organossolos devido à sua menor capacidade de armazenamento foram definidos como “solos rasos”. Os afloramentos rochosos na área de estudo foram classificados como “impermeável” pois não possuem capacidade de armazenamento.

O mapa de tipo do solo é ilustrado na Tabela 9 e na Figura 25 é apresentada a categorização em “solos rasos”, “solos profundos” e “impermeável”. O cambissolo, categoria raso, foi o solo predominante na área de estudo com 50,3% seguido pelo argissolo, categoria profundo, encontrado em 25,2% da área total.

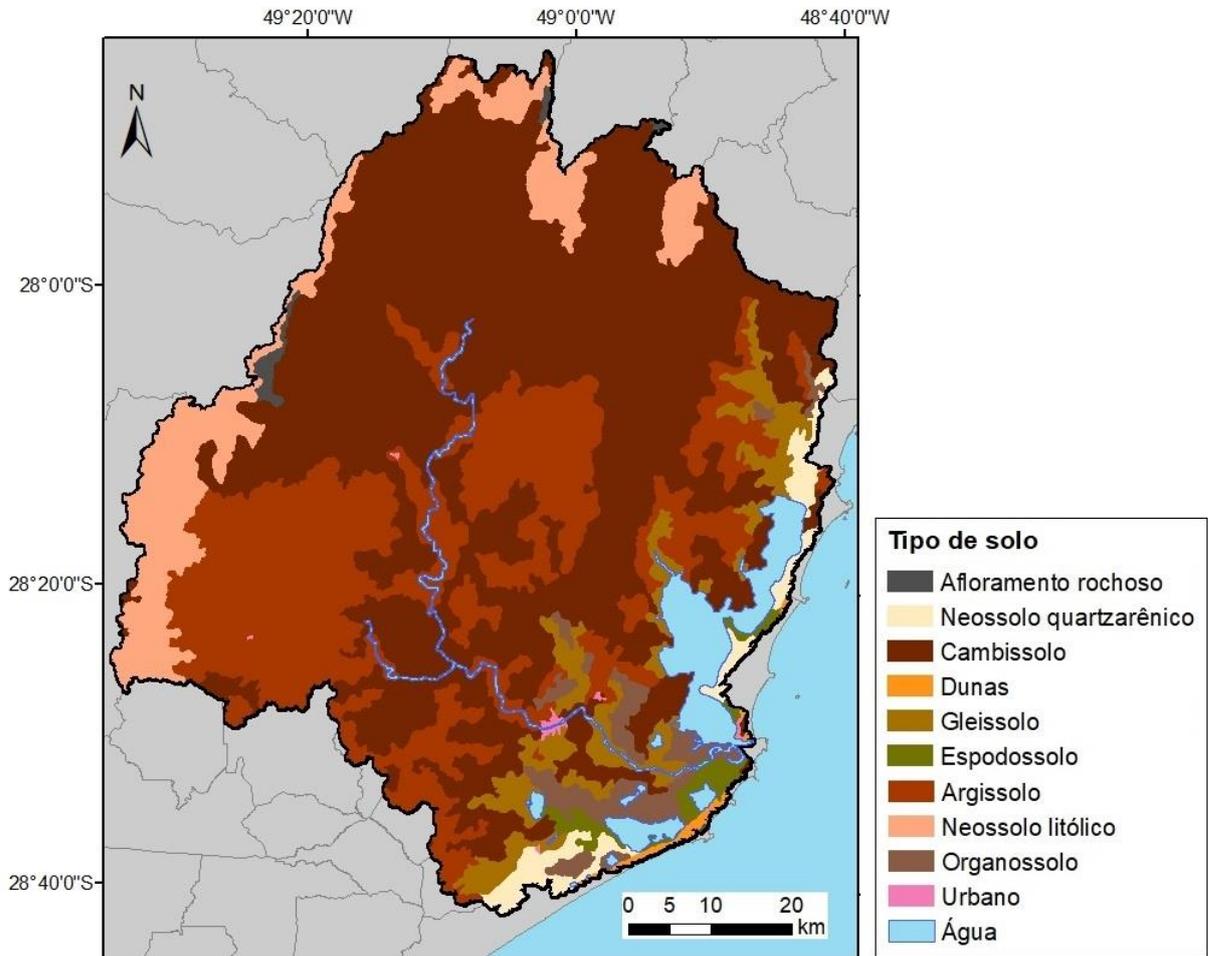


Figura 25 – Mapa de tipo do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.

Tabela 9 – Tipos de solo da área de estudo e respectiva reclassificação.

Tipo de Solo	Categoria
Afloramento rochoso	Impermeável
Argissolo	Profundo
Dunas	Profundo
Cambissolo	Raso
Neossolo litólico	Raso
Neossolo quartzarênico	Raso
Gleissolo	Raso
Organossolo	Raso
Espodossolo	Raso

7 FASE 2: MODELAGEM

Nos itens a seguir são apresentados os resultados de cada uma das etapas da Fase 2 da estratégia metodológica proposta no presente estudo.

7.1 CONFIGURAÇÕES DO MODELO

O modelo MGB-IPH possui os módulos hidrológicos e hidrodinâmicos acoplados *on-line*. Assim, os procedimentos inerentes ao modelo satisfaz aos dois módulos. A Figura 26 apresenta os procedimentos inerentes ao MGB-IPH realizados na presente etapa.

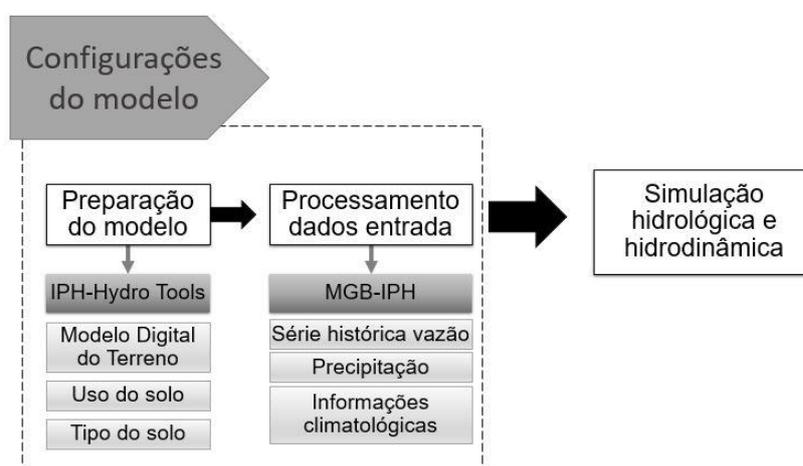


Figura 26 – Procedimentos da etapa de configurações do modelo.

Realizando o processamento do MDT com os meandros recuperados no programa computacional *IPH-Hydro Tools*, foi definida a rede de drenagem. Posteriormente, efetuou-se a segmentação da rede em trechos com distância mínima de 5.000 m, resultando em 650 minibacias.

Para geração das CRHs foram combinados o mapa de tipo de solo categorizado em raso, profundo e impermeável com o mapa de uso do solo resultando em um mapa com oito classes de resposta hidrológica (Figura 27):

1. Floresta + Solo raso;
2. Floresta + Solo profundo;
3. Agricultura e pastagem + Solo raso;
4. Agricultura e pastagem + Solo profundo;

5. Solo exposto + Solo raso;
6. Solo exposto + Solo profundo;
7. Impermeável;
8. Água.

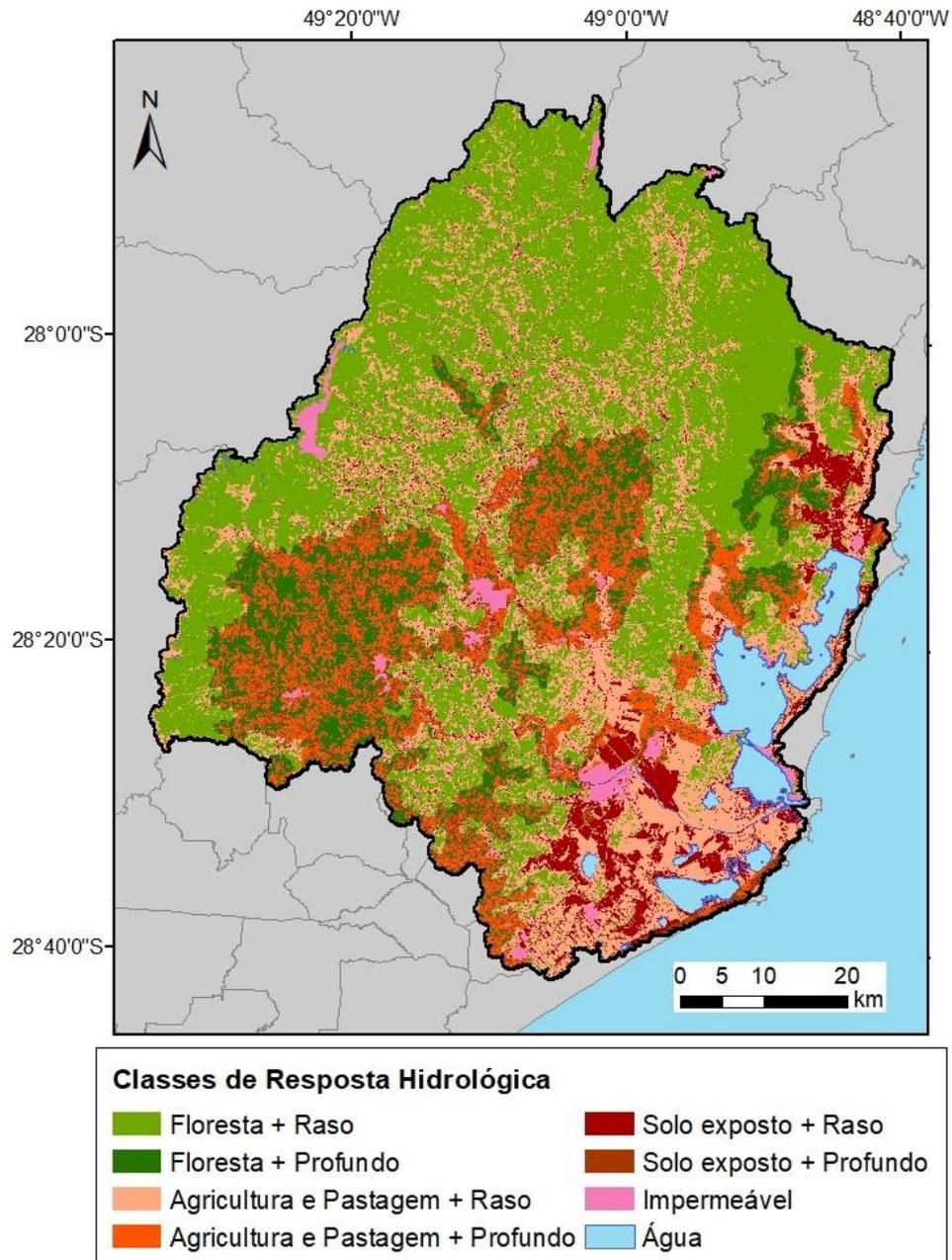


Figura 27 – Mapa das Classes de Resposta Hidrológica.

Para representação das seções transversais foi realizada a estimativa da largura e profundidade com base na área de drenagem empregando as equações 2 e 3 (Pontes et al., 2015): $W = a \cdot A^b$ e $D = c \cdot A^d$, onde W é a largura (m), D é a profundidade (m), A é área de drenagem (km^2) e a , b , c , d são coeficientes das

relações geomorfológicas. Os coeficientes das relações geomorfológicas foram obtidos com base nos dados de descarga líquida das estações fluviométricas localizadas nas áreas de contribuição obtidas no sistema de informações da Agência Nacional de Águas (SNIRH/ANA). Determinou-se a profundidade máxima das seções transversais observando apenas os dados consistidos. Caso esse valor não correspondesse à largura máxima, considerou-se o valor da área molhada máxima. A partir desses valores foram aplicadas as relações entre área de drenagem x largura e área de drenagem x profundidade e em seguida, realizou-se o ajuste potencial.

As relações estabelecidas para as sub-bacias do Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão apresentaram boa correlação. Enquanto que a sub-bacia do Rio Capivari resultou em uma baixa correlação, possivelmente, em virtude da pequena quantidade de dados disponíveis. Sendo assim, foram adotados os mesmos coeficientes das sub-bacias Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão para a sub-bacia do Rio Capivari. Os coeficientes utilizados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficientes das relações geomorfológicas (*a*, *b*, *c*, *d*) e correlação (R^2) obtida para os dados das sub-bacias do Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão.

Largura			Profundidade		
<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>c</i>	<i>d</i>	R^2
1,5835	0,5023	0,7919	0,2607	0,3295	0,7448

As profundidades estimadas a partir das relações geomorfológicas estabelecidas foram comparadas com os valores de profundidade medidos em campo pela ANA. Já as larguras estimadas foram verificadas a partir da análise de imagens de satélite. Essa análise foi importante pois as estações fluviométricas são alocadas em seções de controle que podem não representar adequadamente o canal. Analisando as imagens de satélites, ao longo do rio foram mensuradas as larguras e comparadas com os valores estimados. Dessa forma, identificou-se que a sub-bacia do Rio Capivari necessita um fator de correção para melhor representação de sua largura, assim os valores estimados de largura foram multiplicados por 0,5.

A definição do coeficiente de Manning para os trechos dos rios foi feita pelo método de Cowan que possibilita agregar ao valor correspondente ao material de fundo do canal (n_0), outras características de rugosidade por meio da aplicação de fatores de ajustes, tais como, irregularidade da superfície do canal (n_1), variação da forma e tamanho da seção transversal do canal (n_2), obstruções (n_3), vegetação (n_4),

alterações na forma e largura da seção transversal e um fator de correção para canais com meandros (m_5). Com base nas características do Rio Tubarão e nos valores dos fatores estimados por Cowan (1956) apud Dingman (2009), foram atribuídos os respectivos valores: 0,02, 0,002, 0,002, 0, 0,004 e 1,15, obtendo o coeficiente de Manning para o Rio Tubarão igual a 0,0322. O mesmo valor foi adotado ao Rio Capivari em virtude de suas similaridades.

Na aplicação do modelo ainda foram determinados os parâmetros de vegetação: albedo, índice de área foliar, altura média da cobertura vegetal e resistência superficial. Os valores assumidos no presente estudo, apresentados no Apêndice A, baseiam-se nas faixas de referência indicadas por Collischonn (2001).

Os dados de entrada requeridos pelo modelo consistem em dados climáticos, pluviométricos e fluviométricos, cujo detalhamento é apresentado nos itens a seguir. Os dados das estações de monitoramento foram interpolados espacialmente pelo método do inverso da distância ao quadrado considerando o centroide de cada minibacia (Pontes et al., 2015).

7.1.1 Dados climáticos

Os dados climáticos – temperatura, umidade, insolação, vento, pressão – foram obtidos por meio da base de dados interna MGB-IPH que apresenta as normais climatológicas para o Brasil cuja fonte é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Normal climatológica segundo definição da Organização Meteorológica Mundial se refere a valores médios calculados para um período longo e uniforme que considera, no mínimo, 30 anos consecutivos, na ausência da normal climatológica, o INMET pode calcular normais provisórias baseadas em observações correspondentes a um período mínimo de 10 anos (INMET, 2018).

Foram selecionadas quatro estações climatológicas, sendo duas dentro da área de estudo e duas na circunvizinhança, conforme coordenadas geográficas apresentadas na Tabela 11. A Figura 28 ilustra a distribuição espacial das estações cujos dados foram interpolados e usados como entrada para o modelo hidrológico.

Analisando as normais climatológicas sobre intensidade do vento, identificou-se a média anual de $2,57 \text{ m s}^{-1}$ para Laguna e $3,15 \text{ m s}^{-1}$ em Florianópolis. Esses valores são superiores aos obtidos em Urussanga, cujo valor médio anual foi de $1,43 \text{ m s}^{-1}$ e atingiu $0,83 \text{ m s}^{-1}$ em Orleans.

Tabela 11 – Estações climatológicas selecionadas.

Código	Estação climatológica	Latitude	Longitude
00083924	Laguna	-28,483	-48,800
00083923	Urussanga	-28,517	-48,317
00083922	Orleans	-28,333	-49,333
00083897	Florianópolis	-27,583	-48,567

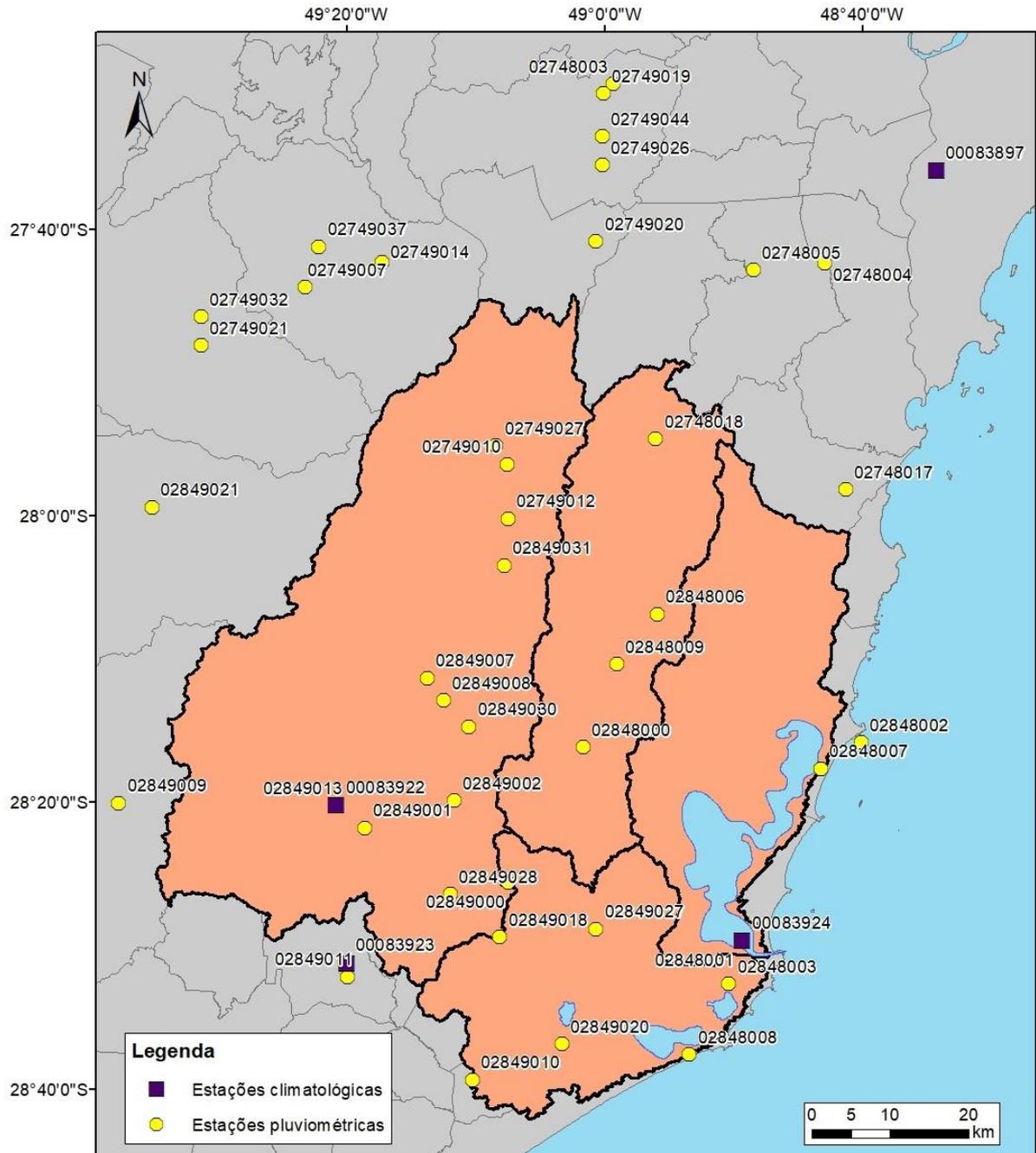


Figura 28 – Distribuição espacial das estações climatológicas e estações pluviométricas na área de estudo e entorno.

7.1.2 Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos foram obtidos da base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). Para o período selecionado de 1940 a 2004, 38 das 50 estações pluviométricas localizadas na área de estudo e proximidades possuem dados consistidos de precipitação em intervalo de tempo diário (Figura 29). Entre as 38 estações pluviométricas com dados, 24 delas se encontram dentro dos limites da bacia (Figura 27).

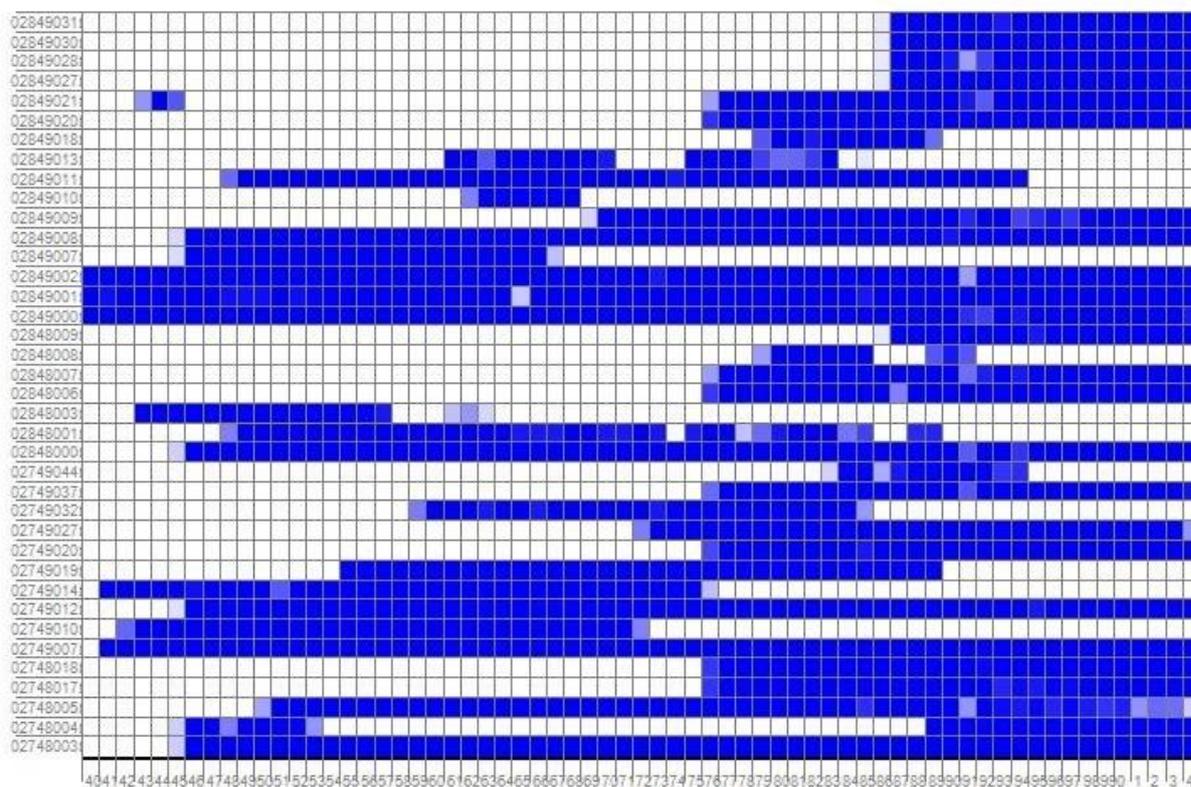


Figura 29 – Disponibilidade temporal dos dados de precipitação das estações localizadas na bacia hidrográfica e em seu entorno no período de 1940 a 2004.

7.1.3 Dados fluviométricos

Na base de dados do SNIRH, portal Hidroweb da ANA foi possível obter séries diárias de vazão resultantes de uma relação entre nível d'água (cota) e vazão (descarga líquida), também denominada curva-chave, elaborada pela ANA. O uso desses dados se aplicou nas etapas da calibração e validação do modelo hidrológico. Assim, os postos escolhidos devem ter séries históricas mais longas e com poucas

falhas, preferencialmente localizado nas proximidades do exutório e com área de drenagem igual ou superior a 1.500 km², pois o modelo tende a apresentar melhores resultados na calibração quando consideradas estações fluviométricas que controlam áreas de drenagem maiores (Collischonn et al., 2007) e as áreas de montante, em geral, apresentam rápida resposta hidrológica em virtude da baixa capacidade de armazenamento decorrente de sua geologia predominantemente rochosa (Monte et al., 2016).

O levantamento das estações fluviométricas inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar apontou 25 postos considerando o período de 1940 a 2004. A Figura 30 ilustra a distribuição espacial desses postos, indicando uma concentração no centro da bacia hidrográfica, com pouco monitoramento nas cabeceiras.

Na caracterização das estações fluviométricas, Tabela 12, nota-se que as estações da sub-bacia Baixo Tubarão apresentam maior área de drenagem. Entretanto, pela proximidade com a zona costeira, as estações localizadas próximo a foz podem estar sob efeito de remanso em decorrência das marés, de modo que a vazão não está somente relacionada a ocorrência de precipitação no sistema, mas também pela condição de contorno de jusante. Portanto, a influência do efeito de remanso no Rio Tubarão (D'Aquino et al., 2011; Loitzenbauer e Mendes, 2016) inviabiliza o uso das estações fluviométricas localizadas a jusante da área central do município de Tubarão para calibração e validação do modelo.

Tabela 12 – Informações das estações fluviométricas.

Código	ID	Nome da estação	Rio	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)	Anos sem falhas
84249998	1	Orleans - Montante	Tubarão	-28,36	-49,30	599	14
84250000	2	Orleans II	Tubarão	-28,35	-49,28	606	27
84250008	3	Orleans I	Tubarão	-28,35	-49,28	606	14
84269000	4	PCH Rio Palmeiras II Montante	Palmeiras	-28,41	-49,29	124	0
84270000	5	PCH Rio Palmeiras I Jusante	Palmeiras	-28,42	-49,25	124	0
84300000	6	Pedras Grandes	Tubarão	-28,43	-49,18	822	9
84500000	7	Povoamento	Povoamento	-27,92	-49,12	139	24
84520000	8	Divisa de Anitápolis	Braço do Norte	-28,00	-49,12	380	60

Continuação da Tabela 12 – Informações das estações fluviométricas

Código	ID	Nome da estação	Rio	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)	Anos sem falhas
84520010	9	Santa Rosa de Lima	Braço do Norte	-28,03	-49,12	676	14
84541000	10	Grão Pará	Braço Esquerdo	-28,18	-49,22	158	21
84551000	11	Rio Pequeno	Pequeno	-28,21	-49,20	379	45
84559800	12	Rio Braço do Norte Montante	Braço do Norte	-28,24	-49,16	1.515	14
84560000	13	São Ludgero I	Braço do Norte	-28,33	-49,18	1.690	23
84560002	14	São Ludgero II	Braço do Norte	-28,32	-49,15	1.560	41
84580000	15	Rio do Pouso	Tubarão	-28,42	-49,11	2.740	60
84580500	16	Tubarão	Tubarão	-28,47	-48,99	2.840	11
84581000	17	Tubarão – Esc. Fiscalização obras	Tubarão	-28,47	-48,99	2.840	0
84581005	18	Tomada d'água Us. Faz. Cruzeiro	Tubarão	-28,47	-49,03	2.830	0
84597998	19	São Martinho - montante	Capivari	-28,17	-48,97	619	0
84598000	20	São Martinho	Capivari	-28,17	-48,97	619	5
84598002	21	São Martinho - jusante	Capivari	-28,17	-48,97	620	20
84599000	22	ETA CASAN - Imbituba	D'Una	-28,11	-48,75	196	0
84600000	23	Armazém Capivari	Capivari	-28,26	-49,01	770	49
84601000	24	Tomada d'água Usina Jorge Lacerda	Tubarão	-28,47	-49,00	2.840	0
84680000	25	Usina Jorge Lacerda BR - 101	Capivari	-28,42	-49,00	1.020	0

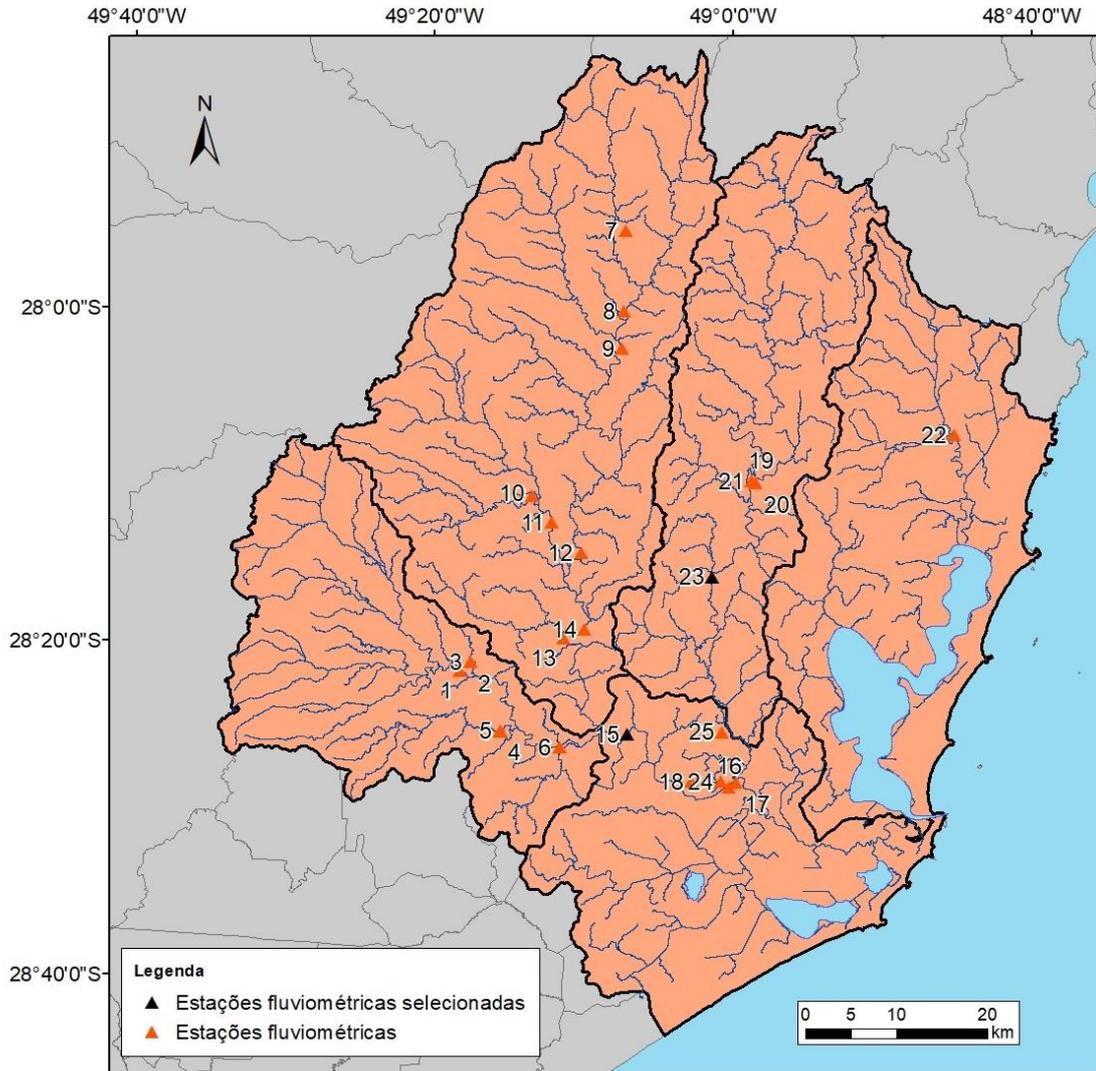


Figura 30 - Localização das estações fluviométricas existentes na área de estudo com destaque para as estações fluviométricas selecionadas para calibração e validação do modelo hidrológico.

Na sub-bacia do Rio D'Una, apenas uma estação fluviométrica foi identificada e apresenta área de drenagem inferior a 200 km². Analisando a disponibilidade temporal desse posto, Figura 31, evidenciou-se a falta de dados. Logo, essa sub-bacia não apresentou dados suficientes para uso na etapa de calibração e validação.

Analisando conjuntamente a caracterização (Tabela 12) e a disponibilidade temporal (Figura 31) das estações fluviométricas do Rio Capivari, identificou-se que a estação código 84680000 apresenta maior área de drenagem, entretanto não possuía dados no período de 1940 a 2004. A estação 84600000 apresentou uma série histórica com 59 anos de dados consistidos entre 1942 a 2002 com apenas um ano sem dados disponíveis e dez anos com dados parcialmente disponíveis. Apesar de sua área de drenagem ser inferior a 1.500 km², essa estação foi empregada para calibração e

validação do modelo hidrológico para o Rio Capivari visto a inexistência de outra opção.

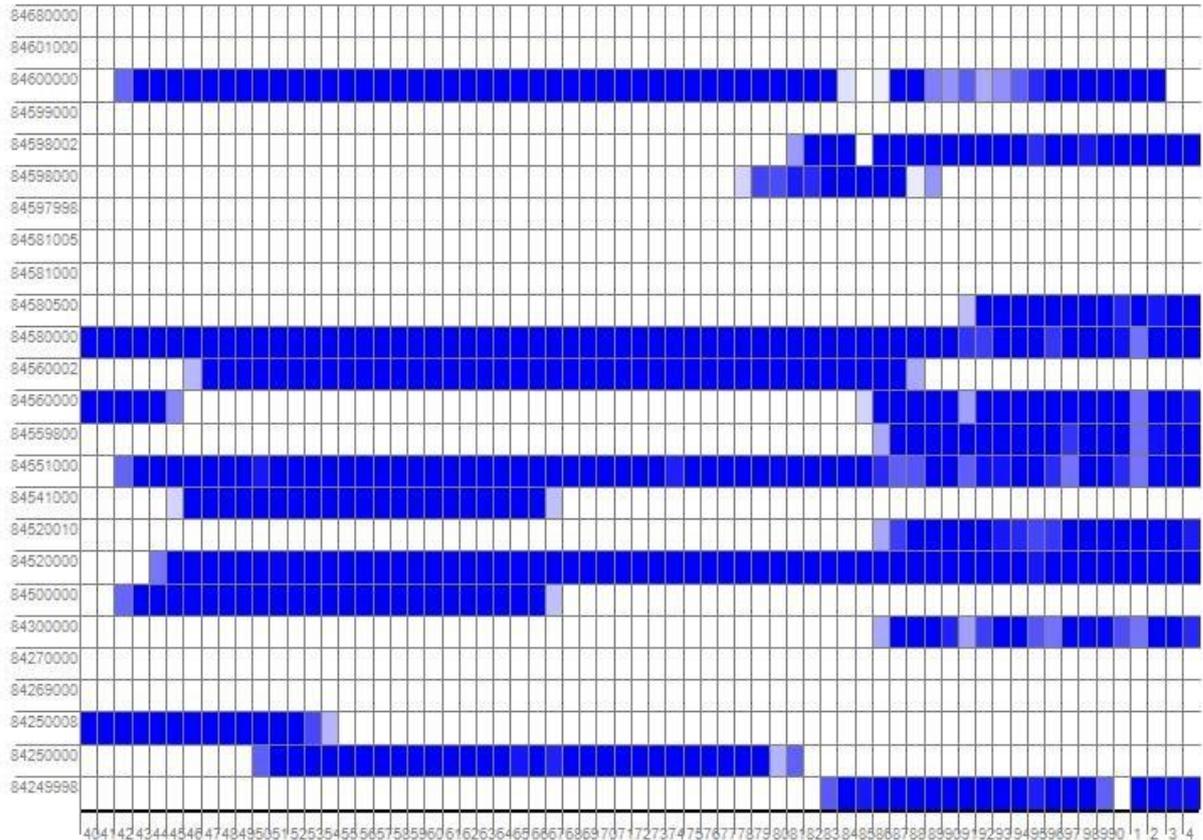


Figura 31 - Disponibilidade temporal dos dados de vazão das estações fluviométricas no período de 1940 a 2004: sendo azul indicativo de ano completo, branco de dados indisponíveis no ano e cores intermediárias representam anos com falhas.

Na sub-bacia Rio Braço do Norte, a estação 84560002 apresenta área de drenagem superior a 1.500 km² e uma série histórica com 41 anos de dados completos disponíveis. No entanto, esses dados se limitam de 1947 a 1987. Já na sub-bacia Formadores do Rio Tubarão, a estação com maior série histórica é a 84250000 com dados entre 1951 a 1979 e área de drenagem de 606 km². A contribuição de ambas sub-bacias é monitorada pela estação fluviométrica 84580000. Essa estação se localiza no Rio Tubarão, não está sob efeito de remanso, apresenta 60 anos de dados distribuídos de 1940 a 2004 e sua área de drenagem é superior a 2.500 km². Levando em consideração maior área de drenagem da estação fluviométrica 84580000 e a distribuição temporal de seus dados, optou-se por unificar ambas sub-bacias na calibração e validação do modelo hidrológico e usar essa estação como dado observado para o Rio Tubarão.

Portanto, a calibração e a validação do modelo hidrológico contemplaram as áreas de contribuição do município de Tubarão: sub-bacias do Rio Braço do Norte, Formadores do Rio Tubarão e do Rio Capivari. A estação fluviométrica 84580000, também identificada como ID 15, foi empregada na comparação com os resultados simulados para as duas primeiras sub-bacias, enquanto a estação fluviométrica 84600000, ID 23, para o Rio Capivari (Figura 30).

7.2 RECONSTRUÇÃO HIDROLÓGICA

Para o presente estudo, a reconstrução hidrológica seguiu o fluxograma da Figura 32. Inicialmente, foi realizada a calibração do modelo considerando a série histórica entre 1980 a 2004 e as análises de desempenho mencionadas no item 5.2.1. Em seguida, aplicou-se o mesmo conjunto de parâmetros para o período contendo o ano do evento e foram aplicadas as mesmas análises estatísticas para a série histórica entre 1940 a 1979. Visando avaliar a representação de eventos de cheia, foi analisado o PBIAS para os dez maiores eventos do período de validação, exceto o evento de 1974. Os resultados obtidos nessa etapa são apresentados nos itens a seguir.

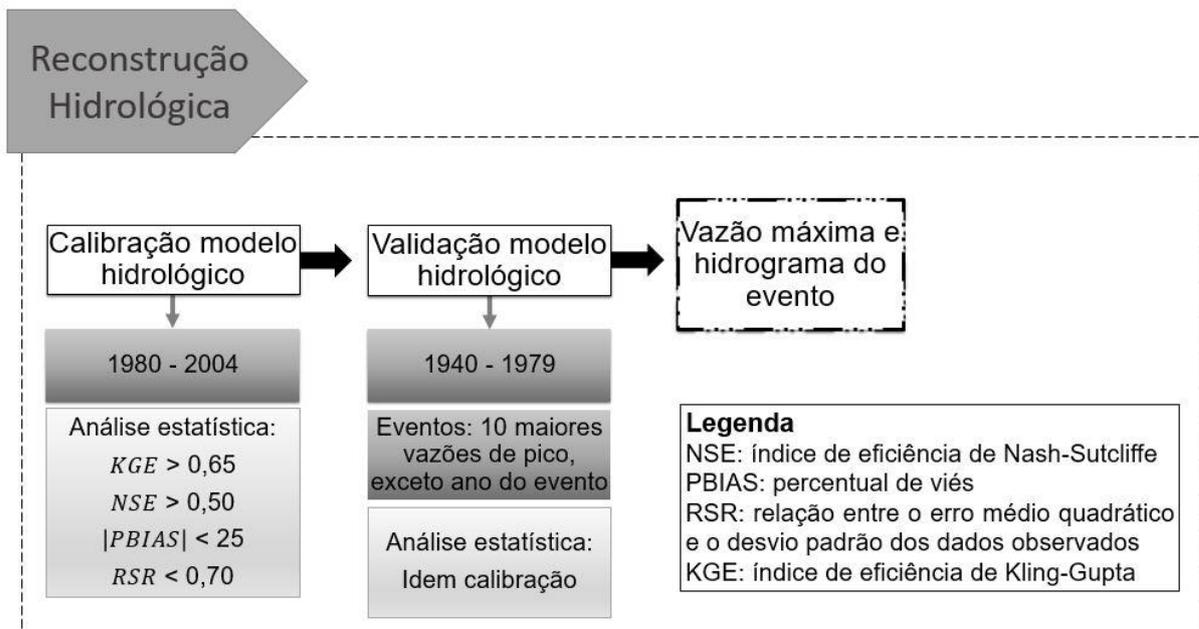


Figura 32 - Reconstrução hidrológica do evento de 1974 em Tubarão, SC.

7.2.1 Calibração e validação do modelo

A calibração do modelo foi realizada manualmente, alterando os valores dos parâmetros de solo considerando as características das CRH em um processo iterativo até obter o ajuste desejável. Os parâmetros de solo passíveis de calibração são: armazenamento máximo na camada do solo (Wm), parâmetro adimensional de não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo (b), parâmetro de escoamento subsuperficial ($Kint$) e subterrâneo ($Kbas$), coeficientes de retardo do reservatório superficial (CS), subsuperficial (CI) e subterrâneo (CB), índice de porosidade do solo (XL), fluxo ascendente de retorno ao solo (CAP), limite de armazenamento para ocorrer fluxo ascendente (Wc) (Collischonn, 2001). O conjunto de valores dos parâmetros de solo obtidos no presente estudo para cada sub-bacia são apresentados no Apêndice B.

A calibração e a validação do modelo hidrológico foram realizadas para as áreas de contribuição para o município de Tubarão. Levando em consideração as análises realizadas no item 7.1.3, foram empregadas duas estações fluviométricas, sendo a de código 84580000 para a sub-bacia Rio Braço Norte e Formadores do Rio Tubarão e a outra, código 84600000, para a sub-bacia do Rio Capivari.

A calibração do modelo foi realizada para o período de 1980 a 2004, visando não incluir o ano do evento nessa etapa. Em virtude de falhas, os anos de 2003 e 2004 não foram avaliados para a sub-bacia do Rio Capivari. Já a etapa de validação foi realizada para o período de 1940 a 1979, sendo que para a sub-bacia do Rio Capivari os anos de 1940 a 1942 foram excluídos em virtude da falta de dados.

A comparação entre os valores observados e simulados foi realizada por meio de visualização dos hidrogramas e a aplicação de estatísticas de desempenho e classificação conforme Tabela 1. O objetivo da calibração e validação era atingir desempenho “Bom” ou superior para o KGE e “Satisfatório” ou superior para as demais estatísticas.

A Tabela 13 apresenta os resultados das estatísticas para as etapas de calibração e validação com a respectiva classificação de desempenho. O KGE apresentou valor superior a 0,75, equivalente a “Muito bom”, para ambas sub-bacias tanto para calibração quanto para validação. Já o NSE variou entre desempenho “Bom” e “Satisfatório”. O resultado do KGE ser superior ao NSE era esperado pois a calibração priorizou a representação dos picos de vazão (Mizukami et al., 2018). O

valor do *PBIAS* positivo indica que o modelo está subestimando em relação à média dos observados, exceto para a validação da sub-bacia do Rio Capivari.

Tabela 13 – Análises estatísticas com classificação de desempenho.

Sub-bacia Rio do Braço Norte e Formadores do Rio Tubarão			Sub-bacia do Rio Capivari		
Estatística	Calibração	Validação	Estatística	Calibração	Validação
KGE	0,84 (Mb)	0,80 (Mb)	KGE	0,81 (Mb)	0,82 (Mb)
NSE	0,69 (B)	0,62 (S)	NSE	0,64 (S)	0,65 (B)
PBIAS	5,89 (Mb)	2,71 (Mb)	PBIAS	8,00 (Mb)	-3,43 (Mb)
RSR	0,56 (B)	0,62 (S)	RSR	0,60 (B)	0,59 (B)

*Mb: “Muito bom”, B: “Bom”, S: “Satisfatório”, I: “Insatisfatório”

Após a calibração e validação contínua foi verificado se a representação de eventos de cheias estava satisfatória quanto ao volume dos hidrogramas. Para cada uma das sub-bacias, os máximos anuais observados entre 1940 a 1979 foram organizados em ordem decrescente, excetuando-se dessa análise o ano de 1974. Definidos os dez eventos de máxima, os hidrogramas simulados e observado foram comparados a fim de determinar o *PBIAS*. Para as sub-bacias Rio do Braço Norte e Formadores do Rio Tubarão, quatro hidrogramas de evento apresentam desempenho insatisfatório quanto ao *PBIAS* (Tabela 14), enquanto que para sub-bacia do Rio Capivari, três eventos apresentaram desempenho insatisfatório quanto ao *PBIAS* (Tabela 15).

Tabela 14 – Análises estatísticas para validação de eventos de máxima para a Sub-bacia Rio do Braço Norte e Formadores do Rio Tubarão.

Ano	Vazão de pico		PBIAS
	Observado	Simulado	
Mar/1963	1.177,5	1.040,6	28,80 (I)
Ago/1977	1.145,0	1.614,0	-40,48 (I)
Abr/1948	1.112,5	778,0	14,93 (B)
Fev/1971	1.105,0	1.156,2	-8,17 (Mb)
Mar/1960	977,5	624,1	-2,35 (Mb)
Jul/1973	977,5	923,6	-13,92 (B)
Dez/1972	967,5	805,7	20,28 (S)
Fev/1967	922,5	540,7	40,62 (I)
Ago/1965	897,5	1.509,4	-62,24 (I)
Mar/1958	845,0	605,0	21,15 (S)

*Mb: “Muito bom”, B: “Bom”, S: “Satisfatório”, I: “Insatisfatório”

Para as sub-bacias referentes ao Rio Tubarão, seis dos dez eventos de máxima apresentaram *PBIAS* classificado com desempenho igual ou acima de

satisfatório de acordo com Moriasi et al., (2007). Enquanto que seguindo a mesma classificação, a sub-bacia do Rio Capivari apresentou sete dos dez eventos com PBIAS satisfatório ou superior. As vazões máximas observadas variam na faixa de 800 a 1.200 m³s⁻¹. Os hidrogramas simulados e observados são ilustrados na Figura 33 e na Figura 34. A visualização dos hidrogramas simulados e observados do Rio Tubarão permitiu observar que a ascensão, o pico e a recessão foram bem representados pelo modelo. A superestimativa ou subestimativa do modelo em relação ao dado observado pode ser justificada por fatores não representados pelo modelo em decorrência, por exemplo, de falhas nos registros, pois observou-se que para vazões similares, o modelo superestimou o evento de Agosto/1977, enquanto apresentou representação satisfatória para o evento de Março/1963.

Tabela 15 – Análises estatísticas para validação de eventos de máxima para a Sub-bacia Rio Capivari.

Ano	Vazão de pico		PBIAS
	Observado	Simulado	
Mar/1960	221,3	186,1	24,13 (S)
Mar/1963	140,5	126,1	17,53 (S)
Out/1959	139,5	118,2	-3,45 (Mb)
Mar/1954	139,0	233,0	-20,60 (S)
Out-Nov/1958	138,4	128,2	-3,82 (Mb)
Fev/1967	138,4	52,6	47,84 (I)
Ago/1977	137,4	223,5	-44,85 (I)
Mai/1976	136,6	99,1	13,25 (B)
Fev/1973	135,4	97,3	24,29 (S)
Jul/1948	134,2	20,0	33,64 (I)

*Mb: “Muito bom”, B: “Bom”, S: “Satisfatório”, I: “Insatisfatório”

Na sub-bacia do Rio Capivari identificou-se que nove das dez máximas apresentaram vazão de pico entre 134,2 a 140,5 m³s⁻¹, porém o desempenho variou de “Insatisfatório” até “Muito bom”. Os hidrogramas dos eventos de máximas simulados e observados são demonstrados na Figura 35 e Figura 36, sendo possível observar comportamento similar na ascensão, pico e recessão dos hidrogramas, exceto para o evento de 1959 que o pico simulado encontra-se atrasado em relação ao observado. O evento de Julho/1948 não foi representado pelo modelo. Esse resultado, assim como as subestimativas ou superestimativa do modelo, podem indicar falhas nos registros de precipitação, ou ainda fatores não representados pelo modelo que podem influenciar os resultados simulados.

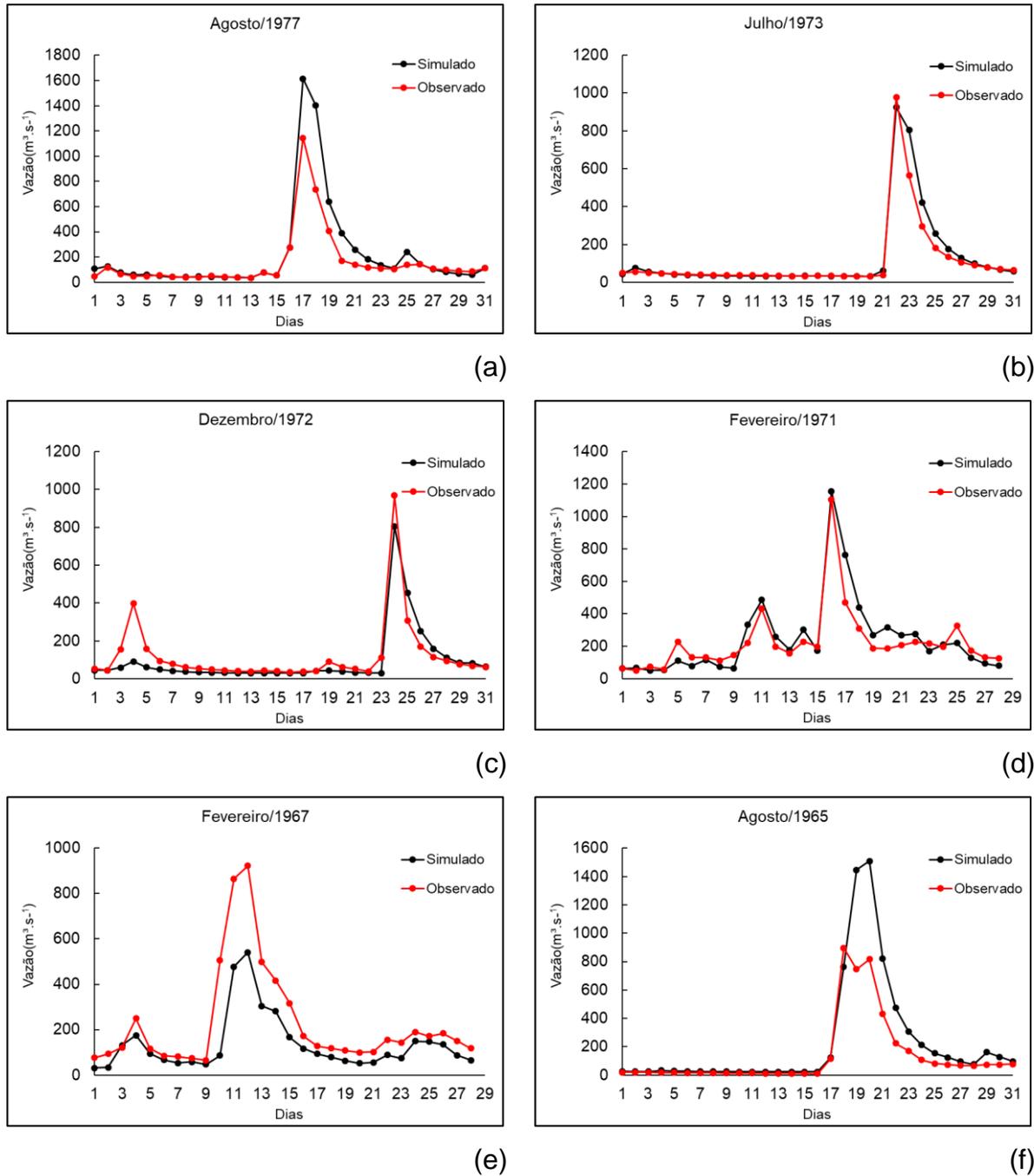
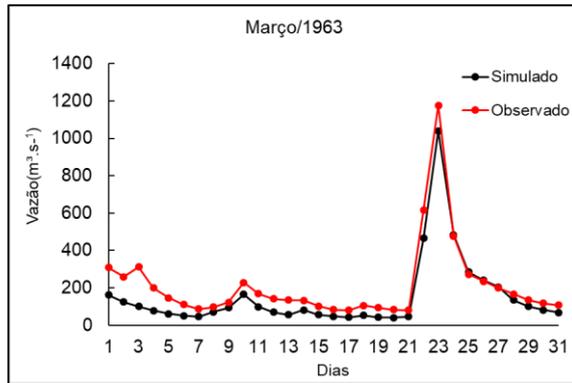
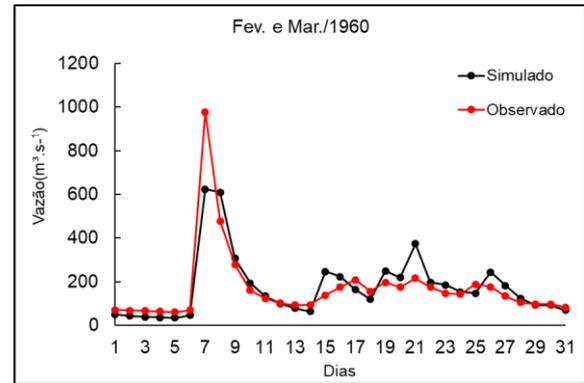


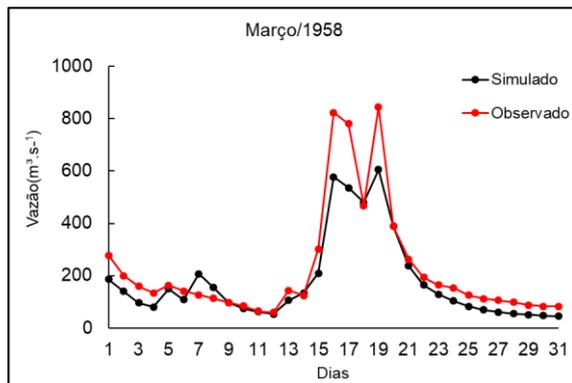
Figura 33 - Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Tubarão: (a) Agosto/1977; (b) Julho/1973; (c) Dezembro/1972; (d) Fevereiro/1971; (e) Fevereiro/1967; (f) Agosto/1965.



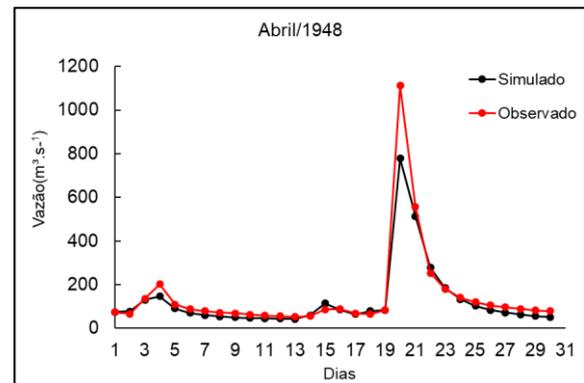
(g)



(h)

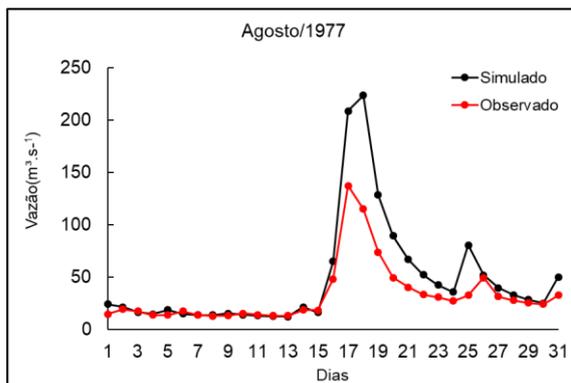


(i)

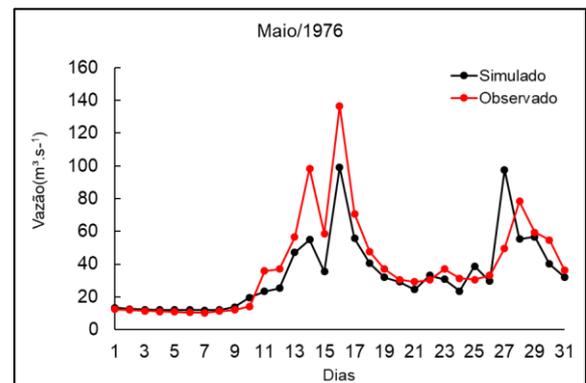


(j)

Figura 34 - Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Tubarão: (g) Março/1963; (h) Fevereiro e Março/1960; (i) Março/1958; (j) Abril/1948.



(a)



(b)

Figura 35 - Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Capivari: (a) Agosto/1977; (b) Maio/1976.

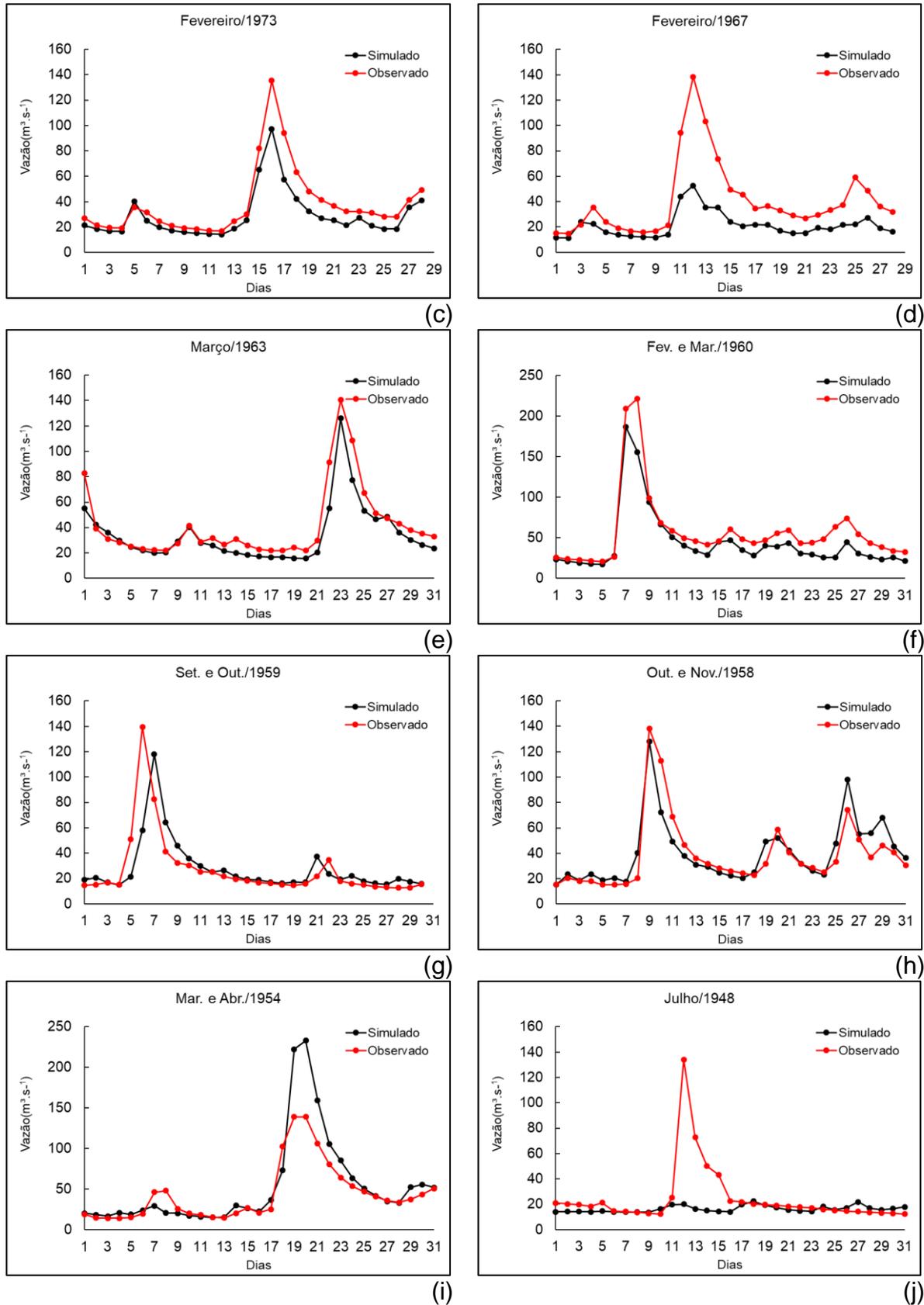


Figura 36 – Hidrogramas dos eventos de máxima do Rio Capivari: (c) Fevereiro/1973; (d) Fevereiro/1967; (e) Março/1963; (f) Fevereiro e Março/1960; (g) Setembro e Outubro/1959; (h) Outubro e Novembro/1958; (i) Março e Abril/1954; (j) Julho/1948.

Analisando todas as estatísticas aplicadas e a classificação de desempenho adotada, acredita-se que o modelo foi satisfatoriamente calibrado e validado para a área de estudo. Portanto, apesar de todas as alterações ocorridas ao longo do tempo, como por exemplo, ocupação e uso do solo, considera-se o modelo capaz de representar a transformação chuva em vazão de eventos ocorridos na sub-bacia Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão e na sub-bacia Rio Capivari, inclusive do evento de 1974.

7.2.2 Estimativa do hidrograma e da vazão máxima

Utilizando os dados de precipitação e vazão das estações de monitoramento, o modelo hidrológico foi calibrado e validado. As análises estatísticas empregadas apontaram desempenho adequado do modelo no processo de transformação da chuva em vazão, inclusive para eventos de cheia.

O período de validação contemplou o ano de 1974 de modo que foi possível estimar o hidrograma e a vazão de pico da inundação de 1974. Comparando com os dados das estações fluviométricas, para maiores áreas de drenagem se obteve melhor representação dos hidrogramas do que em locais próximos a montante. O Rio Tubarão é o principal curso d'água que contribui para o município de Tubarão, em seu hidrograma simulado (Figura 37) se observou que o pico está atrasado em relação ao hidrograma observado. Isso pode ser justificado pela incoerência entre os registros da precipitação e da vazão provenientes das estações de monitoramento. Os dados de precipitação usados no modelo hidrológico apontaram a ocorrência do maior volume precipitado no dia 25/03/1974, enquanto que o registro de vazão máxima foi feito no dia 24/03/1974.

A vazão máxima observada foi $1.307,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no dia 24/03/1974, enquanto a vazão máxima simulada correspondeu a $1.706,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no dia 25/03/1974. Essa superestimativa em relação ao dado observado pode ser justificada pelas incertezas da medição do nível da água e da extrapolação da curva-chave.

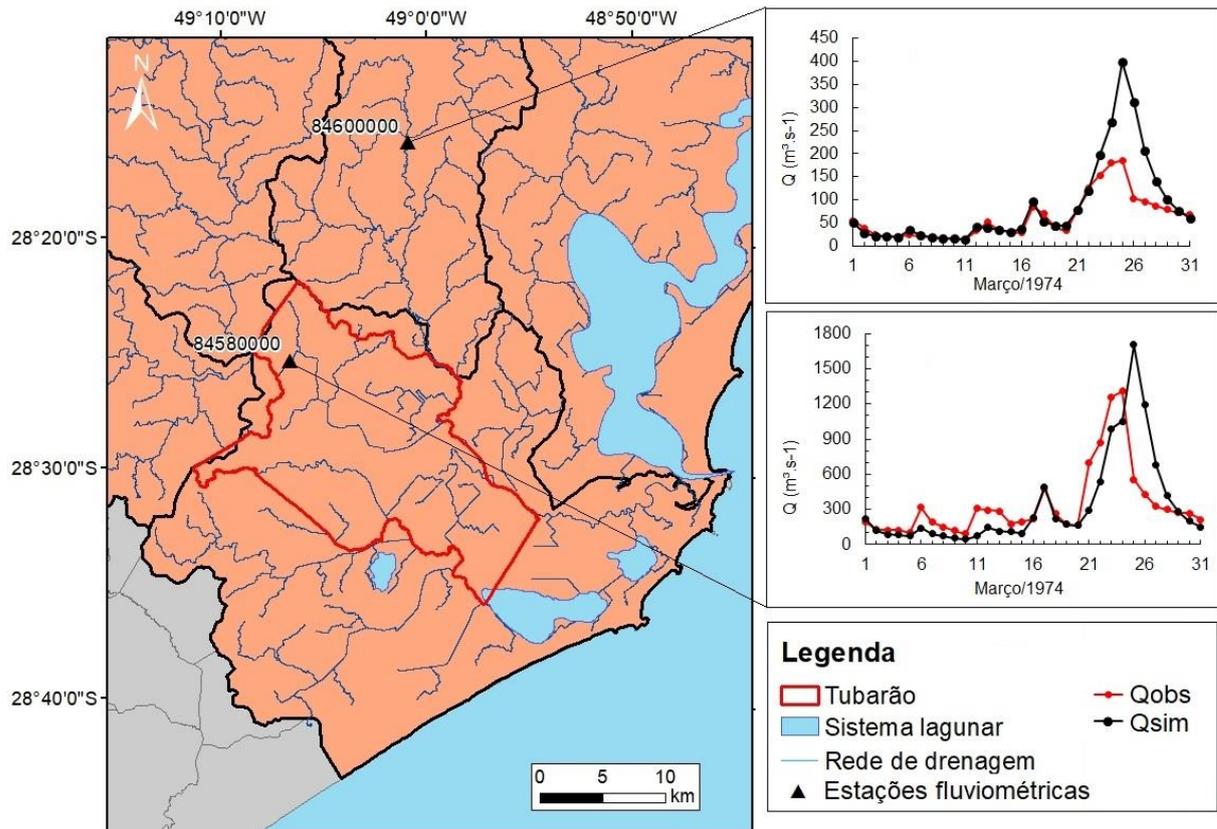


Figura 37 – Hidrogramas observados (código 84580000 e 84600000) e simulados (Rio Tubarão e Rio Capivari) para o evento de 1974 e localização em relação ao município de Tubarão.

O hidrograma de cada minibacia resultante dessa etapa serviram como condição de contorno para a reconstrução hidrodinâmica. A área de enfoque do presente estudo se refere ao município de Tubarão, assim os hidrogramas do Rio Capivari e do Rio Tubarão foram considerados as condições de contorno de montante.

7.3 RECONSTRUÇÃO HIDRODINÂMICA

A reconstrução hidrodinâmica tem por objetivo estimar os fatores que resultam na área inundada simulada compatível com os dados de referência. Aplicando a metodologia proposta para reconstrução hidrodinâmica (Figura 5) para o presente estudo, obteve-se o fluxograma apresentado na Figura 38.

Inicialmente, foi avaliada a influência da condição de contorno a montante, ou seja, a transformação da chuva registrada pelas estações pluviométricas em vazão. Essa etapa é necessária para compreender o papel dos processos fluviais na bacia hidrográfica em estudo.

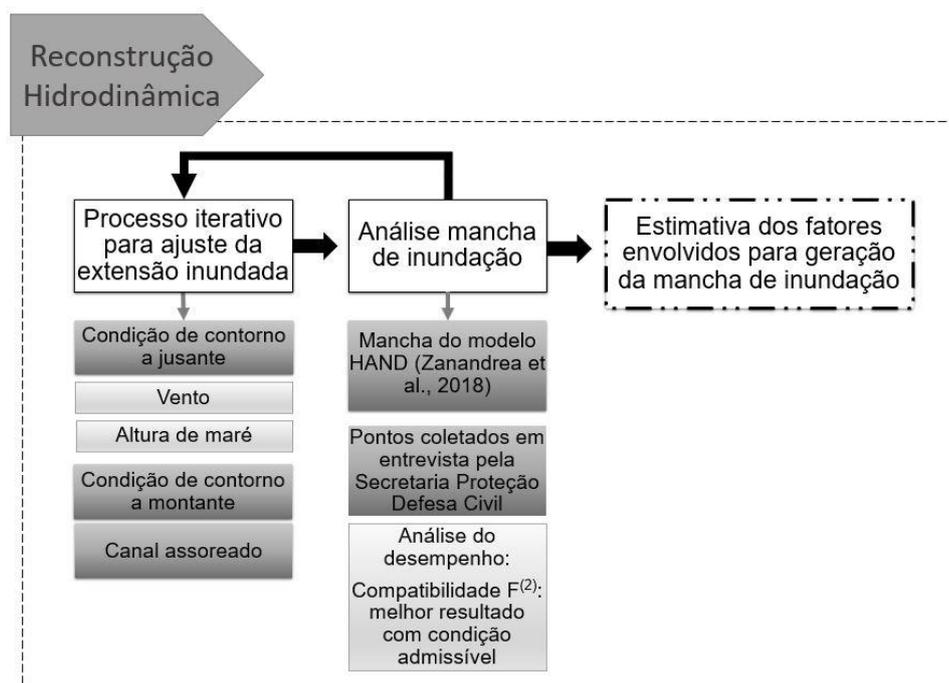


Figura 38 - Reconstrução hidrodinâmica do evento de 1974 em Tubarão, SC.

Em seguida, sendo desconhecida a altura da maré ocorrida no evento, foram testados valores identificados na literatura como condição de contorno a jusante. Em virtude de registros históricos, foram também simulados cenários que além da altura da maré consideram a direção e velocidade do vento como condição de contorno a jusante.

Para cada cenário simulado, o resultado foi comparado com a mancha resultante do modelo HAND (Zanandrea et al., 2018) e com os pontos coletados pela Secretaria da Proteção e Defesa Civil pela aplicação da medida denominada $F^{(2)}$ proposta por Horrit et al. (2010), no presente trabalho nomeada como compatibilidade. As áreas inundadas simuladas com os cenários propostos não foram suficientes para afetar as áreas apontadas nos dados de referência. Testes com valores de altura de maré excepcionais, acima de 5 m, foram necessários para melhor representação das áreas inundadas. Com esses resultados evidencia-se que os dados de precipitação foram subestimados, visto que valores extremamente elevados de altura de maré testados ainda não representariam as áreas inundadas do evento de 1974.

O acréscimo no valor da precipitação registrada pela rede hidrometeorológica resultou em acréscimo na vazão em decorrência da modelagem hidrológica aplicada no presente estudo. A alteração nos dados de chuva pode ser embasada

considerando: (i) número insuficiente de estações pluviométricas resultando em dados insuficientes para representação da chuva ocorrida durante o evento; (ii) o método de interpolação inadequado; e, (iii) registro do pluviômetro subestimado, especialmente, em condições com vento que impede a chuva de se depositar no medidor em decorrência da turbulência (McMillan et al. 2018).

A ocorrência de movimentos de massa ocorrido no evento de 1974 (Bigarella, 1975; Kobiyama et al.; 2015) também corrobora para a hipótese de precipitações subestimadas. Um dos principais agentes deflagradores de movimentos de massa são as chuvas intensas de curta duração ou chuvas de longa duração que fornecem condições propícias para reduzir a resistência do solo (Guidicini e Wasa, 1976).

Outra hipótese pode ser sugerida considerando os registros históricos que apontam o mês de março de 1974 como um mês chuvoso. Assim, o aporte de sedimentos em decorrência de precipitações anteriores ao evento pode ter provocado a redução da profundidade do canal nos trechos próximo a foz do Rio Tubarão.

Os cenários simulados são apresentados com detalhamento nos itens a seguir.

7.3.1 Área inundada sem influência da maré

O primeiro cenário proposto, Cenário 1, tem o objetivo de identificar o papel da precipitação gerada na etapa de reconstrução hidrológica para geração das áreas inundadas do evento de 1974. O Cenário 1 considerou a propagação dos hidrogramas gerados a partir dos dados interpolados das 15 estações pluviométricas elencadas na Tabela 3 como condição de contorno a montante. A condição de contorno a jusante adotada foi correspondente ao nível do mar.

Os trechos da rede de drenagem, utilizados para definir a discretização em minibacias, se referem ao canal meandrante recuperado. As seções transversais representadas por seções retangulares com larguras e profundidades foram determinadas por equações geomorfológicas em relação a área de drenagem descritas no item 6.3.

Analisando o período do evento, 22 a 26/03/1974, observou-se que a extensão da área inundada foi crescente, atingindo o maior valor no dia 26/03/1974 correspondente a 715,7 km², cerca de 13% da área da bacia hidrográfica. O resultado

da simulação apontou o decréscimo da área inundada no dia 27/03/1974. A intervenção humana para escoamento das águas não foi representada nesse estudo.

Os resultados indicam que a área mais afetada pelo evento se encontra na sub-bacia do Baixo Tubarão, a jusante do Rio Tubarão, atingindo os municípios de Tubarão, Capivari de Baixo, Jaguaruna, Laguna e Gravatal (Figura 39). O município de Capivari de Baixo na data do evento pertencia ao município de Tubarão. No entorno da Lagoa Imaruí e Santo Antônio existem algumas áreas inundadas, afetando os municípios de Imaruí e Imbituba.

Como os dados de referência não compreendem toda a bacia hidrográfica, as análises de desempenho se restringem aos limites municipais atuais de Tubarão, cujo território é de aproximadamente 302 km². A maior extensão de área inundada no Cenário 1 é de 110 km², enquanto que a área sujeita a inundação pelo HAND corresponde a 135 km².

Os resultados indicam que a vazão resultante da precipitação registrada pela rede hidrometeorológica está associada a mais de 80% da área inundada, porém ainda não é suficiente para atingir a área estimada pelo HAND. Em comparação com os pontos obtidos pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão, os resultados simulados apresentam desempenho de apenas 31% na representação da inundação. A Figura 40 enfoca na área central do município de Tubarão ilustrando os resultados simulados em comparação com os dados de referência.

Os resultados do Cenário 1 sugerem que a condição de contorno a montante foi o fator de influência mais relevante para determinação das áreas inundadas. Essa hipótese pode ser corroborada por D'Aquino et al. (2011) que afirmam que estuários geomorfologicamente similares ao do Rio Tubarão respondem primeiramente a forçante fluvial. A subestimativa da área inundada no Cenário 1 confirmou a necessidade de incluir os fatores de influência a jusante para compreender as interações.

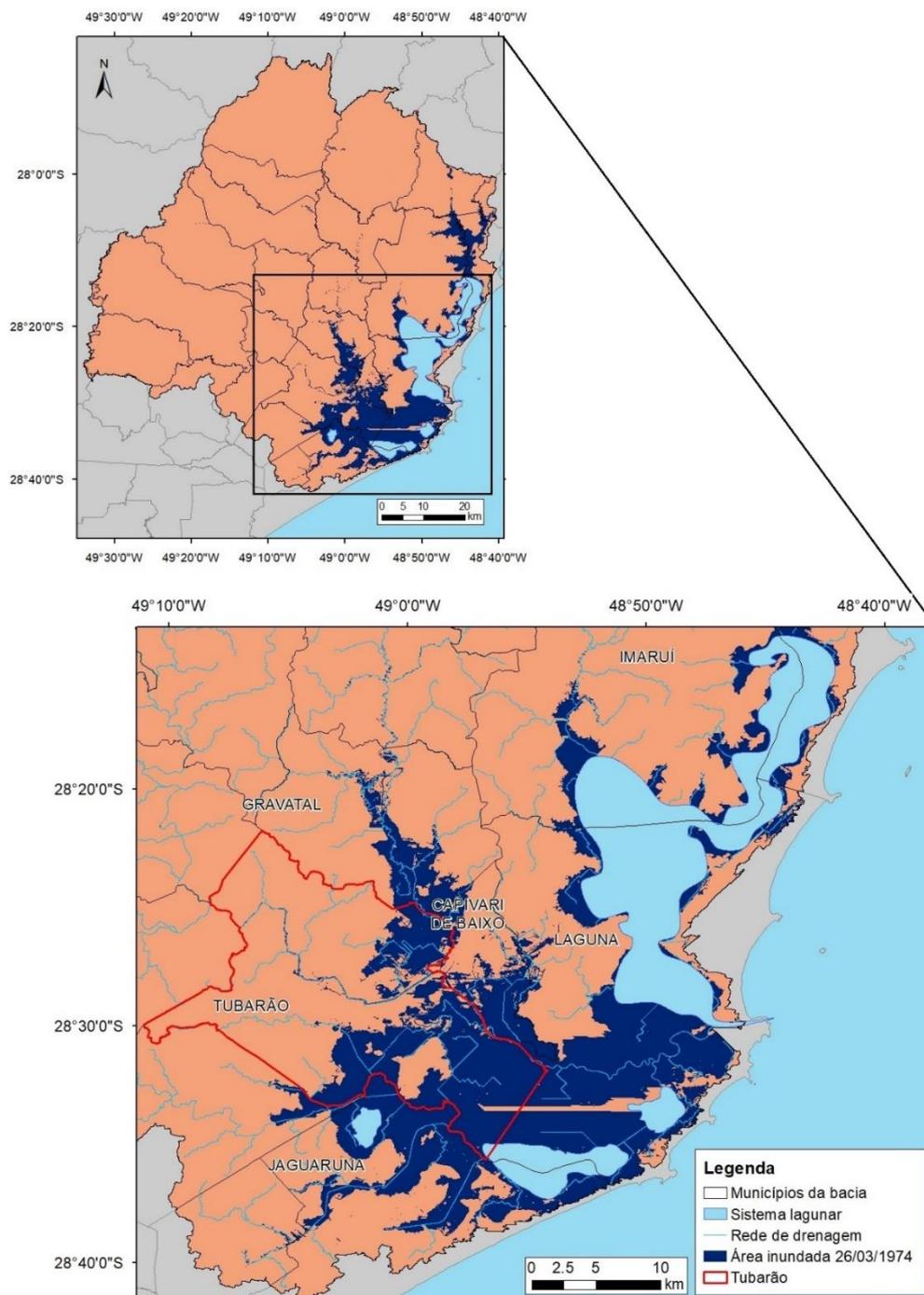


Figura 39 – Máxima área inundada do Cenário 1 para o período do evento com detalhe para o município de Tubarão e circunvizinhança.

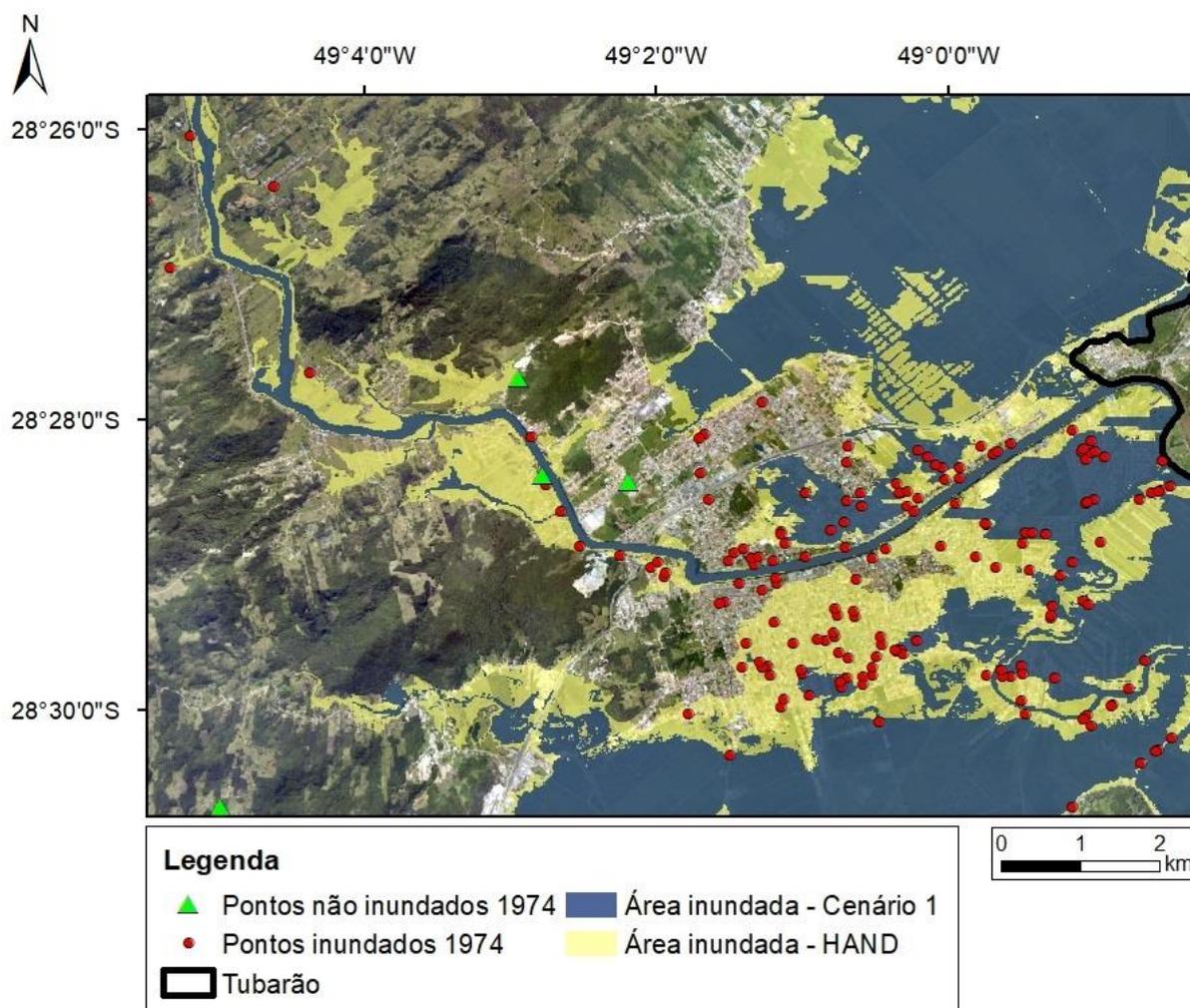


Figura 40 – Comparação das áreas inundadas no Cenário 1, mancha do HAND e pontos levantados em campo.

7.3.2 Área inundada com influência de maré

Os cenários aqui propostos mantiveram a mesma condição de contorno a montante descrita no Cenário 1. Já a condição de contorno a jusante assumiu uma altura da maré adicionada ao nível do mar. Foi assumido que a altura da maré se refere a um valor constante no exutório da bacia hidrográfica. Devido à ausência de dados de maré do ano do evento, foram realizadas simulações com o valor de 1,0 m referente a uma altura máxima obtida por Monte et al. (2017) e 3,0 m equivalente a uma altura de maré extrema, resultando os Cenários 2 e 3, respectivamente.

A data de ocorrência da maior área inundada no período do evento variou entre os cenários. Para o Cenário 2 houve expansão da mancha até o dia 26/03/1974. Já para o Cenário 3, a área inundada em toda a bacia hidrográfica é aproximadamente

765 km² nos dias 25 e 26/03/1974. De acordo com Marques (2010), a ocorrência da maior área inundada foi no dia 25/03/1974. No entanto, somente valores de altura de maré extremamente elevados resultaram na maior área inundada no dia 25/03/1974, ou seja, foram capazes de causar um efeito de remanso suficiente para reduzir a velocidade do escoamento das águas até foz, aumentando o tempo de retenção da bacia hidrográfica.

Considerando os limites territoriais atuais de Tubarão, o desempenho de representação da inundação pelo modelo foi analisado pela aplicação de $F^{(2)}$ (equação 16) para mensurar a compatibilidade com a mancha de inundação do HAND e com os pontos de referência. Os resultados de cada cenário são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Descrição dos Cenários 2 e 3 e respectivas análises em relação aos limites territoriais de Tubarão.

Cenário	Altura maré (m)	Área inundada (km ²)	Área não inundada (km ²)	Compatibilidade em relação	
				ao HAND (%)	aos pontos (%)
2	1	111,8	190,2	82	28
3	3	119,6	182,4	87	51

Analisando as áreas inundadas em relação ao Cenário 1, foi possível estimar a contribuição da maré para formação das manchas de inundação. No Cenário 2, ocorreu aumento de apenas 1% da área inundada em relação ao Cenário 1, enquanto no Cenário 3, a maré contribuiu para o aumento de 9% da extensão da mancha de inundação. Observou-se que a inclusão da condição de jusante melhora a representação das áreas inundadas na margem direita do Rio Tubarão como ilustrado na Figura 41. Ratificando o já exposto no item 6.5.1, as vazões de montante são elevadas, sendo responsáveis pela maior parte das áreas afetadas.

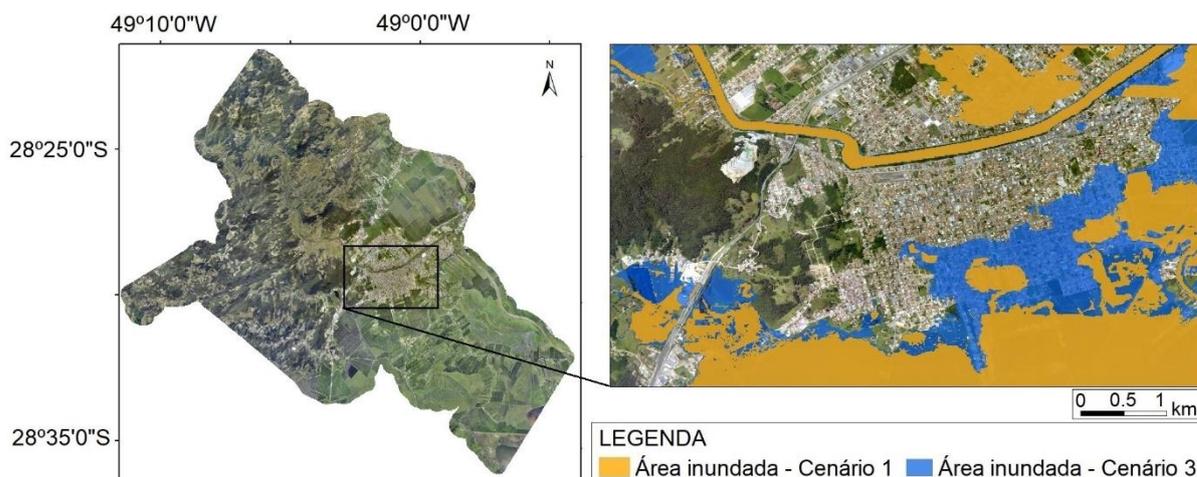


Figura 41 – Comparação áreas inundadas na margem direita do Rio Tubarão entre os Cenário 1 e 3.

Os resultados corroboraram a afirmação que as precipitações associadas a altas vazões são preponderantes na delimitação das áreas inundadas. O Cenário 2 demonstrou que, com as altas vazões do hidrograma a montante, a maré de 1 m de altura não afeta o escoamento do Rio Tubarão de modo relevante no comportamento da inundação. Enquanto que no Cenário 3, a influência da maré nas vazões do Rio Tubarão foi observada nas minibacias correspondentes aos trechos da foz até próximo ao centro do município (minibacia código 644) cerca de 20 km distante da foz (jusante da minibacia código 650) conforme demonstrado na Tabela 17.

Tabela 17 – Variação percentual das vazões resultantes dos Cenários 1 e 3 (22 a 26/03/1974) e longitudinalmente da foz até 40 km a montante.

Distância da foz	40 km	35 km	30 km	25 km	20 km	15 km	10 km	5 km
Data (1974)	Mini 643	Mini 644	Mini 645	Mini 646	Mini 647	Mini 648	Mini 649	Mini 650
22/03	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	5%	8%	10%
23/03	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	3%	11%	16%
24/03	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	2%	6%	10%
25/03	<1%	<1%	<1%	<1%	1%	2%	6%	9%
26/03	<1%	<1%	<1%	<1%	2%	3%	3%	4%

Mesmo ao considerar uma altura de maré elevada, 3 m, os resultados do Cenário 3 apontam uma área inundada com baixa compatibilidade com os pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Ocorrendo prejuízos na representação, principalmente, dos pontos inundados na área central do município.

7.3.3 Área inundada com influência de maré e vento

As condições meteorológicas favoreceram a predominância do vento na direção leste (Lima et al., 2009; Marques, 2010). Apesar de desconhecida a velocidade do vento, esse fator foi incluído como uma condição de contorno a jusante para identificar a influência do vento no escoamento dos rios. Considerando a escala de Beaufort foi possível estimar a velocidade do vento agindo no escoamento do rio associando à altura da maré afetada pela influência do vento agindo no Oceano Atlântico.

No modelo, foi definido o azimute de cada minibacia a partir das coordenadas geográficas de seu centroide e foi adotado um valor para o coeficiente de atrito (C_d) para cada sub-bacia. De acordo com Lopes (2017), o valor de 1×10^{-5} para o C_d apresentou os melhores resultados quando analisada a sensibilidade do modelo variando esse coeficiente entre 2×10^{-6} e 4×10^{-5} . O valor de 1×10^{-5} é superior ao normalmente recomendado na literatura para outros modelos, porém Lopes (2017) justifica que esse valor pode compensar algumas simplificações do modelo que reduzem a influência do vento no escoamento, como por exemplo, a largura efetiva utilizada no cálculo da influência do vento no escoamento, a definição automática das direções do escoamento a partir do centroides das minibacias e a baixa distribuição espacial dos dados diários de vento disponíveis. A influência do vento foi considerada apenas nas sub-bacias próximas à costa: sub-bacia Baixo Tubarão e sub-bacia Rio D'Una.

Com base na escala de Beaufort, foi assumido que o vento teria velocidade entre $10,8 \text{ m s}^{-1}$ a $13,8 \text{ m s}^{-1}$, capaz de provocar ondas com altura de até 3,0 m. No Cenário 4 foi adotado vento com velocidade de $12,5 \text{ m s}^{-1}$ agindo no escoamento do rio, na direção leste como condição de contorno a jusante, a fim de identificar a função deste fator na delimitação das áreas inundadas. Enquanto que no Cenário 5, foi incluída a altura de maré de 3 m além do vento como condição de contorno a jusante.

Entre os resultados obtidos, identificou-se pela comparação entre o Cenário 4 e o Cenário 1 que a diferença entre a área inundada de ambos cenários é de apenas $0,7 \text{ km}^2$. Esse resultado sugere a baixa influência direta do vento sobre o escoamento do rio.

No Cenário 5, observou-se desempenho similar em comparação com o Cenário 3. Na Figura 42 foram comparadas as áreas inundadas na simulação do

Cenário 3 com o Cenário 5, tendo similaridade nas áreas inundadas, exceto por uma pequena área em destaque na figura localizada nas proximidades do Rio Morto. Assim, os resultados ratificam a baixa influência do vento sobre o escoamento do rio. Entretanto, considerando a escala de Beaufort, pode-se supor a influência do vento nas águas oceânicas, afetando assim a altura das marés e, conseqüentemente, a extensão das áreas inundadas.

A Tabela 18 apresenta as condições de cada cenário e os respectivos resultados das áreas inundadas dentro dos limites territoriais atuais de Tubarão. Em relação a compatibilidade com os pontos de referência, não se obteve desempenho superior ao dos Cenários anteriores.

Tabela 18 – Resultados dos Cenários 4 e 5.

Cenário	Velocidade vento (m s ⁻¹)	Altura maré (m)	Área inundada (km ²)	Compatibilidade em relação	
				ao HAND (%)	aos pontos (%)
4	12,5	0	110,7	81	28
5	12,5	3,0	120,0	87	51

*Direção do vento: Leste (90°)

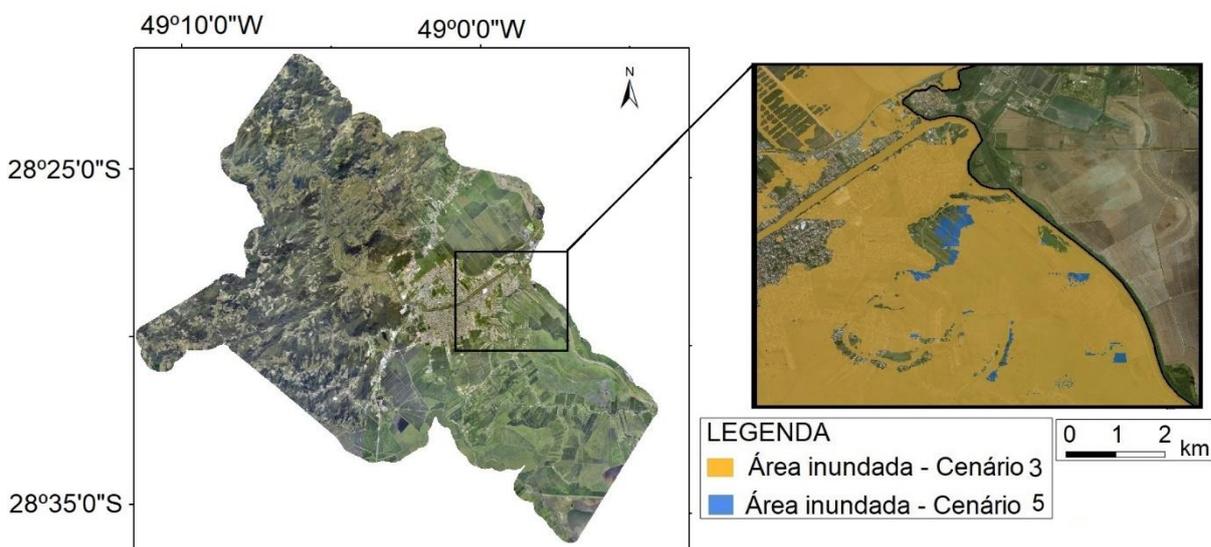


Figura 42 – Comparação áreas inundadas na margem direita do Rio Tubarão entre os Cenário 3 e 5.

Foram testados valores de até 28,4 m s⁻¹ – equivalente a 100 km.h⁻¹ – para a velocidade do vento e os resultados a semelhança dos Cenários 4 e 5 (vento com 12,5 m s⁻¹ – equivalente a 45 km h⁻¹ – na direção leste) sugerem que ao considerar: (i) a influência direta do vento no escoamento do rio não foi um fator relevante para

extensão das áreas inundadas em 1974; (ii) a influência do vento no Oceano Atlântico pode ter causado o aumento nas alturas da maré, afetando indiretamente na inundação de 1974.

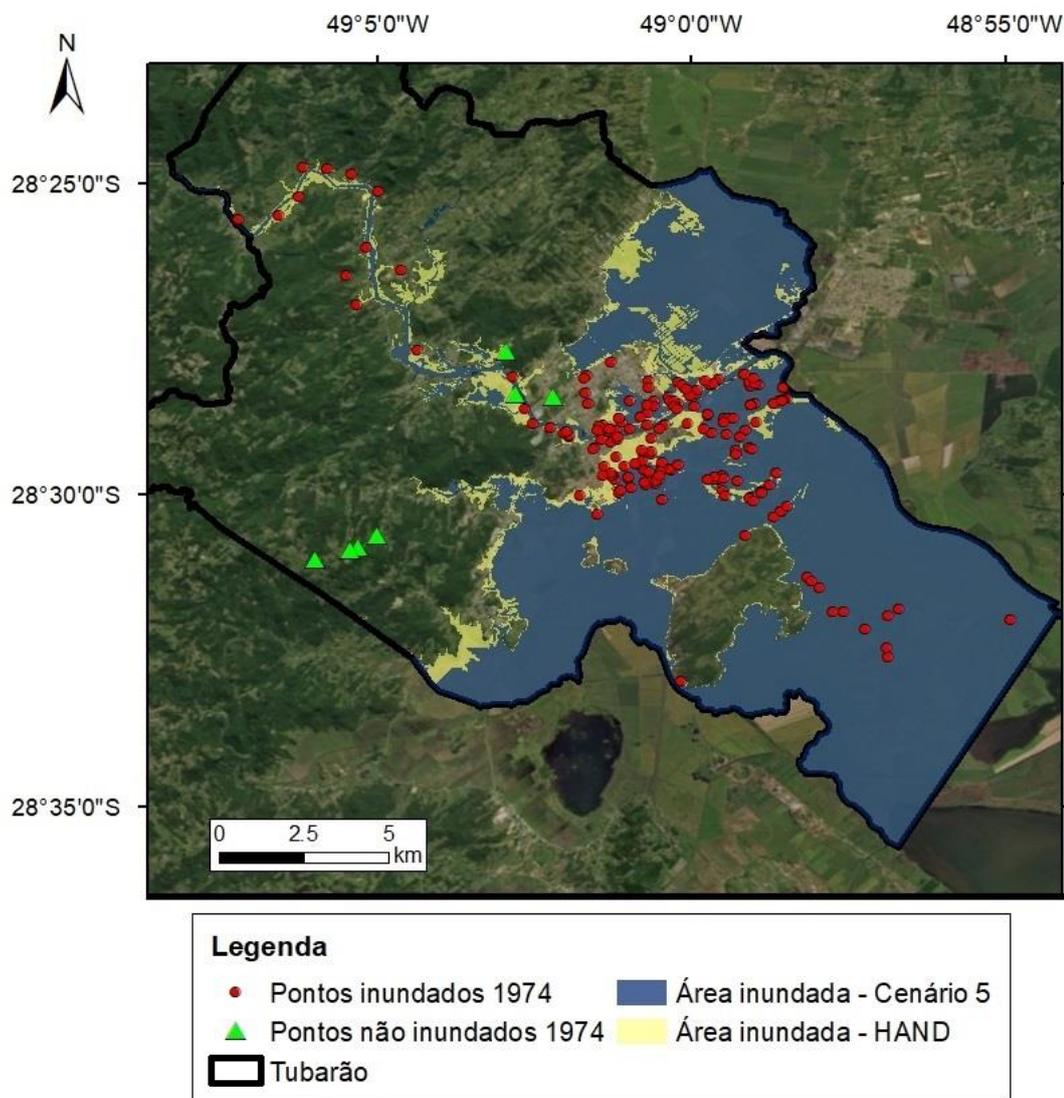


Figura 43 – Comparação áreas inundadas do Cenário 5 com dados de referência.

7.3.1 Área inundada com redução na área do canal

O mês chuvoso de março de 1974 pode ter contribuído para o aporte de sedimentos na calha do rio reduzindo a seção do canal e dificultando o escoamento das águas. Além disso, os registros fotográficos indicam grande quantidade de entulhos e materiais sólidos arrastados pelas forças das águas durante o evento de 1974 que podem ter ocasionado represamentos em pontos da foz do Rio Tubarão. Assim como adotado por Monteiro et al. (2013), a simulação do canal assoreado foi

realizada removendo, parcial ou totalmente, a representação dos perfis transversais do rio. Ressalta-se que a batimetria do Rio Tubarão na data do evento não foi identificada.

No modelo empregado, a representação do canal do rio é simplificada em seções retangulares cujas dimensões foram estimadas por equações geomorfológicas. Para simular a redução da área transversal, a profundidade dos trechos localizados na foz do Rio Tubarão, sub-bacia do Baixo Tubarão, foi reduzida em 50%, 75% e 100%. É importante salientar que mesmo ao excluir a profundidade do rio, o modelo ainda leva em consideração as informações topográficas do MDT.

Os cenários simulados e respectivos resultados são apresentados na Tabela 19. A comparação do Cenário 6 em relação ao Cenário 1 apresentou um acréscimo de aproximadamente 5% na extensão da mancha, obtendo compatibilidade de 84% com a mancha do HAND, porém representou apenas 36% dos pontos de referência. Ao desconsiderar totalmente a profundidade do canal e adicionando a altura de maré a jusante, no Cenário 9 a área aumentou cerca de 8% em relação ao Cenário 3, obtendo mais de 20% de melhora na representação dos pontos de referência.

Tabela 19 – Resultados do Cenário 6 a 9.

Cenário	Redução profundidade canal(%)	Altura maré (m)	Área inundada (km ²)	Compatibilidade em relação	
				ao HAND (%)	aos pontos (%)
6	50	0	115,6	84	36
7	50	3	122,5	89	56
8	75	3	125,1	89	60
9	100	3	129,4	91	73

Esses resultados sugerem que a redução da profundidade Rio Tubarão na sub-bacia do Baixo Tubarão em decorrência do aporte de sedimentos previamente ao evento pode ter contribuído para o aumento na extensão da área inundada. Existem incertezas na representação da calha do rio em decorrência das simplificações do modelo. Assim, ao considerar a calha totalmente assoreada, redução de 100% da profundidade do canal, se trata apenas de uma aproximação da realidade.

7.3.2 Área inundada com acréscimo na precipitação

Os Cenários de 1 a 9 testaram diferentes condições de contorno a jusante e, até mesmo, alteraram a profundidade do canal para verificar as condições hidráulicas. No entanto, os resultados demonstraram baixa compatibilidade das áreas inundadas simuladas em relação aos pontos de referência, apesar da compatibilidade com a mancha do HAND ter atingido valores superiores a 80%.

Mediante o exposto, supõe-se que o registro da precipitação pelas estações pluviométricas para o evento de 1974 foi subestimado e isso pode ser sugerido considerando:

- i. As condições meteorológicas identificadas durante o evento apontam para a ocorrência de precipitações contínuas e ventos que podem ter prejudicado a medição pelos pluviômetros;
- ii. Escassez de estações pluviométricas, apenas sete postos com dados do evento inseridas dentro dos limites da bacia hidrográfica, de modo que os dados existentes podem ser insuficientes para representar o evento;
- iii. O método de interpolação empregado não leva em consideração as características topográficas;
- iv. Os movimentos de massa ocorridos durante o evento, cujo um dos agentes deflagradores indica a ocorrência de precipitações contínuas e/ou intensas;
- v. Os cenários simulados com altura de maré de 3 m, valor considerado extremo, não afeta as áreas inundadas indicadas pelos pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil.

Sendo assim, retornou-se a etapa de (ii) Análise dos dados incrementando a precipitação. Em seguida, foi revisada a etapa de (iv) Reconstrução hidrológica, gerando a partir dos valores de precipitação com incremento de 50% novos hidrogramas como entrada para a etapa de (v) Reconstrução hidrodinâmica.

O Cenário 10 investigou o acréscimo de 50% nos valores de precipitação interpolados para cada centroide das minibacias. No modelo hidrológico, as precipitações foram transformadas em vazão. Para exemplificar essa alteração, o hidrograma do Rio Tubarão (Figura 44) cuja vazão de pico é $1.706,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (item 7.2.2), tem seu valor máximo alterado para $2.680,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Posteriormente, avaliou-se a

inserção da altura da maré como condição de jusante gerando o Cenário 11 e também a inclusão da direção e velocidade do vento no Cenário 12.

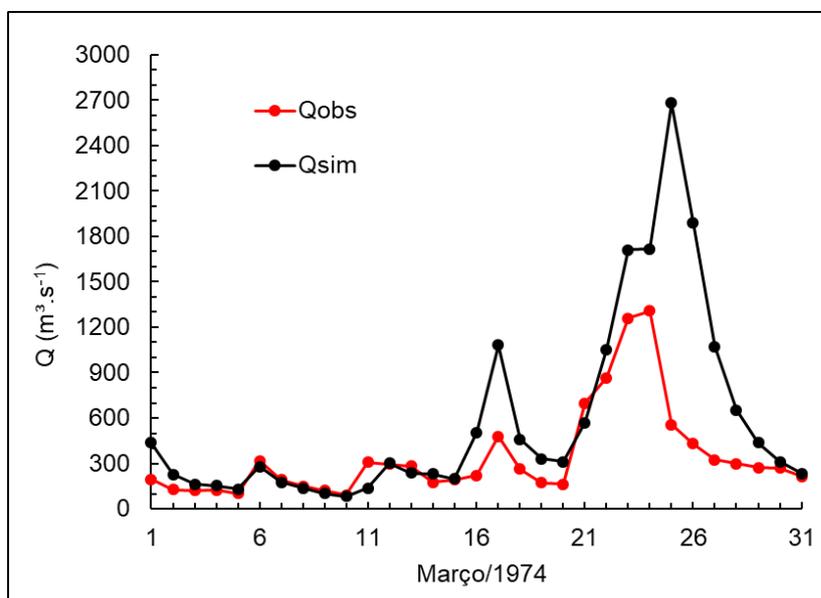


Figura 44 – Rio Tubarão: hidrograma observado da estação fluviométrica código 84580000 e hidrograma simulado resultante da precipitação com 50% de acréscimo.

O Cenário 10 resultou na área inundada de 130 km², ocorrendo um aumento de aproximadamente 18% em relação ao Cenário 1. Entre o Cenário 10 e 11, verificou-se aumento de 3% da mancha de inundação pela influência da maré, enquanto que nos Cenários 1 e 3, o aumento foi de 7%. A hipótese da preponderância da precipitação em relação a condição de jusante novamente foi ratificada. Quanto maior o volume do hidrograma, menor a influência da condição de jusante.

A Tabela 20 apresenta as condições de cada cenário simulados e respectivos resultados. Os três cenários simulados apresentam compatibilidade de 92% com a mancha do HAND, apresentando o melhor desempenho de representação até o momento.

Tabela 20 – Resultados dos Cenários 10 a 12.

Cenário	Velocidade vento (m s ⁻¹)	Altura maré (m)	Área inundada (km ²)	Compatibilidade em relação	
				ao HAND (%)	aos pontos (%)
10	0	0	130,1	92	73
11	0	3	134,1	92	78
12	12,5*	3	134,2	92	78

*Direção vento: Leste

A Figura 45 ilustra a área inundada na área central de Tubarão simulada no Cenário 12 em comparação com os dados de referência. Pode ser observada a compatibilidade com a mancha do HAND e a representação adequada dos pontos de referência não inundados.

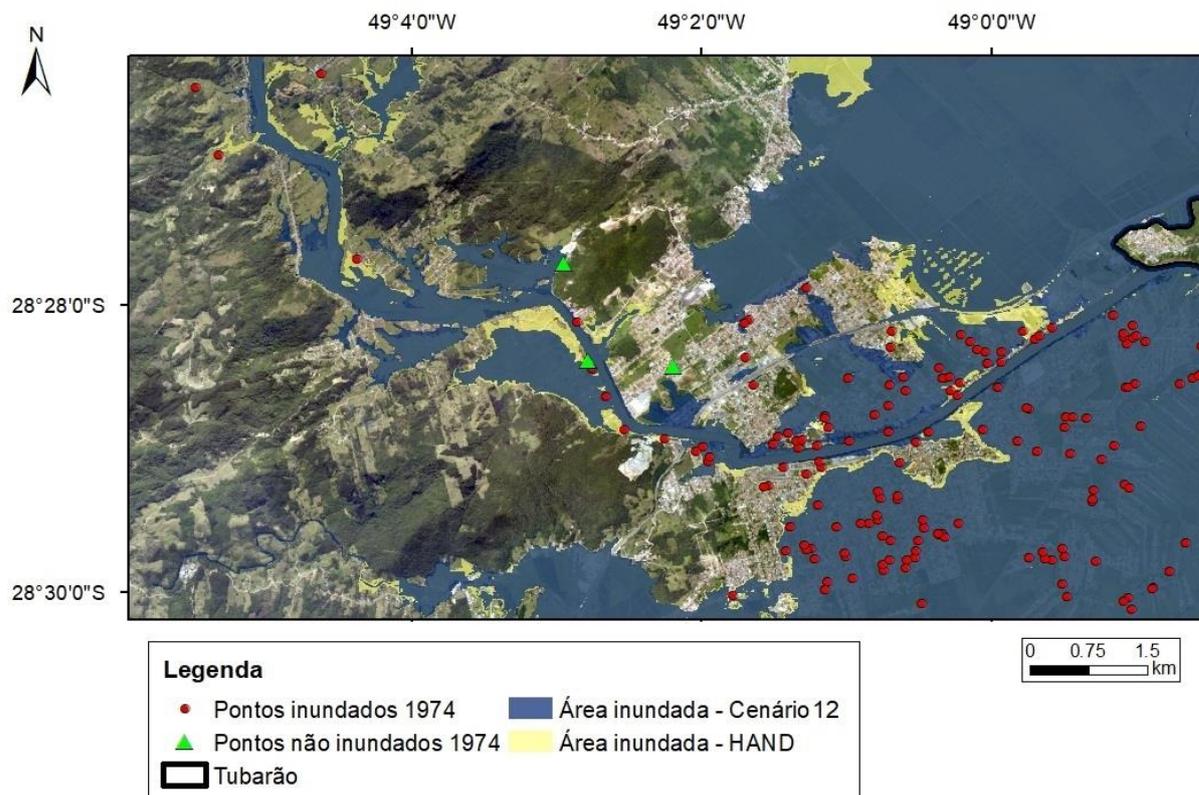


Figura 45 - Comparação das áreas inundadas no Cenário 12, mancha do HAND e pontos levantados em campo.

Os Cenários 10 a 12 alteraram a condição de contorno a montante, aumentando o volume precipitado resultando maiores vazões. Os resultados obtidos nesses cenários apontam que considerando maior valor de precipitação no processo fluvial, as áreas inundadas simuladas apresentam maior compatibilidade com os dados disponíveis. Em comparação com os demais cenários simulados, nota-se melhor desempenho na compatibilidade com os pontos indicados como inundados no levantamento da Secretaria de Proteção e Defesa Civil.

7.3.3 Área inundada com cenários combinados

Levando em consideração os demais cenários simulados, no Cenário 13 foi proposta uma combinação entre algumas hipóteses sugeridas. Nesse cenário,

considerou-se o canal parcialmente assoreado, redução de 75% da profundidade do canal, a precipitação com acréscimo de 50% em seu valor, maré com 3 m de altura e vento com $12,5 \text{ m s}^{-1}$ na direção leste.

A área inundada foi de $141,0 \text{ km}^2$ com compatibilidade de 87% em relação a mancha do HAND (Tabela 21). Dos 186 pontos inundados indicados, a área inundada atingiu 168 pontos, atingindo 90% de acerto. Na Figura 46, a mancha simulada foi comparada com o HAND e com os pontos de referência, sendo possível identificar que as áreas de jusante foram bem representadas pelo modelo.

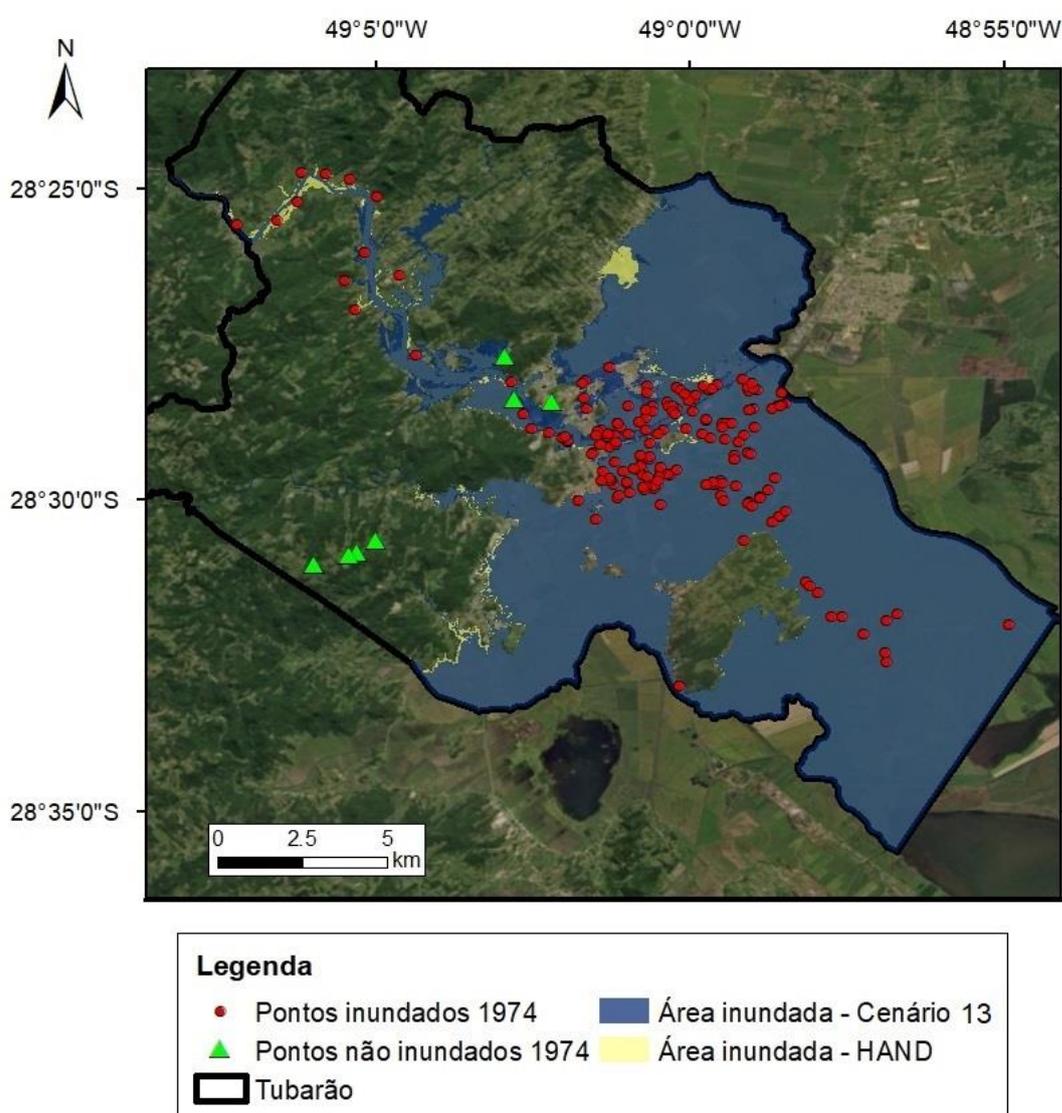


Figura 46 - Comparação das áreas inundadas no Cenário 13, mancha do HAND e pontos levantados em campo.

Tabela 21 – Resultado do Cenário 13.

Cenário	Área inundada (km ²)	Compatibilidade em relação	
		ao HAND (%)	aos pontos (%)
13	141,0	87	90

7.3.4 Estimativa da área inundada

Na reconstrução hidrodinâmica foram simulados 13 cenários, apresentados em resumo na Tabela 22. As figuras ilustrando as áreas inundadas em cada cenário são apresentadas entre o Apêndice C e o Apêndice P.

Tabela 22 – Resumo dos Cenários 1 a 13.

Cenário	Altura da maré (m)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)*	Incremento 50% na precipitação	Redução profundidade canal (%)
1	0	-	Não	-
2	1	-	Não	-
3	3	-	Não	-
4	0	12,5	Não	-
5	3	12,5	Não	-
6	0	-	Não	50
7	3	-	Não	50
8	3	-	Não	75
9	3	-	Não	100
10	0	-	Sim	-
11	3	-	Sim	-
12	3	12,5	Sim	-
13	3	12,5	Sim	75

*Direção do vento: leste

A Tabela 23 apresenta o resumo dos resultados obtidos em cada cenário: área inundada, compatibilidade da área inundada simulada com a mancha de inundação obtida no HAND (%) e compatibilidade da área simulada com os pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil.

A compatibilidade dos resultados das simulações hidrodinâmicas realizadas no MGB com a mancha de inundação do HAND variou entre 81% e 92%, indicando que determinadas áreas tem características de armazenamento e estão mais suscetíveis à inundação. Quanto aos pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil, os pontos não inundados foram bem representados pelo

modelo em todos cenários testados. Enquanto que em alguns cenários, a extensão da área inundada simulada não foi suficiente para afetar os pontos indicados como inundados, de modo que o acerto varia de 28% a 90%. Isso pode ser justificado pelo fato de os pontos se concentrarem nas proximidades da área central do município, região onde ocorre maior variação entre os cenários na representação da inundação.

Tabela 23 – Resumo dos resultados obtidos nos Cenários 1 a 13.

Cenário	Área inundada (km ²)	Compatibilidade (%)	
		HAND	Pontos
1	110,00	81	31
2	111,80	82	28
3	119,60	87	51
4	110,70	81	28
5	120,00	87	51
6	115,60	84	36
7	122,50	89	56
8	125,10	89	60
9	129,40	91	73
10	130,10	92	73
11	134,10	92	78
12	134,20	92	78
13	141,0	87	90

Na Figura 47 os valores de compatibilidade de cada cenário foram relacionados de modo a ilustrar os resultados em comparação com a ocorrência do evento conforme os dados disponíveis. É importante salientar que o evento (losango em azul na figura) se refere a uma condição estimada do evento onde 100% dos pontos de referência e da mancha do HAND seriam representados. Entretanto, essa representação é ilustrativa, visto que no estudo de Zanandrea et al. (2018), a comparação entre as áreas inundadas pelo HAND em relação aos pontos de referência atingiram um acerto de 80%.

O Cenário 13 apresentou a maior compatibilidade da área inundada simulada em relação aos pontos levantados em campo, atingindo compatibilidade de 90%. A área inundada simulada pelo modelo foi superior à mancha de inundação obtida pelo HAND e em virtude disso foi penalizada pela medida de desempenho. Observando na Figura 47, também é possível identificar que os Cenários 11 e 12 obtiveram

compatibilidade superior a 75% em relação às duas fontes de dados disponíveis sobre as áreas inundadas do evento.

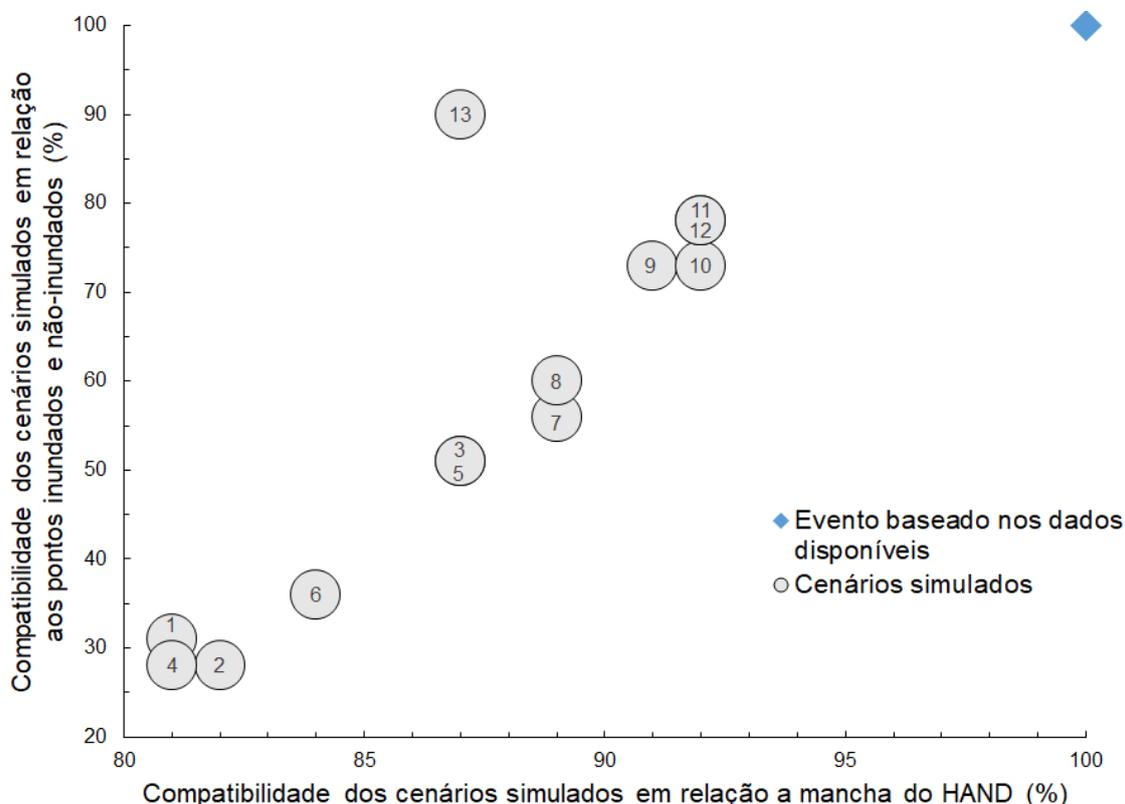


Figura 47 – Relação entre a compatibilidade obtida dos cenários simulados com a mancha de inundação do HAND (eixo x) e dos cenários simulados com os pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil (eixo y).

Os resultados de compatibilidade dos Cenários de 1 a 8 demonstram que apenas a alteração das condições de contorno a jusante – altura de maré e velocidade e direção do vento não foram suficientes para atingir 70% dos pontos indicados como inundados e não-inundados. Já os Cenários 9 e 10, mesmo com condições distintas apresentam resultados de compatibilidade similares.

A Figura 48 ilustra os pontos com registro de inundação não afetados pelos resultados da simulação hidrodinâmica do Cenário 13. Ressalta-se que em nenhum dos cenários simulados, os pontos de inundação apontados às margens do Rio Tubarão na região de montante, divisa entre Tubarão e São Ludgero, foram afetados.

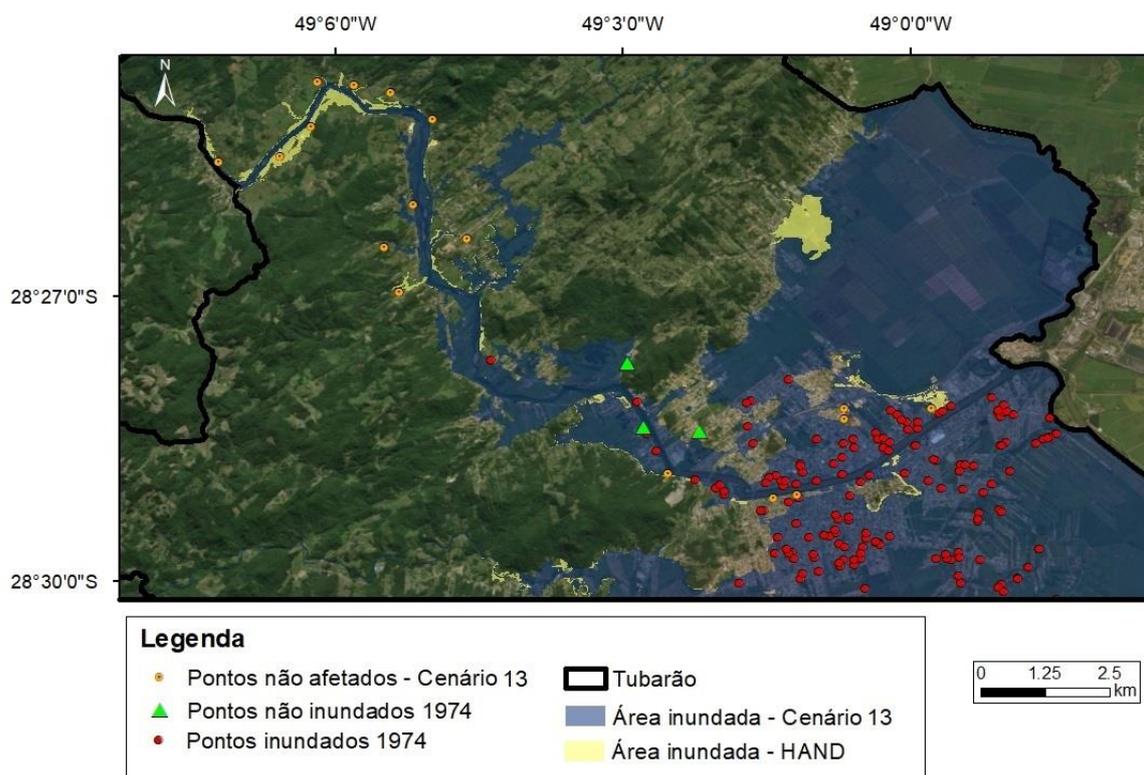


Figura 48 – Destaque para os pontos não afetados pela inundação simulada no Cenário 13.

8 SÍNTESE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo discute sobre os resultados obtidos ao realizar a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento ocorrido em 1974 na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar com enfoque no município de Tubarão. Para isso, foi implementada uma estratégia metodológica que consiste em cinco etapas: (i) Investigação das fontes, (ii) Análise dos dados, (iii) Configurações do modelo, (iv) Reconstrução hidrológica e (v) Reconstrução hidrodinâmica.

Na etapa de (i) Investigação das fontes foi realizado o levantamento de dados por observações humanas (“*historical hydrology*”) e medições diretas por equipamentos (“*instrumental hydrology*”), possibilitando a elaboração de uma base dos dados disponíveis para reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 em Tubarão, SC. Não foram empregados dados provenientes de evidências físicas do evento. Essa etapa foi necessária pois não existia um acervo de dados disponível e contemplou dados da rede hidrometeorológica e de observações humanas. A escassez de informações sobre o evento ratificou a necessidade da reconstrução do evento de 1974 para estimar essas variáveis.

A realização da etapa (ii) Análise dos dados evidenciou incoerências, principalmente, na comparação entre os registros pluviométricos e fluviométricos da rede hidrometeorológica, corroborando para a necessidade da reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento. Nos registros das estações pluviométricas verificou-se que o maior valor registrado foi de 205 mm no dia 25/03/1974 em São Ludgero, a montante do Rio Tubarão. Ao confrontar os dados de precipitação com os dados de vazão, identificou-se incoerência com o registro que aponta a vazão máxima ocorrendo no dia 24/03/1974. Dessa forma, supõe-se que a vazão máxima registrada se refere às precipitações ocorridas nos dias 23 e 24, enquanto que a vazão do dia 25/03 não foi registrada adequadamente.

O modelo hidrológico foi calibrado e validado com desempenho satisfatório ou superior e demonstrou ser capaz de fornecer o hidrograma do evento com base nos dados de precipitação existentes. A reconstrução hidrológica estimou o hidrograma apresentado na Figura 49 com vazão de pico de $1.706,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Em relação aos valores de vazão observados, houve superestimativa da vazão máxima simulada e diferença de um dia entre os picos. Entretanto, ao comparar com dados do estudo da DNOS, o pico do hidrograma simulado ocorreu um dia adiantado e o pico simulado foi

subestimado. Tanto a vazão da estação fluviométrica quanto do estudo da DNOS foram estimados pelo método da curva-chave, porém os técnicos da DNOS consideraram valores de cotas estimados pela curva de depleção da bacia com maior valor ocorrendo no dia 26/03/1974.

Ao realizar a propagação das vazões para estimar a área inundada, um dos cenários simulados considerou o acréscimo de 50% no valor das precipitações interpoladas espacialmente ao centroide de cada minibacia. O hidrograma resultante dessa alteração apresentou vazão máxima de $2.680,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o evento de 1974. Sugere-se que o incremento em 50% no valor precipitado poderia compensar a escassez de estações pluviométricas distribuídas na bacia hidrográfica e as incertezas na medição dos pluviômetros na ocorrência de precipitações intensas e com a presença de ventos.

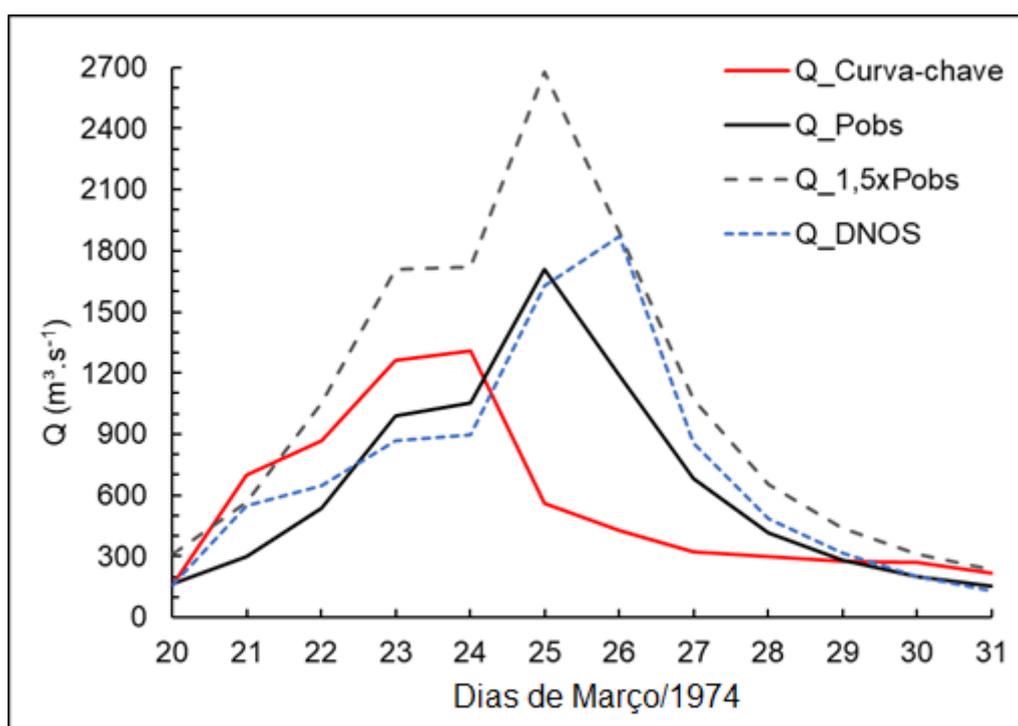


Figura 49 – Comparação entre o hidrograma da estação fluviométrica 84580000 proveniente da curva-chave (Q_Curva-chave), o hidrograma do estudo da DNOS (Q_DNOS) e os hidrogramas estimados considerando os dados disponíveis de precipitação (Q_Pobs), o acréscimo de 50% na precipitação (Q_1,5xPobs).

No presente estudo, o modelo MGB-IPH representou os processos hidrológicos e hidrodinâmicos, assim a entrada dos dados de precipitação possibilitou a geração de hidrogramas para cada minibacia. Cada minibacia usou como entrada as vazões das minibacias a montante acrescido do valor da vazão gerada localmente.

Em todos os cenários simulados, os resultados demonstraram o mesmo comportamento hidrodinâmico da bacia hidrográfica, indicando que as áreas próximas à costa foram as mais afetadas. Nas proximidades da foz do Rio Tubarão, nota-se a baixa declividade do terreno contribui para o armazenamento das águas. Todos resultados simulados apontam que Tubarão e Laguna foram significativamente mais afetados pela inundação em relação aos demais municípios que integram a bacia hidrográfica.

Entre os resultados da reconstrução hidrodinâmica, foi possível identificar que as precipitações associadas a altas vazões foram preponderantes na delimitação das áreas inundadas em relação a condição de contorno a jusante. Observou-se que as áreas localizadas na margem direita do Rio Tubarão foram as mais afetadas pela altura da maré como condição de jusante. A influência do vento no escoamento dos rios – velocidade $12,5 \text{ m s}^{-1}$ (45 km h^{-1}) e direção leste – não foi um fator relevante para delimitação da extensão das áreas inundadas. No entanto, levando em consideração a escala de Beaufort, a influência do vento no Oceano Atlântico pode influenciar no aumento da altura da maré, afetando indiretamente na inundação.

Os Cenários 11,12 e 13 apresentaram resultados com melhor desempenho que os demais em relação aos dados disponíveis. Os três cenários resultaram na maior extensão de área inundada no dia 25/03/1974, data coerente com Marques (2010).

Para o sistema de monitoramento e alerta do município, sugere-se como essencial o monitoramento da precipitação nos municípios a montante, devido sua influência preponderante no transbordamento do Rio Tubarão. Também ressalta-se que o monitoramento das marés pode contribuir para o sistema de alerta dos municípios supracitados visto o efeito de remanso atingir mais de 20 km adentro da bacia hidrográfica.

A presente metodologia realizou a reconstrução hidrológica, a fim de estimar o hidrograma do evento a partir dos dados da rede hidrometeorológica. Entretanto, ao realizar a reconstrução hidrodinâmica, notou-se a necessidade de rever os dados de precipitação, repetindo assim a etapa de reconstrução hidrológica para estimativa do hidrograma e da vazão máxima. Devido ao modelo MGB-IPH integrar os módulos hidrológico e hidrodinâmico, esse procedimento torna-se mais simples ao comparar com modelos cujos os módulos são separados.

Nota-se que os dados disponíveis não apresentam valores suficientes para atingir as áreas inundadas apontadas pelos dados de referência que são os 193 pontos obtidos em entrevista aos moradores pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão nos anos de 2014 e 2015, e a mancha de inundação obtida por Zanandrea et al. (2018) a partir de uma marca de cheia. Deve-se ressaltar que esses dados de referência também apresentam incertezas, sendo apenas uma estimativa do que se tem conhecimento sobre as áreas afetadas pelo evento.

A inclusão de dados de observações humanas, como crônicas, depoimentos, relatos, contribuiu para verificação dos resultados da reconstrução. Portanto, promover a cultura de registro de desastres hidrológicos pode apoiar estudos de reconstrução. No entanto, deve-se priorizar a qualidade das informações a fim de criar uma base de dados com acurácia para uso nos modelos computacionais.

A incerteza dos dados de entrada do modelo reflete em incertezas nos resultados. Apesar disso, os cenários avaliados e respectivos resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre o evento de 1974 e contribuem para a compreensão dos processos hidrológicos e hidrodinâmicos da bacia hidrográfica.

9 CONCLUSÕES

Apesar de ser um marco na história da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar e, principalmente, em Tubarão, os conhecimentos sobre o evento de março de 1974 eram limitados. Sendo assim, os resultados do presente estudo de reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 nessa bacia hidrográfica possibilitaram concluir que:

- A precipitação foi a variável predominante para delimitação da área inundada, sendo necessário incrementar o valor dos registros pluviométricos para obter áreas inundadas simuladas similares aos dados disponíveis;
- A influência da altura da maré demonstrou relevância na inundação, principalmente, nas áreas localizadas à margem direita do Rio Tubarão, e os resultados simulados foram coerentes com os dados da literatura ao que tange o efeito de remanso;
- O estudo apontou a pouca influência do vento no escoamento dos rios, mas sugeriu influência indireta podendo acarretar no aumento das alturas da maré e contribuir para subestimativa na medição dos pluviômetros;
- Os resultados apontam para a subestimativa da precipitação registrada para o evento de 1974, que pode ser principalmente atribuída a baixa quantidade de estações pluviométricas distribuídas na bacia hidrográfica no ano do evento, insuficientes para garantir a representatividade das chuvas.
- A análise dos dados disponíveis e também do resultado da reconstrução hidrológica sugerem que os dados de vazão da rede hidrometeorológica estão equivocados e não representam o comportamento do hidrograma (tempo de ascensão, recessão e pico) e nem o valor da vazão máxima do evento.

A partir desse estudo foi possível avançar nos conhecimentos sobre o evento de 1974. Primeiramente, por reunir dados de diferentes fontes em um único documento de modo a embasar estudos complementares. Além disso, o modelo

hidrológico e hidrodinâmico calibrado e validado possibilita que outros cenários e hipóteses sejam investigados.

O presente estudo atingiu o objetivo geral e os objetivos específicos. Identificou-se que a inundação de 1974 foi um evento composto em decorrência de precipitações a montante do município e da altura da maré a jusante. Portanto, os fatores envolvidos no evento e as interações entre eles foram identificados.

Na reconstrução hidrodinâmica, mesmo considerando uma altura de maré extrema, igual a 3 m, foi necessário incrementar os valores de precipitação provenientes da rede hidrometeorológica para obter áreas inundadas compatíveis com os dados disponíveis. Dessa forma, a hipótese de subestimativa das precipitações registradas pelas estações de monitoramento se fortalece.

As informações não-sistemáticas apoiam a verificação dos resultados, sendo relevante o uso desse tipo de fonte em estudos de reconstrução. Portanto, a busca por esses dados pode complementar as informações já existentes ou ainda esclarecer alguns aspectos sobre o evento ocorrido. Ressaltando, que a qualidade das informações deve ser priorizada a fim de assegurar a acurácia dos dados e, conseqüentemente, contribuir para a modelagem computacional do evento.

Apesar de desastres hidrológicos dessa magnitude não ocorrerem frequentemente, aprender com essas ocorrências contribui para a gestão de desastres. Os sistemas de monitoramento e alerta das bacias costeiras necessitam a incorporação da altura da maré, além da vazão resultante das precipitações que ocorrem a montante, pois essa variável exerce papel relevante em processos de inundação na região costeira.

10 RECOMENDAÇÕES

A reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento hidrológico extremo de máxima de 1974, em Tubarão, apresentou resultados satisfatórios. Contudo, recomenda-se a realização dos seguintes estudos a partir dos resultados obtidos no presente trabalho:

- Análise e quantificação das incertezas do modelo hidrológico e hidrodinâmico;
- Análise de sensibilidade do coeficiente de Manning;
- Ampliar o acervo de hidrologia histórica sobre o evento, visto que uma maior quantidade de registros provenientes das observações humanas pode contribuir para melhor representação do evento de 1974;
- Incentivar a cultura de registro de inundações possibilitando o estudo de outros eventos para ampliar o conhecimento sobre a bacia hidrográfica e melhorar a representação dos processos hidrodinâmicos pelo modelo computacional;
- Empregar o MDT recuperado em todas as etapas e com a resolução espacial de 1 m.

REFERÊNCIAS

- ANA. (2014). Agência Nacional de Águas. **Medição de descarga líquida em grandes rios**: manual técnico. 2. ed. Brasília, DF.
- ANA. (2007). Agência Nacional de Águas. **Evolução da rede hidrometeorológica nacional**. Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica, v.1, n.1. Brasília, DF.
- AMBRIZZI, T.; MARQUES, R.; NASCIMENTO, E. (2009). Bloqueios atmosféricos. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 279 – 296.
- BALASCH, J.C.; RUIZ-BELLET, J.L.; TUSET, J; OLIVA, J. M. (2010a). Reconstruction of the 1874 Santa Tecla's rainstorm in Western Catalonia (NE Spain) from flood marks and historical accounts. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 10, p. 2317 – 2325.
- BALASCH, J.C.; TUSET, J.; RUIZ-BELLET, J.L. (2010b). Reconstructing the 1874 Santa Tecla flash flood in the Ondara River (Ebro Basin, NE Spain). **Advances in Geosciences**, v. 26, p. 45 - 48.
- BALASCH, J.C.; RUIZ-BELLET, J.L.; TUSET, J. (2011). Historical flash floods retromodelling in the Ondara River in Tàrrrega (NE Iberian Peninsula). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, p. 3359 – 3371.
- BAKER, V. R. (1987). Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. **Journal of Hydrology**, n. 96, p. 79 – 99.
- BARRIENDOS, M., COEUR, D., LANG, M., LLASAT, M.C., NAULET, R., LEMAÎTRE, F., BARRERA, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, n. 3, p. 583 – 592.
- BARRIENDOS, M.; RUIZ-BELLET, J. L.; TUSET, J.; MAZÓN, J.; BALASCH, J. C.; PINO, D.; AYALA, J. L. (2014). The “Prediflood” database of historical floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula) AD 1035 – 2013, and its potential applications in flood analysis. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 18, p. 4807 – 4823.
- BENITO, G.; LANG, M.; BARRIENDOS, M.; LLASAT, M. C.; FRANCÉS, F.; OUARDA, T.; THORNDYCRAFT, V. R.; ENZEL, Y.; BARDOSSY, A. COEUR, D.; BOBÉE, B. (2004). Use of systematic, palaeoflood and historical data for improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. **Natural Hazards**, n. 31, p. 623 – 643.
- BEVEN, K. J. (2001). **Rainfall-runoff modelling**: the primer. Chichester: John Wiley.
- BIGARELLA, J.J.; BIGARRELLA, I.E.K.; JOST, H. (1975). Catastrophic events in the Tubarão area. **Boletim Paranaense de Geociências**, n.33, p.200-206.

BRASIL. (1997). **Resolução n.º005/97/CIRM**, aprova o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro II (PNGC II). Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/destaques/item/8644-plano-nacional-de-gerenciamento-costeiro-pngc#pngc-ii>>.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2009). Validação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 3, p. 37 – 50.

BRÁZDIL, R.; KUNDZEWICZ, Z. W.; BENITO, G. (2006). Historical hydrology for studying flood risk in Europe. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 5, p. 739 - 764. Special issue: Historical Hydrology.

BÜRGER, K.; DOSTAL, P.; SEIDEL, J.; IMBERY, F.; BARRIENDOS, M.; MAYER, H.; GLASER, R. (2006). Hydrometeorological reconstruction of the 1824 flood event in the Neckar River basin (southwest Germany). **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 5, p. 864 – 877. Special issue: Historical Hydrology.

CEMADEN. (2017). Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Estudos apontam que processos costeiros/oceânicos impactam os municípios litorâneos monitorados pelo CEMADEN**. Notícia veiculada em 27 de dezembro de 2017.

CLARKE, R. T. (1999). Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to rating-curve indefiniton. **Journal of Hydrology**, n. 222, p. 185 – 190.

CLARKE, R. T.; MENDIONDO, E. M.; BRUSA, L.C. (2000). Uncertainties in mean discharges from two large South American rivers due to rating curve variability. **Hydrological Sciences Journal**, v. 45, n. 2, p. 221 – 236.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2001). Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, 2001, p. 95 - 118.

COLLISCHONN, W. (2001). **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 194 f. Tese. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C.E. M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, 2007, p. 878 – 897.

COMPO, G.P., WHITAKER, J.S., SARDESHMUKH, P.D., MATSUI, N., ALLAN, R.J., YIN, X., GLEASON, B.E., VOSE, R.S., RUTLEDGE, G., BESSEMOULIN, P., BRÖNNIMANN, S., BRUNET, M., CROUTHAMEL, R.I., GRANT, A.N., GROISMAN, P.Y., JONES, P.D., KRUK, M.C., KRUGER, A.C., MARSHALL, G.J., MAUGERI, M., MOK, H.Y., NORDLI ROSS, T.F., TRIGO, R.M., WANG, X. L., WOODRUFF, S.D.,

WORLEY, S.J., 2011. The twentieth century reanalysis project. **Q. J. R. Meteorolog. Soc.** v. 137, n. 654, p. 1 - 28.

CORATO, G.; AMMARI, A.; MORAMARCO, T. (2014). Conventional point-velocity records and surface velocity observations for estimating high flow discharge. **Entropy**. v. 16, n. 10, p. 5546 – 5559.

D'AQUINO, C. A.; SILVA, L. F.; COUCEIRO, M. A. A.; PEREIRA, M.D.; SCHETTINI, C. A. F. (2011). Transporte de sal e hidrodinâmica do estuário do Rio Tubarão – SC, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 3, p. 113 – 125.

DEE, D. P.; BALMASEDA, M.; BALSAMO, G.; ENGELEN, R.; SIMMONS, A. J.; THÉPAUT, J.-N. (2014). Toward a consistent reanalysis of the climate system. **American Meteorological Society**, v. 95, p. 1235 – 1248.

DI BALDASSARRE, CASTELLARIN, A.; BRATH, A. (2009). Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy. **Hydrological Sciences Journal**, v. 54, n. 6, p. 1007 – 1017.

DI BALDASSARRE, G.; CLAPS, P. (2011). A hydraulic study on the applicability of flood rating curves. **Hydrology Research**, v. 42, n. 1, p. 10 – 19.

DI BALDASSARRE, G. (2017). Socio-hydrology of floods. **Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science**.

DINGMAN, S.L. (2009). **Fluvial hydraulics**. New York: Oxford University Press. 559 p.

DOMENEGHETTI, A.; CASTELLARIN, A.; BRATH, A. (2012). Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 16, p. 1191 – 1202.

DYMOND, J. R.; CHRISTIAN, R. (1982). Accuracy of discharge determined from a rating curve. **Hydrological Sciences Journal**, v. 27, n. 4, p. 493 – 504.

ELLEDER, L. (2010). Reconstruction of the 1784 flood hydrograph for the Vltava River in Prague, Czech Republic. **Global and Planetary Change**, v. 70, n. 1-4, p. 117-124.

EMBRAPA. (2004). **Solos do Estado de Santa Catarina**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. n. 46. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos.

EPAGRI. (2017). Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. **Informações técnicas: Época de Semeadura (Arroz)**.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2014a). Integração do modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243 – 254.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. (2014b). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial

das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n.4, p. 137 – 147.

FRASSON, M. M. (2011). **A enchente de 1974 em Tubarão – SC: a construção de um desastre natural**. 59 f. Graduação em História. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, SC.

FORTUNATO, A.; FREIRE, P.; BERTIN, X.; RODRIGUES, M.; FERREIRA, J.; LIBERATO, M. L.R. (2017). A numerical study of the February 15, 1941 storm in the Tagus estuary. **Continental Shelf Research**, v. 144, p. 50-64.

GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. (2011). Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **In: Anais de Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)**, 19., Maceió, AL.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. (2013). Redução dos desastres naturais: desafio dos geógrafos. **Ambiência**, v. 9, n. 1, p. 145 – 172.

GOERL, R. F.; CHAFFE, P. L. B.; SPECKHANN, G. A.; PELLERIN, J. R. G. M.; FLORES, J. A. A.; ABREU, J. J.; SANCHEZ, G. M. (2017). O modelo HAND como ferramenta de mapeamento de áreas propensas a inundar. **In: Anais de Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)**, 22., Florianópolis, SC.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. (1976). **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escoamentos em meio tropical úmido**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1976. 48 p. (Relatório n. 1080)

GUIMING HU, C. C. H.; YALI ZHOY, J. P.; XIAOCHUN, ZHA, Y. G.; YUZHU ZHANG, X. Z. (2016). Hydrological studies of the historical and palaeoflood events on the middle Yihe River, China. **Geomorphology**, n. 274, p. 152 – 161.

GUPTA, H. V.; SORROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal Hydrologic Eng.** v. 4, n. 2, pp. 135 – 143.

GUPTA, H.V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, n. 377, pp. 80 – 91.

HERGET, J.; MEURS, H. (2010). Reconstructing peak discharges for historic flood levels in the city of Cologne, Germany. **Global and Planetary Change**, n. 70, p. 108 – 116.

HERSBACH, H., PEUBEY, C., SIMMONS, A., POLI, P.D.D., BERRISFORD, P. (2013). **ERA-20CM, a Twentieth-Century Atmospheric Model Ensemble**. Era report Series n. 16. Technical Report 16. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, p. 44.

HORRITT, M. S.; DI BALDASSARRE, G.; BATES, P. D.; BRATH, A. (2007). 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, p. 2745-2759.

IBGE. (2018). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População estimada (Tubarão, SC)**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/tubarao/panorama>>.

IBGE. (2017b). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área da unidade territorial (Tubarão, SC)**: área territorial brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010). **Atlas Geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil**. Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

INMET. (2018). Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília, DF: 2018.

IPPS. (2010). Instituto de Políticas Públicas e Sociais. **Batimetria das Lagoas de Imaruí, Santo Antônio e Mirim está concluída**. Imaruí, SC. Disponível em: <<http://www.ipps.org.br/site/index.php/category/acoes/batimetria/>>.

JACOMINE, P. K. T. A nova classificação brasileira de solos. **In: Anais de Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**. Recife, PE. v. 6. p. 161 – 179. 2009.

JARDIM, P. F.; FLEISCHMANN, A. S.; PELINSON, D.; OLIVEIRA, A. M.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. (2017). **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB-IPH 2017 utilizando o IPH-Hydro Tools**. Grupo de Pesquisa Hidrologia de Grande Escala. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J.O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593 – 1600.

KLEIN, A. H. F.; SHORT, A. D. BONETTI, J. (2016). Santa Catarina Beach Systems. **In: SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. F. (editors). Brazil Beach Systems**. Coastal Research Library, 17, Springer. p. 465 – 506.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P.; ENGSTER, E. C.; PAIXÃO, M. A.(2015). Historical analyses of debris flow disaster occurrences and of their scientific investigation in Brazil. **Labor & Engenho**, v. 9, n. 4, p. 76 – 89.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; MONTEIRO, L. R. (2018). Integração das ciências e das tecnologias para redução dos desastres naturais: sócio-hidrologia e sócio-tecnologia. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. esp., p. 206 – 231.

LAGO, P. F. (1983). **Calamidade**: a enchente do Rio Tubarão. Florianópolis: UFSC.

- LLASAT, M.; BARRIENDOS, M.; BARRERA, A.; RIGO, T. (2005). Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. **Journal of Hydrology**, v. 313, n. 1-2, p. 32-47.
- LIMA, M.; RODRIGUES, M. L. G.; SACCO, F.; CRUZ, G. S.; ALVES, M. P. A. (2009). Análise da configuração atmosférica associada a eventos extremos de chuva no litoral do Estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. In: Simpósio Internacional de Climatologia. 3. Gramado, RS. Sociedade Brasileira de Meteorologia.
- LOITZENBAUER, E.; MENDES, C. A. B. (2016). Integração da gestão de recursos hídricos e da zona costeira em Santa Catarina: a zona de influência costeira nas bacias dos rios Mampituba, Araranguá, Tubarão e Tijucas, SC. In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 2016. v. 21. n. 2. p. 466 – 477.
- LOPES, V. A. R. (2017). **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento**. 181 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- LÜTHI, B.; PHILIPPE, T.; PEÑA-HARO, S. (2014). Mobile device app for small open-channel flow measurement. In: **Proceedings of the International Congress on Environmental Modelling and Software**, 7, San Diego, Califórnia, USA.
- MACHADO, C. C. (2005). **Tubarão 1974: fatos e relatos da grande enchente**. Tubarão: Ed. Unisul.
- MASOERO, A.; CLAPS, P.; ASSELMAN, N. E. M.; MOSSELMAN, E.; DI BALDASSARRE, G. (2013). Reconstruction and analysis of the Po River inundation of 1951. **Hydrological processes**, v. 27, n. 9, p. 1341 – 1348.
- MARQUES, R. (2010). **Variabilidade da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Tubarão/SC de 1946 a 2006**. 206 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- McMILLAN, H. K.; WESTERBERG, I. K.; KRUEGER, T. (2018). Hydrological data uncertainty and its implications. **WIRES Water**. p. 1 – 14.
- MCTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L. F.; DAVIS, C. A.; ATALLAH, E. H.; GYAKUM, J. R.; EMANUEL, K. A. (2006). Analysis of hurricane Catarina (2004). **American Meteorological Society**, v.134, p.3029 – 3053.
- MIZUKAMI, N.; RAKOVEC, O.; NEWMAN, A.; CLARK, M.; WOOD, A.; GUPTA, H.; KUMAR, R. (2018). On the choice of calibration metrics for “high flow” estimation hydrologic models. **Hydroly and Earth System Sciences**. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-2018-391>>, in review, 2018.
- MOFTAKHARI, H. R.; SALVADORI, G.; AGHAKOUCHAK, A.; SANDERS, B. F.; MATTHEW, R. A. (2017). **Compounding effects of sea level rise and fluvial**

flooding. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), v. 114, n. 37, p. 1 – 6.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. (2016). Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 21. n. 1. pp. 152 – 167.

MONTE, B. E. O. M.; MONTEIRO, L. R.; TAVARES, T. G. A.; CAMPOS, J. A.; VANELLI, F. M.; SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. (2017). Índice de perigo aplicado a inundações com influência de maré. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 22., Florianópolis, SC. **Anais... XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2017.

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. (2013). Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)**, v. 10, n.2, p. 13 – 25.

MOSLEY, M. P.; MCKERCHAR, A. I. (1992). Streamflow: Chap. 8. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill Inc: New York.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007). Modelo evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. v. 5, n. 3, pp. 885 – 900.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. n. 10, pp. 282 – 290.

NCDC/NOAA. (2018) National Climatic Data Center / National Oceanic and Atmospheric Administration. (2018). **Marine Beaufort Scale**. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/sites/default/files/attachments/Marine_Beaufort_Scale.pdf>. Acesso em: 26/11/2018.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M. (2011). “Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model”. **Journal of Hydrology**, v. 404, p. 13 – 29.

OLIVEIRA, F. A. O.; PEREIRA, T. S. R.; SOARES, A. K.; FORMIGA, K.T. M. (2016). Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 21, n. 4, pp. 707 – 718.

PAIVA, R. C. D. (2009). **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias**: estudo de caso Bacia do Rio Solimões. 168 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

PONTES, P. R.M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D.C. (2015). Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação

inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, pp. 888 - 904.

PONTES, P. R. M. (2016) **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da Bacia do Rio da Prata**. 194 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

RAST, M.; JOHANNESSEN, J.; MAUSER, W. (2014). Review of understanding of Earth's hydrological cycle: observations, theory and modelling. **Surv Geophys**. v. 35, n. 3, pp. 491 – 513.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. (2012). Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34 – 50.

REMO, J.W.F.; PINTER, N. (2007). Retro-modeling the Middle Mississippi River. **Journal of Hydrology**, n.337, p. 421 – 435.

REMO, J.W.F.; PINTER, N.; HEINE, R. (2009). The use of retro- and scenario-modeling to assess effects of 100+ years river of engineering and land-cover change on Middle and Lower Mississippi River flood stages. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 403 – 416.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. (2015). Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 394 – 403.

RODRÍGUEZ, M. G.; NICOLODI, J. L.; GUTIÉRREZ, O. Q.; LOSADA, V. C.; HERMOSA, A. E. (2016). Brazilian Coastal Processes: wind, wave climate and sea level. In: SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. F. (editors). *Brazil Beach Systems*. Coastal Research Library, 17, Springer. p. 37 – 66.

RUIZ-BELLET, J. L.; BALASCH, J. C.; TUSET, J.; BARRIENDOS, M.; MAZON, J.; PINO, D. (2015). Historical, hydraulic, hydrological and meteorological reconstruction of 1874 Santa Tecla flash floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula). **Journal of Hydrology**, n. 524, p. 279 – 295.

SAMELA, C.; MANFREDA, S.; TROY, T. J. (2017). Dataset of 100-year flood susceptibility maps for the continental U.S. derived with a geomorphic method. **Data in Brief**, v.12, p. 203 - 207.

SDM. (1998) Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Estado de Santa Catarina. **Diagnóstico dos Recursos Hídricos e Organização dos Agentes da Bacia do Rio Tubarão e Complexo Lagunar**. Universidade do Sul de Santa Catarina/ Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos. v.2.

SEGURA-BELTRÁN, F.; SANCHIS-IBOR, C.; MORALES-HERNÁNDEZ, M.; GONZÁLEZ-SANCHIS, M.; BUSSI, G.; ORTIZ, E. (2016). Using post-flood surveys and geomorphologic mapping to evaluate hydrological and hydraulic models: The

flash flood of the Girona River (Spain) in 2007. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 310 - 329.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. J.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2016). IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n.1, p. 274 – 287.

SUDHAUS, D.; SEIDEL, J.; BÜRGER, K.; DOSTAL, P.; IMBERY, F.; MAYER, H.; GLASER, R.; KONOLD, W. (2008). Discharges of past flood events based on historical river profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, p. 1201 - 1209.

TASCA, F. A.; GOERL, R. F.; CAPRARIO, J.; RECK, A. S.; MIRANDA, N.; FINOTTI, A. R.; POMPEO, C. A. (2017). Análise espacial de desastres hidrológicos sob a ótica de bacias hidrográficas. In: Anais de Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 22., Florianópolis, SC.

TAURO, F.; OLIVIERI, G.; PETROSELLI, A.; PORFIRI, M.; GRIMALDI, S. (2016). Flow monitoring with a camera: a case study on a flood event in the Tiber River. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 118, p. 1 – 11.

THORNDYCRAFT, V. R.; BENITO, G.; RICO, M.; SOPEÑA, A.; SÁNCHEZ-MOYA, Y.; CASAS, A. (2005). A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. **Journal of Hydrology**, n. 313, p. 16 – 31.

TUCCI, C. E. M. (2000). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. 1. reimpr. Porto Alegre, RS: Ed. Universidade/ UFRGS/ ABRH, 943 p.

UNIÃO EUROPEIA. (2007). Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. **Diretriz 2007/60/CE**, de 23 de outubro de 2007, dispõe sobre avaliação e gestão dos riscos de inundações. Jornal Oficial da União Europeia, 06/11/2007, transcrito em português.

UNISDR. (2016). United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction**. Geneva: UNISDR, 41p.

UNITED NATIONS. (2017). Factsheet: People and Oceans. The Ocean Conference. New York, 05 – 09 Jun. 2017.

USACE-HEC. (2016). **HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual**, Version 5.0. Brummer, G. W.: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

VANELLI, F. M.; MONTEIRO, L. R.; ZANANDREA, F.; LIMA, G. K. R.; CAMANO, E. B. S.; GOLDENFUM, J. A. (2017). Condição de inicialização em modelagem

hidrodinâmica para mapeamento de inundações baseada em vazões constantes. **In:** Anais de Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 22., Florianópolis, SC.

VANELLI, F. M.; WONGCHUIG, S. C.; GOLDENFUM, J. A.; FAN, F.M. (2018a). Avaliação do uso de precipitações provenientes de reanálise para reconstrução hidrológica e hidrodinâmica de evento em bacia hidrográfica no Sul Catarinense (Brasil). **In:** Anais Encontro Nacional de Desastres (END), 1., Porto Alegre, RS.

VANELLI, F. M.; MONTEIRO, L. R.; FAN, F. M. (2018b). Curva-chave obtida por simulação hidrodinâmica. **In:** Anais do Congresso Latinoamericano de Hidraulica, 28., Buenos Aires, Argentina.

VELÁSQUEZ, N.; HOYOS, C. D.; VÉLEZ, J. I.; ZAPATA, E. (2018). Reconstructing the Salgar 2015 flash flood using radar retrievals and a conceptual modeling framework: a basis for a better flood generating mechanisms discrimination. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, em revisão.

VETTORETTI, A. (2004). **Estação da Piedade**. Tubarão, SC: Ed. Copiart. 169 p.

VETTORETTI, A. (1992). **História de Tubarão das origens ao século XX**. Tubarão, SC: Ed. Prefeitura Municipal de Tubarão, 426 p.

WESTERBERG, I.; GUERRERO, J. –L.; SEIBERT, J.; BEVEN, K. B.; HALLDIN, S. (2010). Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca Rives, Honduras. **Hydrological Processes**, n. 25, p. 603 – 613.

ZANANDREA, F.; VANELLI, F. M.; TAVARES, T. G. A.; GOLDENFUM, J. A. (2018). Delimitação da área potencialmente inundada pela cheia histórica de 1974 em Tubarão, SC. **In:** Anais de Encontro Nacional de Desastres (END), 1., Porto Alegre, RS.

Apêndices

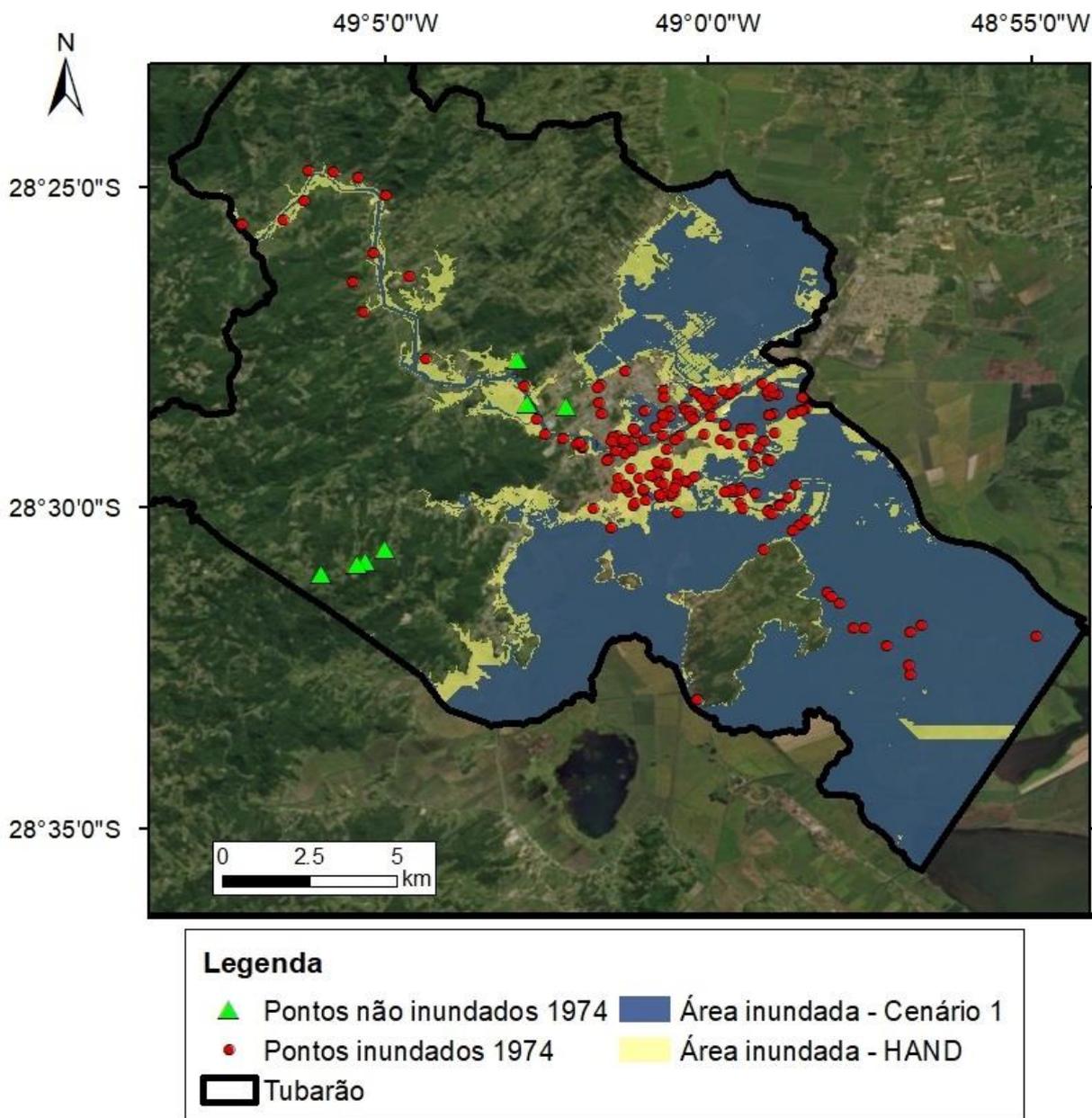
Apêndice B – Conjunto de parâmetros de solo.

Tabela B.1 – Valores dos parâmetros de solo para cada sub-bacia.

Sub-bacia Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão							
Classe de Resposta Hidrológica	Wm (mm)	b (-)	Kbas (mm)	Kint (mm)	Valor para todas CRH, exceto água		
Floresta + Raso	660	0,22	0,2	3,6	XL	0,67	-
Floresta + Profundo	880	0,18	0,2	4,0	CAP	0	$\frac{\text{mm}}{\text{d}}$
Agricultura e pastagem + Raso	495	0,22	0,2	3,0	Wc	0,1	mm
Agricultura e pastagem + Profundo	550	0,18	0,2	4,0	CS	60	-
Solo + Raso	220	0,18	0,2	2,6	CI	30	-
Solo + Profundo	220	0,18	0,2	3,0	CB	9.000	h
Impermeável	176	0,18	0,2	2,1	QB	0,01	$\frac{\text{m}^3}{\text{s km}^2}$
Água	0	0	0	0			
Sub-bacia Rio Capivari							
Classe de Resposta Hidrológica	Wm (mm)	b (-)	Kbas (mm)	Kint (mm)	Valor para todas CRH, exceto água		
Floresta + Raso	1080	0,22	0,1	5,0	XL	0,67	-
Floresta + Profundo	1200	0,18	0,1	5,0	CAP	0	$\frac{\text{mm}}{\text{d}}$
Agricultura e pastagem + Raso	720	0,22	0,1	5,0	Wc	0,1	mm
Agricultura e pastagem + Profundo	900	0,18	0,1	5,0	CS	75	-
Solo + Raso	360	0,18	0,1	5,0	CI	20	-
Solo + Profundo	480	0,18	0,1	5,0	CB	5.000	h
Impermeável	252	0,18	0,1	5,0	QB	0,01	$\frac{\text{m}^3}{\text{s km}^2}$
Água	0	0	0	0			

Legenda: *Wm* é armazenamento máximo na camada do solo, *b* é parâmetro adimensional de não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo, *Kint* é parâmetro de escoamento subsuperficial, *Kbas* é parâmetro de escoamento subterrâneo, *CS* é coeficiente de retardo do reservatório superficial, *CI* é coeficiente de retardo do reservatório subsuperficial, *CB* é coeficiente de retardo do reservatório subterrâneo, *XL* é índice de porosidade do solo, *CAP* é fluxo ascendente de retorno ao solo, *Wc* é limite de armazenamento para ocorrer fluxo ascendente.

Apêndice C – Cenário 1: Área inundada em comparação com os dados de referência

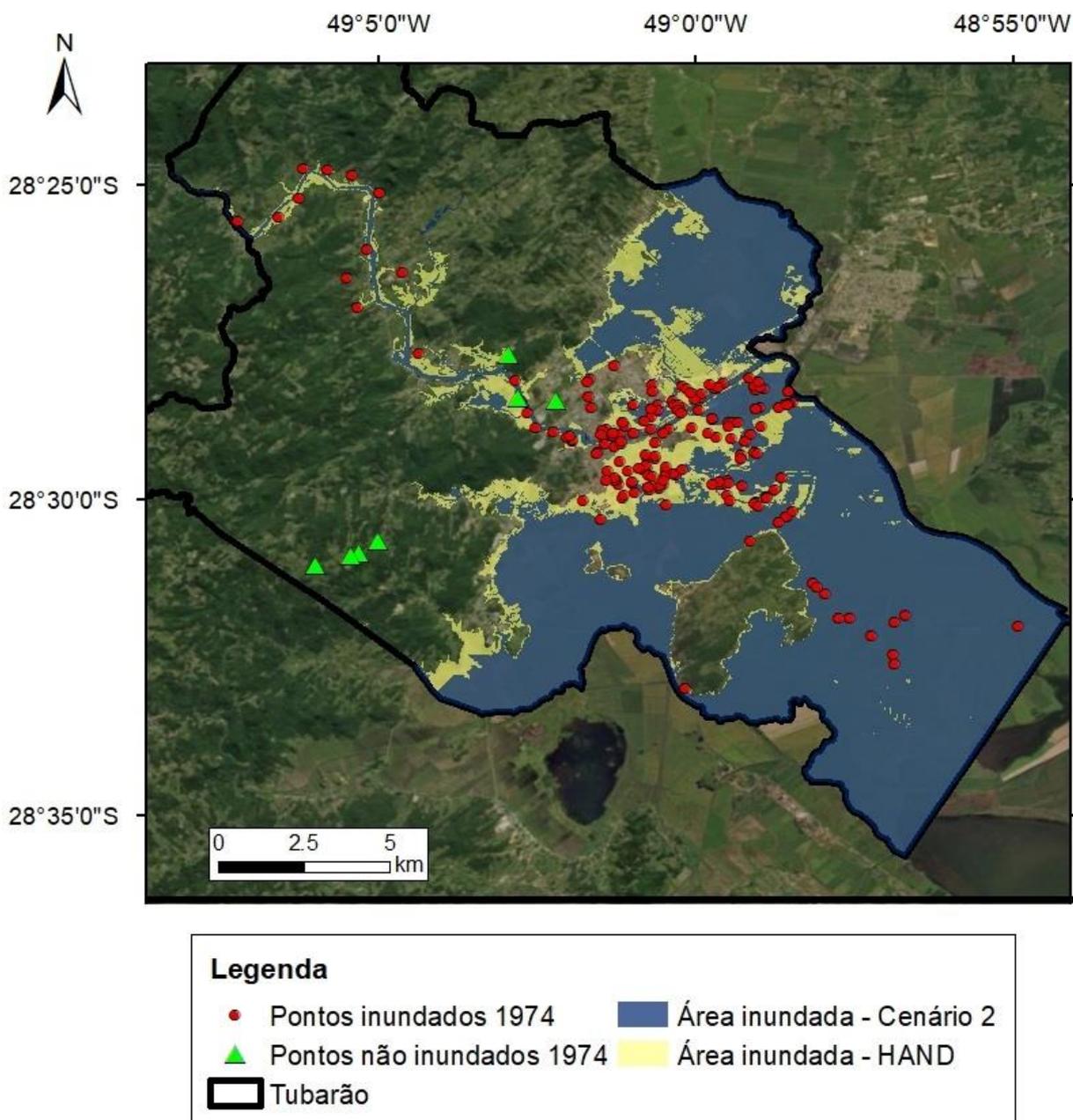


Esclarecimentos:

Cenário 1: Precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e nível do mar como condição de contorno de jusante

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice D – Cenário 2: Área inundada em comparação com os dados de referência

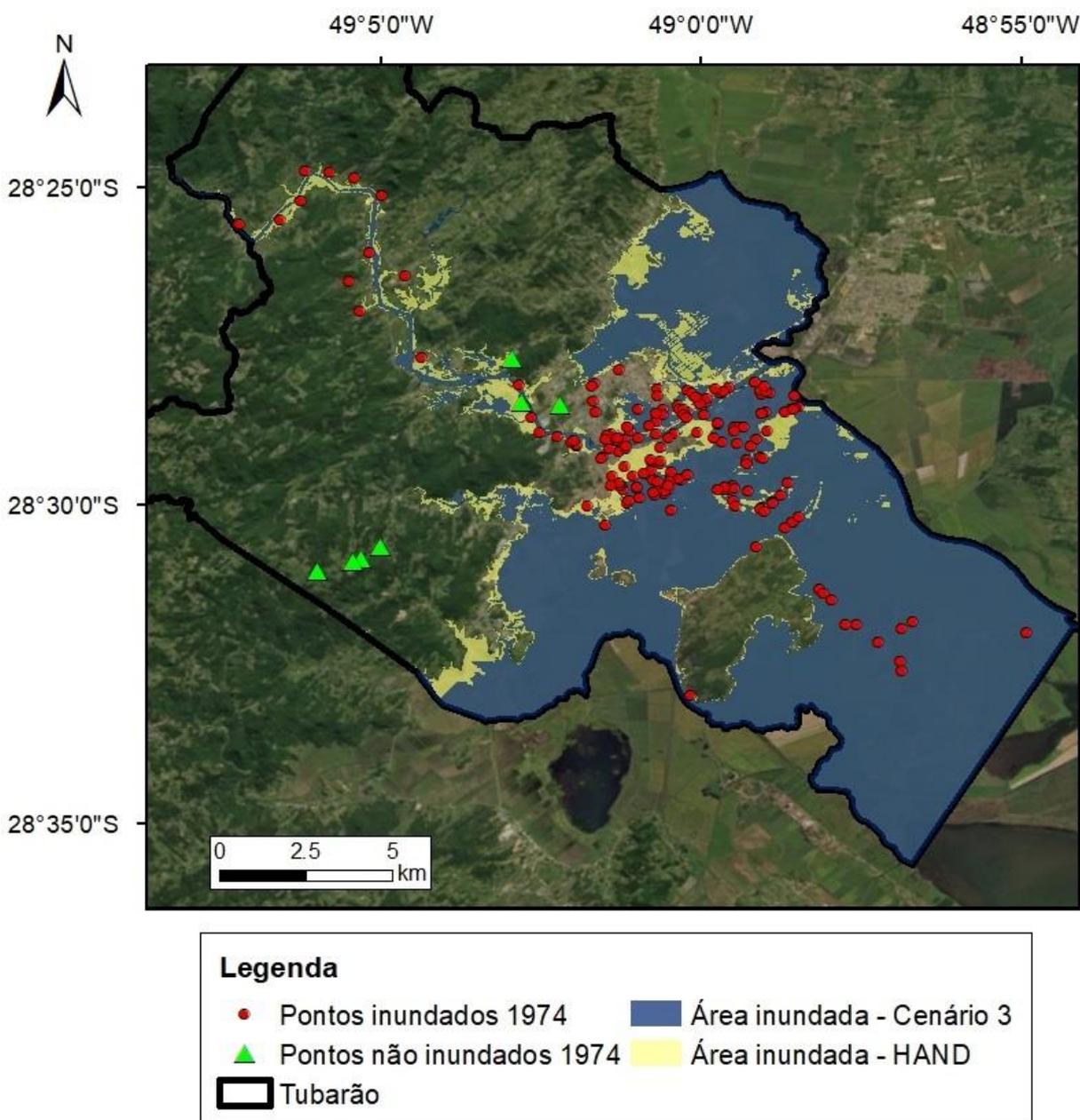


Esclarecimentos:

Cenário 2: Precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e altura da maré de 1 m como condição de contorno de jusante

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice E – Cenário 3: Área inundada em comparação com os dados de referência

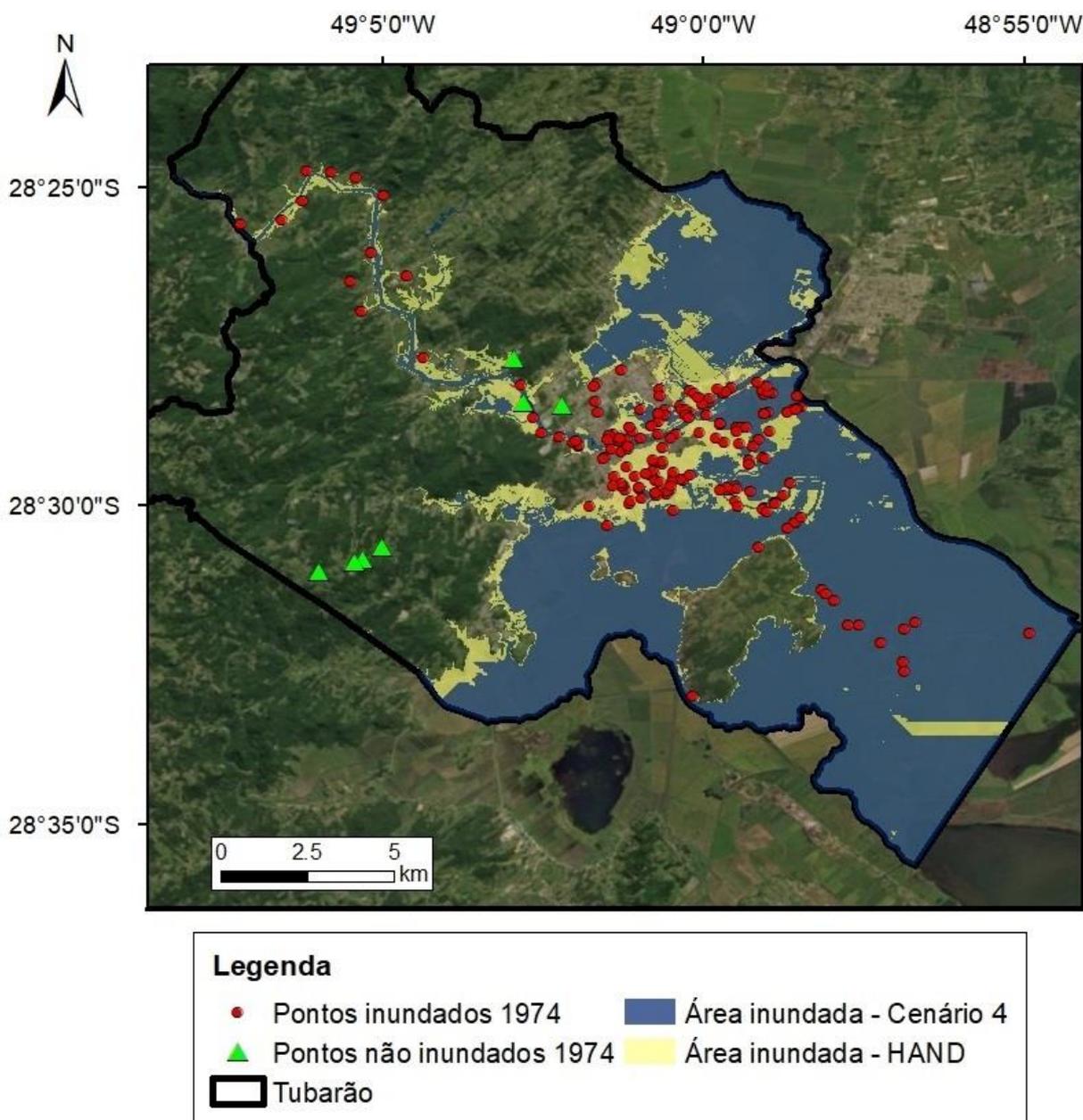


Esclarecimentos:

Cenário 3: Precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e altura da maré de 3 m como condição de contorno de jusante

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice F – Cenário 4: Área inundada em comparação com os dados de referência

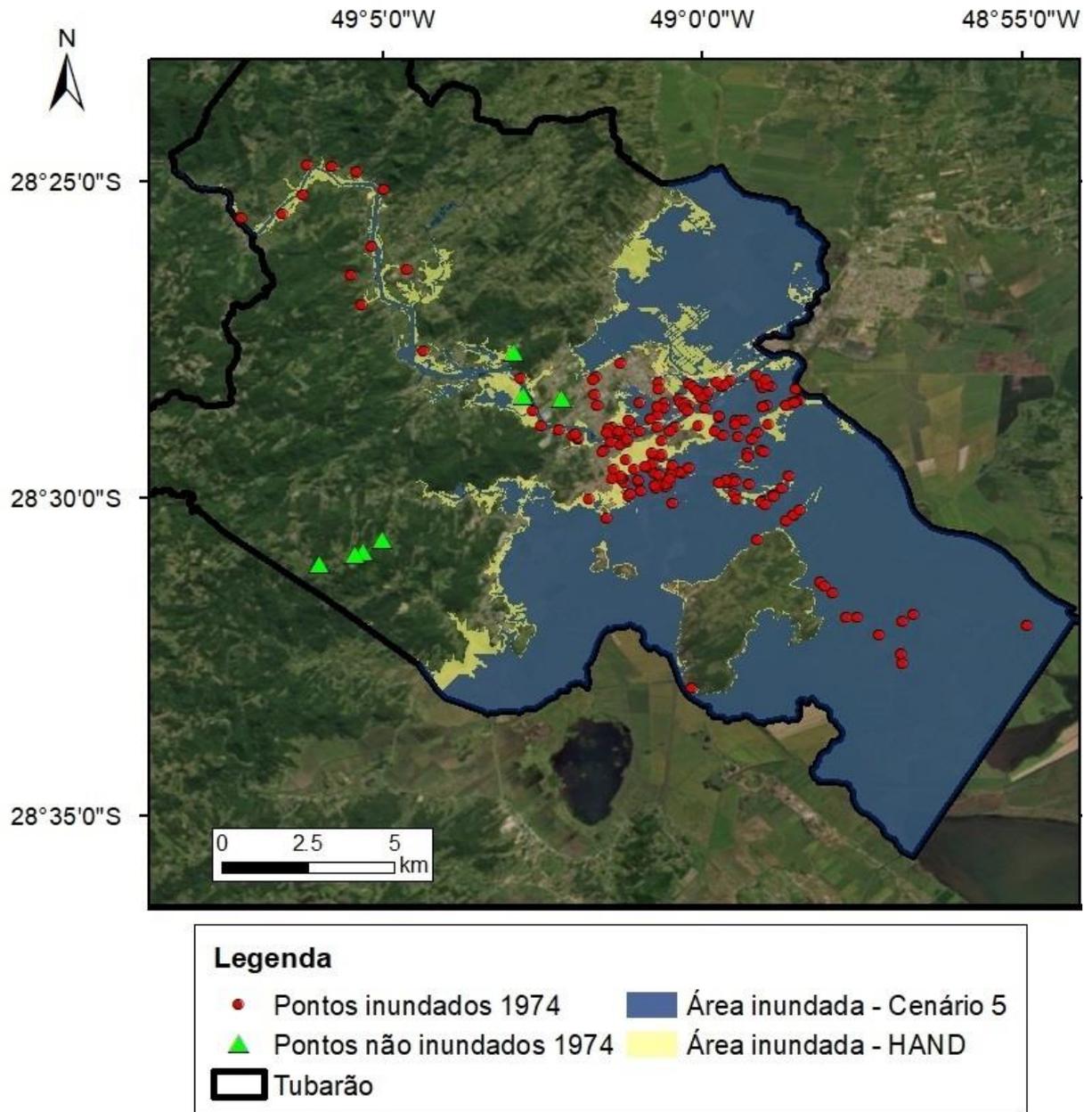


Esclarecimentos:

Cenário 4: Precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e o vento na direção leste com velocidade de $12,5 \text{ m s}^{-1}$ como condição de contorno de jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice G – Cenário 5: Área inundada em comparação com os dados de referência

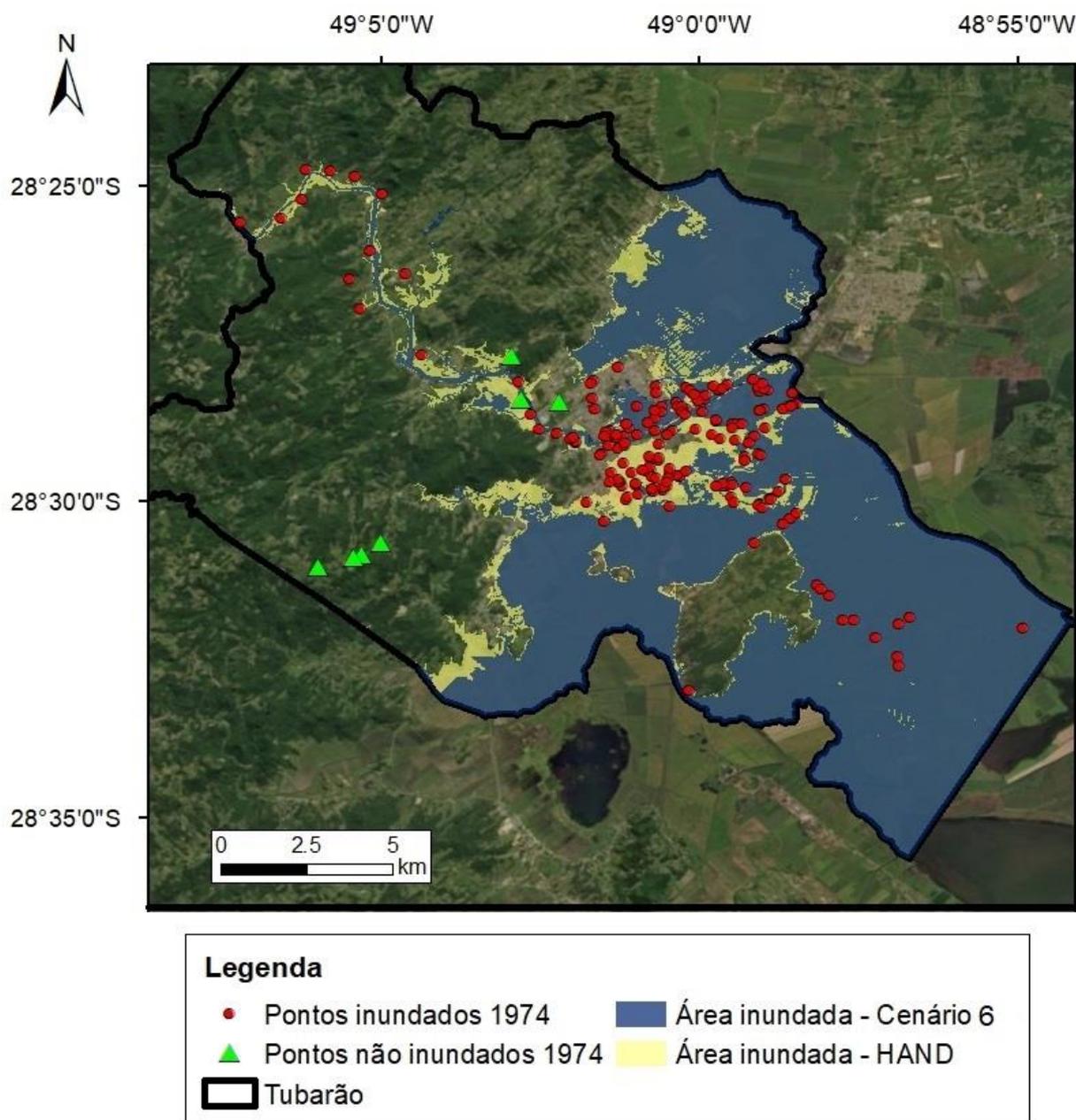


Esclarecimentos:

Cenário 5: Precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e, altura da maré de 3 m e vento na direção leste com velocidade de $12,5 \text{ m s}^{-1}$ como condições de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice H – Cenário 6: Área inundada em comparação com os dados de referência

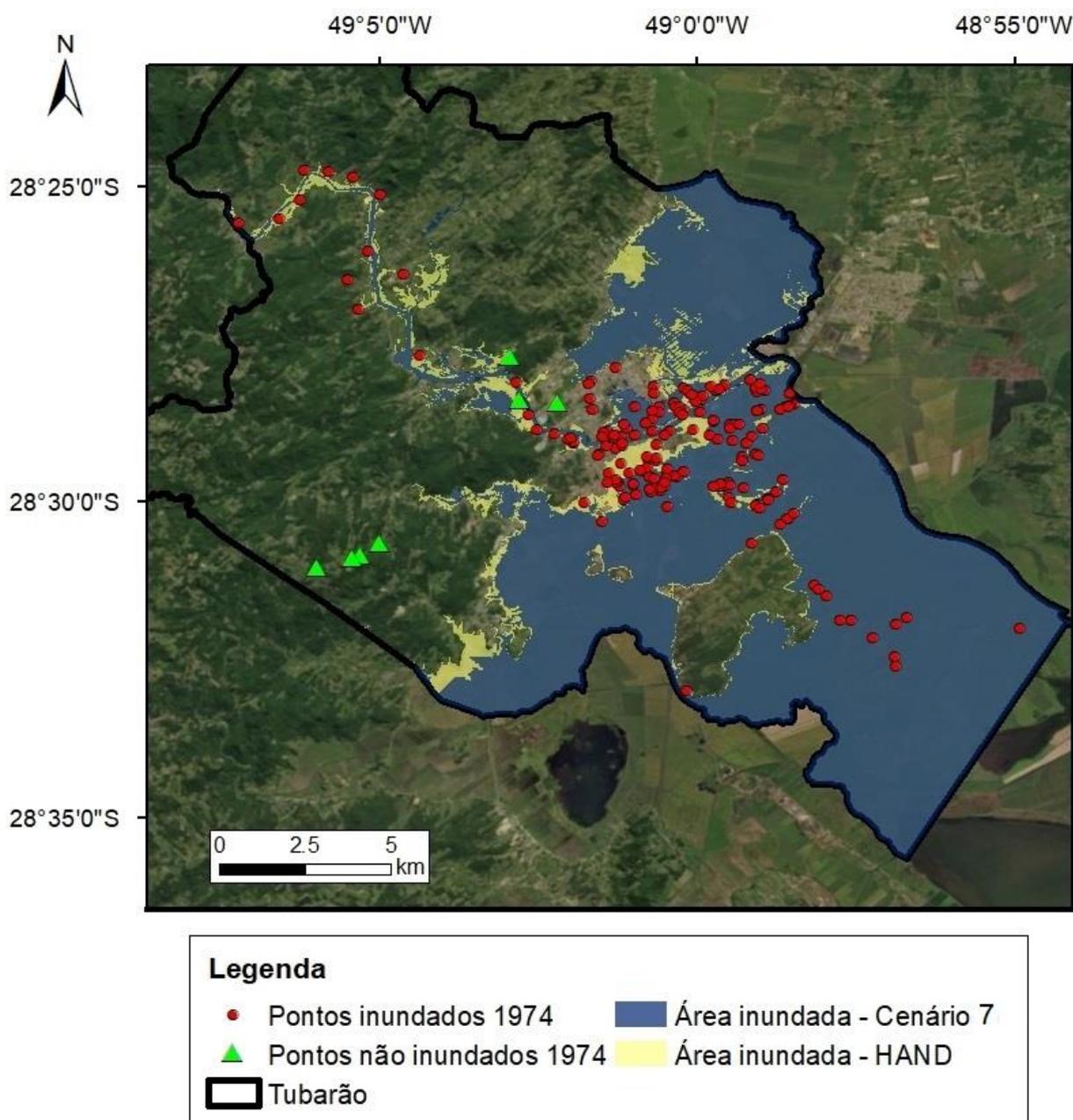


Esclarecimentos:

Cenário 6: Canal com redução de 50% da profundidade com precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e nível do mar como condição de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice I – Cenário 7: Área inundada em comparação com os dados de referência

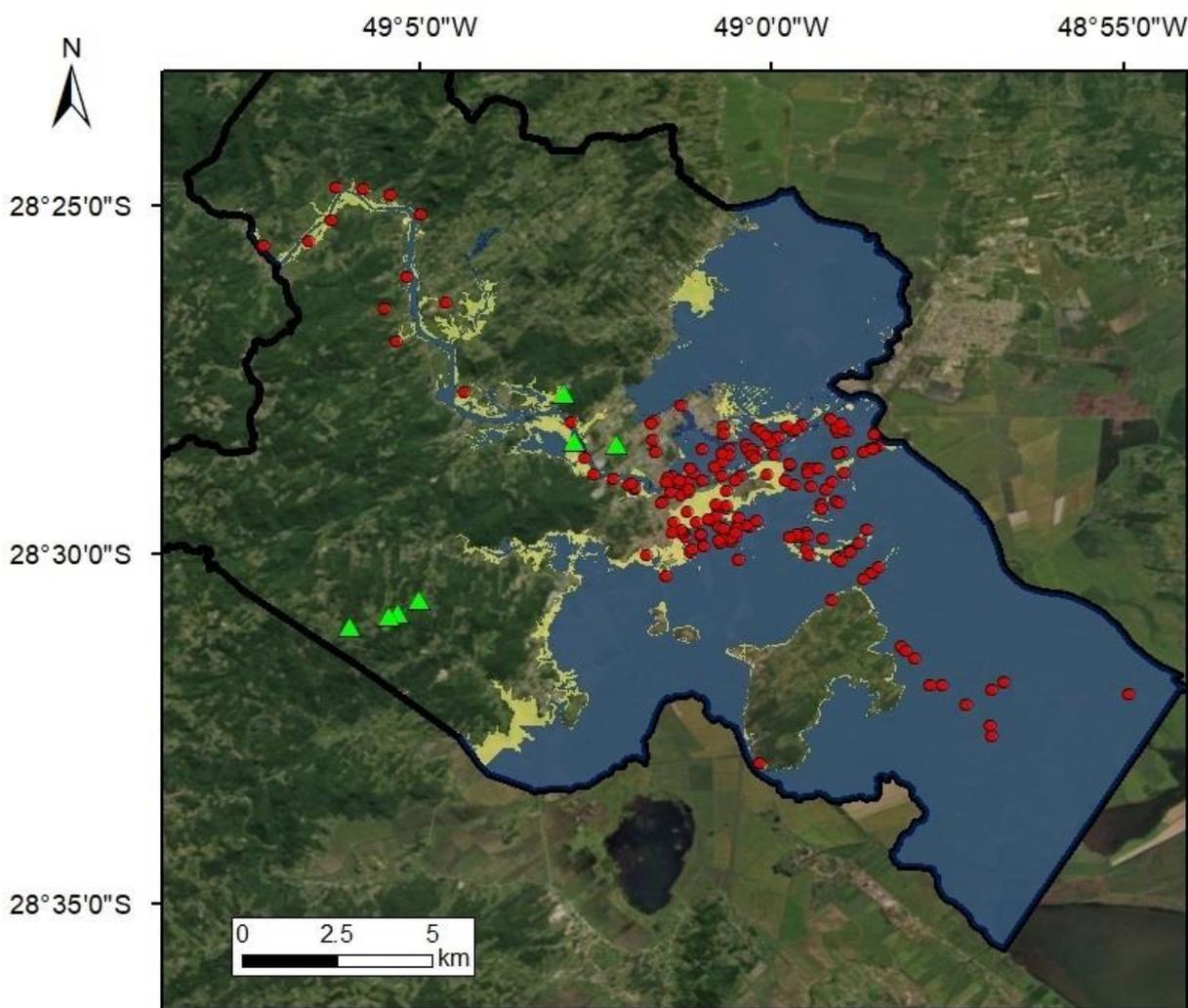


Esclarecimentos:

Cenário 7: Canal com redução de 50% da profundidade com precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e, altura da maré de 3 m como condição de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice J – Cenário 8: Área inundada em comparação com os dados de referência



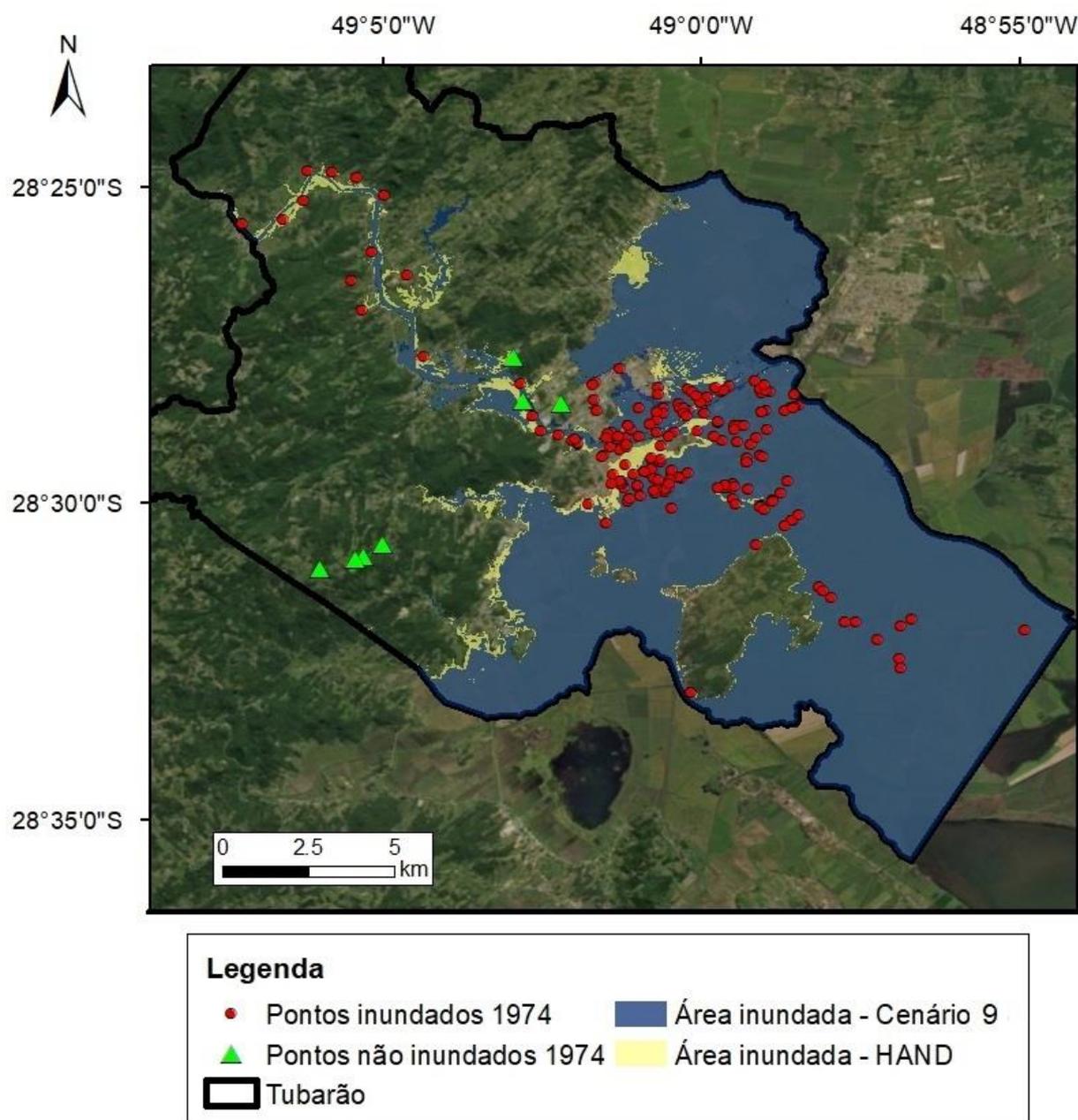
Legenda	
● Pontos inundados 1974	■ Área inundada - Cenário 8
▲ Pontos não inundados 1974	■ Área inundada - HAND
▭ Tubarão	

Esclarecimentos:

Cenário 8: Canal com redução de 75% da profundidade com precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e, altura da maré de 3 m como condição de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice L – Cenário 9: Área inundada em comparação com os dados de referência

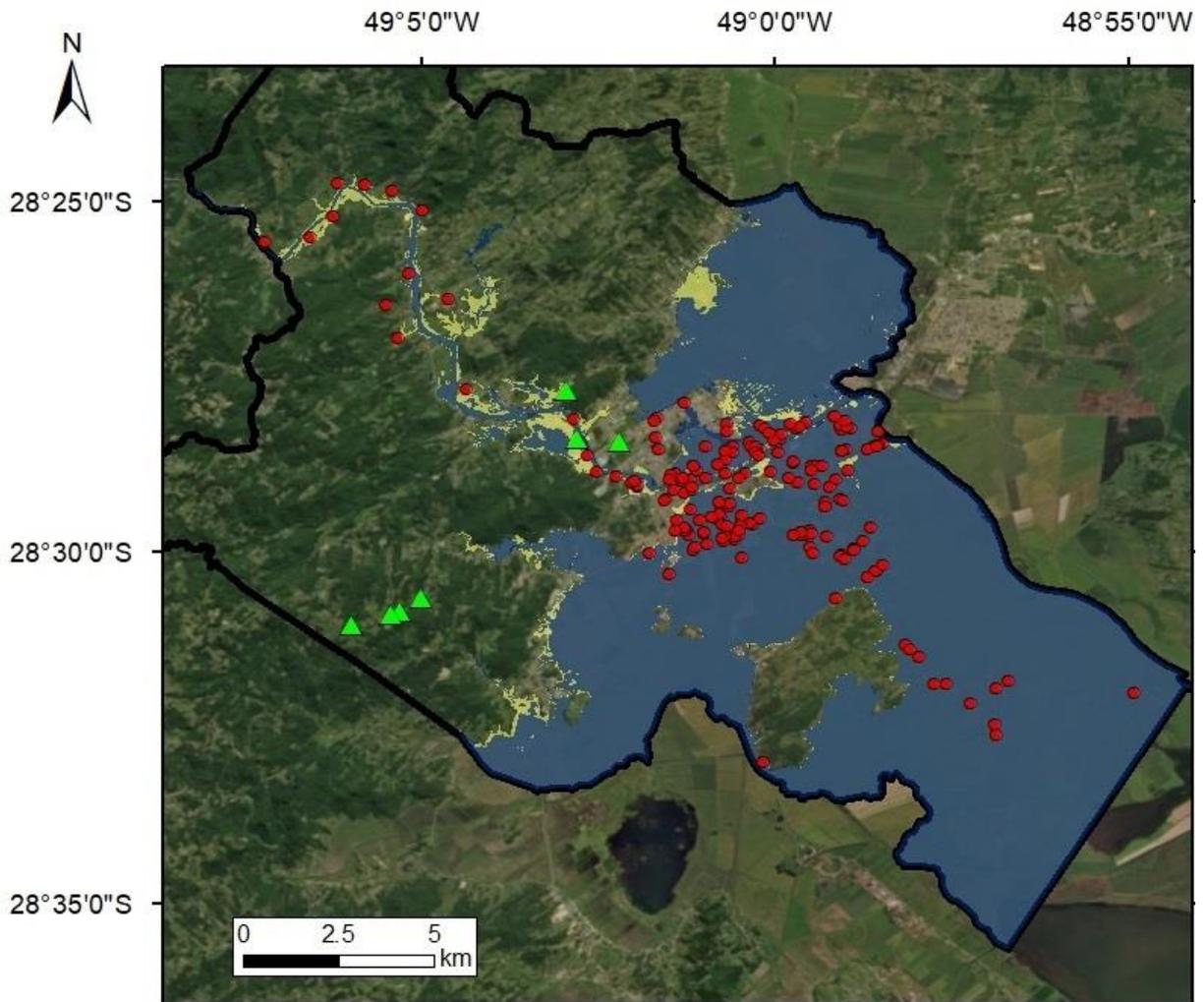


Esclarecimentos:

Cenário 9: Canal com redução de 100% da profundidade com precipitação proveniente das estações pluviométricas para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e, altura da maré de 3 m como condição de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice M – Cenário 10: Área inundada em comparação com os dados de referência

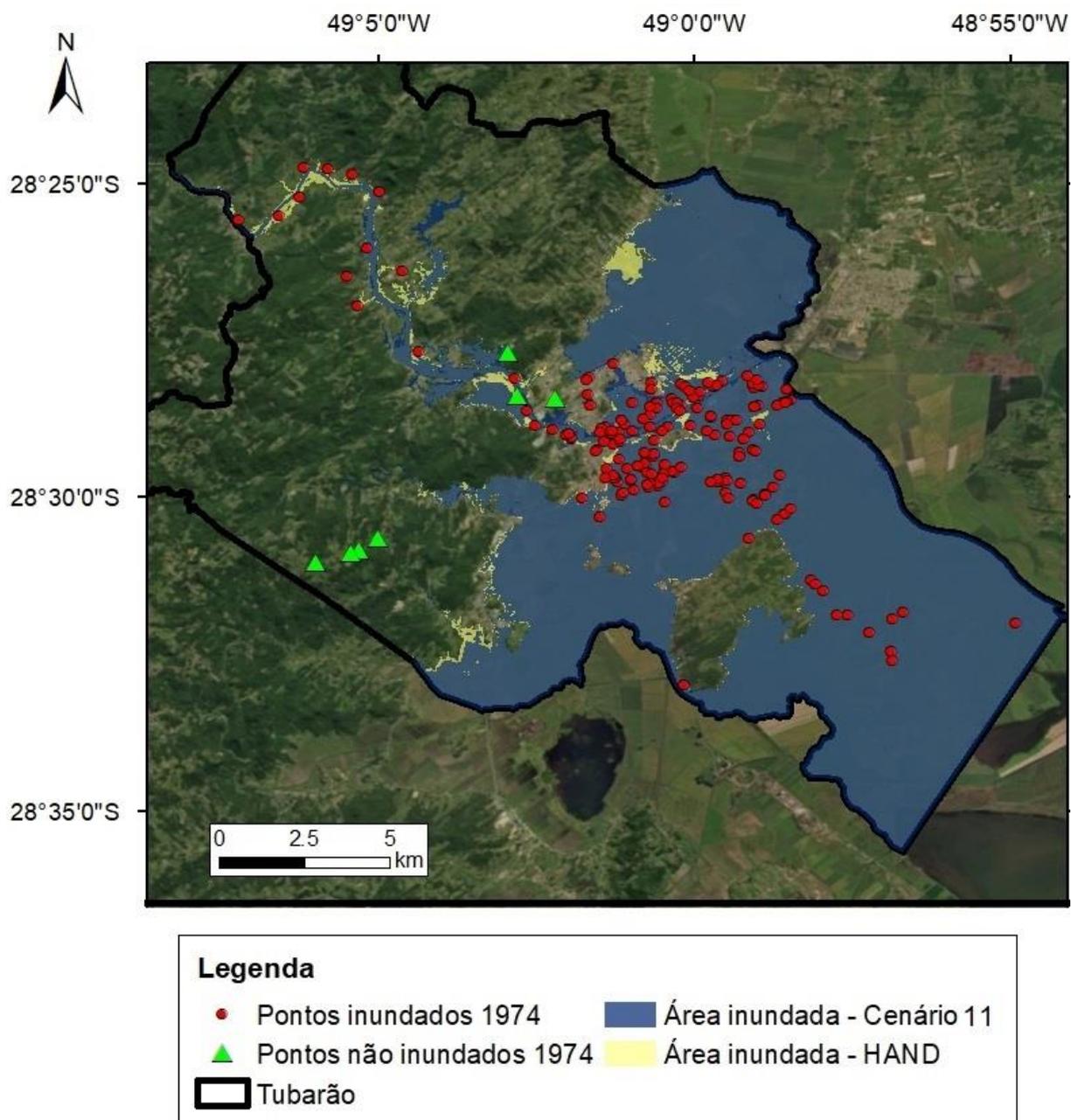


Esclarecimentos:

Cenário 10: Precipitação com incremento de 50% para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e o nível do mar como condição de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice N – Cenário 11: Área inundada em comparação com os dados de referência

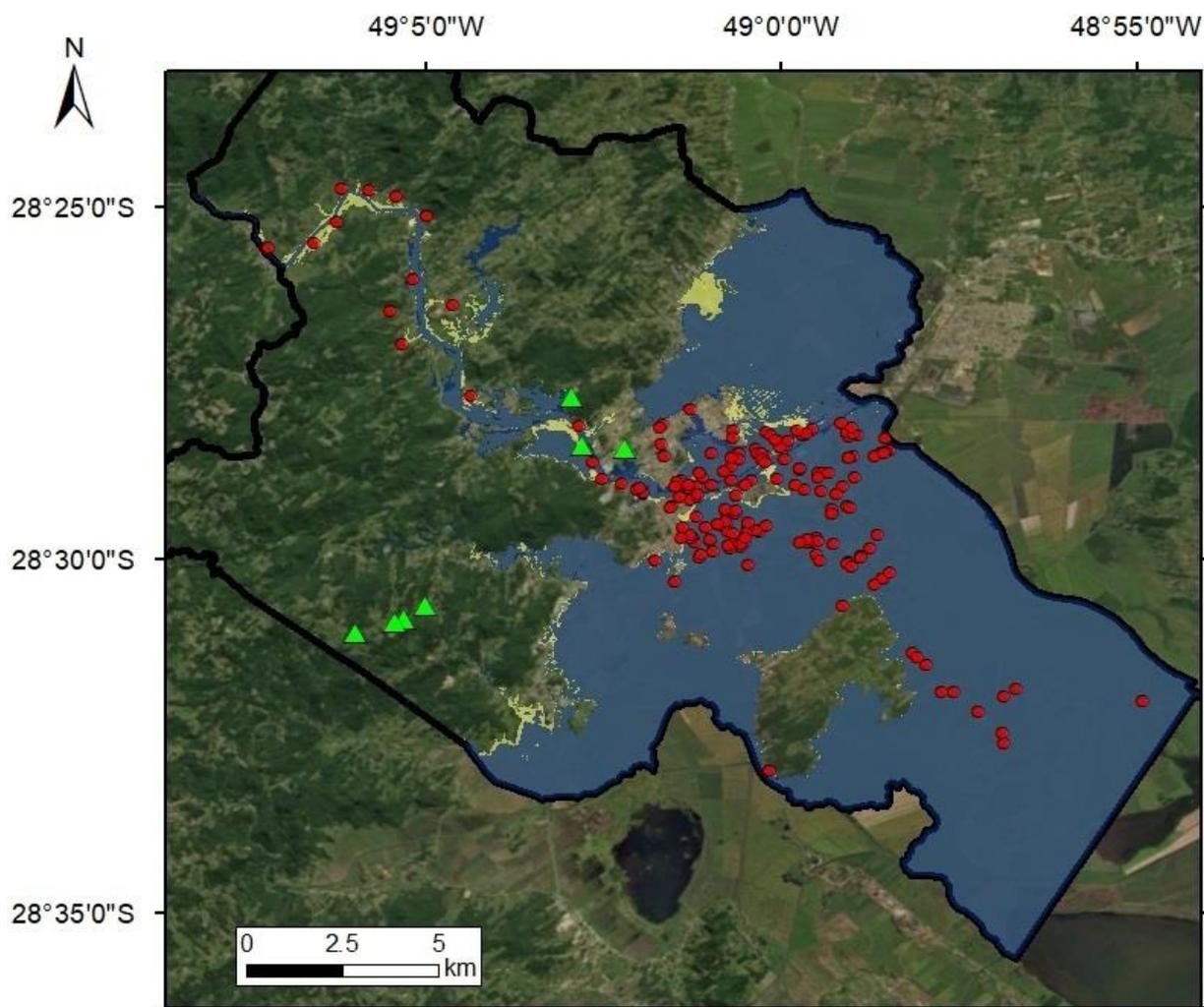


Esclarecimentos:

Cenário 11: Precipitação com incremento de 50% para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e altura da maré de 3 m como condição de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice O – Cenário 12: Área inundada em comparação com os dados de referência

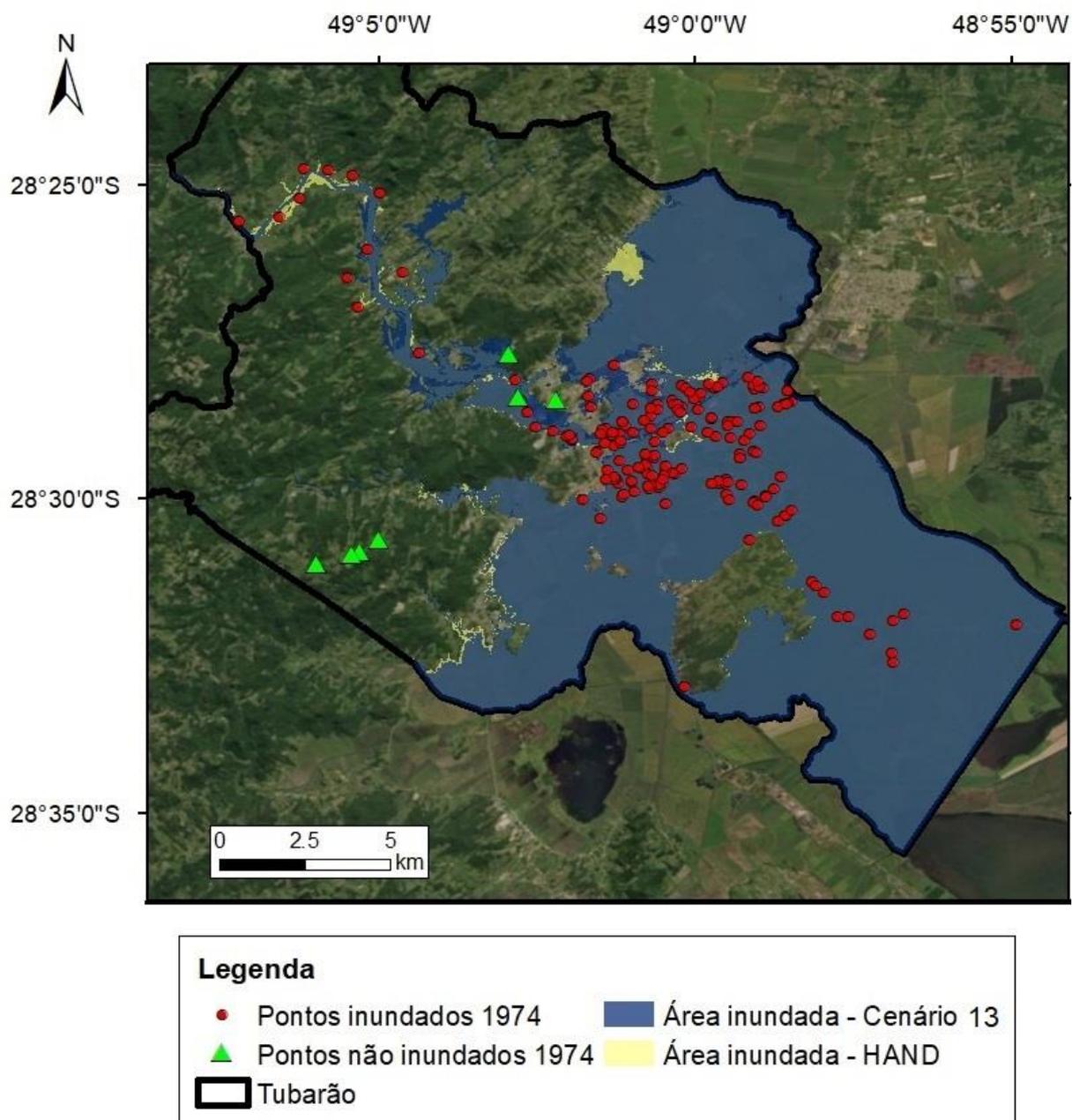


Esclarecimentos:

Cenário 12: Precipitação com incremento de 50% para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e, altura da maré de 3 m e vento na direção leste com velocidade de $12,5 \text{ m s}^{-1}$ como condições de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).

Apêndice P – Cenário 13: Área inundada em comparação com os dados de referência



Esclarecimentos:

Cenário 13: Canal com redução de 75% da profundidade e precipitação com incremento de 50% para geração dos hidrogramas como condição de contorno de montante e, altura da maré de 3 m e vento na direção leste com velocidade de $12,5 \text{ m s}^{-1}$ como condição de contorno a jusante.

Dados de referência: Pontos levantados em campo pela Secretaria de Proteção e Defesa Civil de Tubarão entre os anos de 2014 e 2015, e Mancha das áreas sujeitas a inundação gerada no modelo HAND por Zanandrea et al. (2018).