



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIAS E SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Fernanda Dagostin Szymanski

**ANÁLISE DE INUNDAÇÕES EM BACIAS MONTANHOSAS NO SUL DO BRASIL
POR MEIO DE MONITORAMENTO E MODELAGEM**

Araranguá
2020

Fernanda Dagostin Szymanski

**ANÁLISE DE INUNDAÇÕES EM BACIAS MONTANHOSAS NO SUL DO BRASIL
POR MEIO DE MONITORAMENTO E MODELAGEM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof.^a Cláudia Weber Corseuil, Dr.^a

Coorientador: Prof. Masato Kobiyama, Dr.

Araranguá

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Szymanski, Fernanda Dagostin

Análise de inundações em bacias montanhosas no sul do Brasil por meio de monitoramento e modelagem / Fernanda Dagostin Szymanski ; orientadora, Cláudia Weber Corseuil, coorientador, Masato Kobiyama, 2020.

123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2020.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Monitoramento. 3. Modelagem hidrológica. 4. Mapeamento de perigo. I. Corseuil, Cláudia Weber. II. Kobiyama, Masato. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Fernanda Dagostin Szymanski

**ANÁLISE DE INUNDAÇÕES EM BACIAS MONTANHOSAS NO SUL DO BRASIL
POR MEIO DE MONITORAMENTO E MODELAGEM**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Claus Tröger Pich, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Gean Paulo Michel, Dr.
Instituição Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Álvaro José Back, Dr.
Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Energia e Sustentabilidade.

Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof^ª. Cláudia Weber Corseuil, Dra.
Orientadora

Araranguá, 2020.

Dedico este trabalho aos meus pais Paulo e Ines e ao meu esposo Charbel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, e oportunidades que me foram concedidas até o momento, permitindo o meu crescimento. Aos meus pais Paulo e Ines e irmãs Paula e Beatriz pelo apoio em todas as minhas decisões e também pela compreensão da minha ausência neste período.

Ao meu esposo Charbel, pelo seu carinho, compreensão, atenção e paciência em todos os momentos, especialmente neste período do mestrado.

À professora Cláudia Weber Corseuil e o professor Masato Kobiyama pela orientação, e também, pela oportunidade de vivenciar a experiência de trabalhar com monitoramento hidrológico.

À banca examinadora, Álvaro José Back, Claus Tröger Pich e Gean Paulo Michel. Muito obrigada por terem aceitado prontamente o convite e por terem contribuído para a melhoria do presente trabalho.

À Prefeitura de Praia Grande, em especial ao Jonathan Reis da Silva e Thiago Leffa da Silva, por disponibilizar os dados relacionados ao histórico de inundações no município e por ter viabilizado o levantamento topobatimétrico.

Aos meus colegas de mestrado, em especial a Sabrina, que ajudou nas atividades de campo, como também nas disciplinas do mestrado. Agradeço também a Amarfelina, amiga de todas as horas, companheira de trabalho, que esteve sempre presente, me ajudando muito, principalmente nas atividades de campo.

Agradeço também a Arieli, Eduardo, Gabriela, Gardênia, Marcos e Rafael, membros do laboratório HidroEN, pela amizade e por terem auxiliado nas atividades de campo.

Aos membros do GPDEN e em especial a Sofia, Fernando e Danrlei, por terem auxiliado na condução das atividades de monitoramento e modelagem.

Aos meus tios Osmar e Ramisia, por terem me recebido com muito carinho em sua casa, por diversas vezes, viabilizando o traslado para as atividades de campo e laboratório.

Ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade e à Coordenação de Apoio à Pesquisa e Ensino Superior (CAPES) e Agência Nacional das Águas (ANA) pela concessão da bolsa.

A todas as pessoas que colaboraram, direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho.

RESUMO

A região de bacias montanhosas é muito atrativa devido à paisagem exuberante, e porque as terras estão mais disponíveis para serem exploradas. Entretanto, essas regiões são mais propensas aos perigos naturais, devido à ocorrência de eventos hidrológicos de alta intensidade e ao tipo de relevo declivoso, que aumentam o potencial destrutivo desses locais. O presente estudo teve por objetivo avaliar a inundação em bacias montanhosas no Sul do Brasil, por meio de monitoramento e modelagem com HAND e HEC-RAS 2D, visando o mapeamento de perigo. Realizou-se um levantamento dos registros históricos de inundação, ocorridos em 2007 nas regiões de leque aluvial dos rios Molha Coco e Malacara, onde está localizado o município de Praia Grande, sul Santa Catarina. Em março de 2007 ocorreram nessa região eventos de grande magnitude com inundação e deslizamentos, causados por uma chuva intensa, em menos 24 horas. Em setembro de 2019 foi instalada uma estação fluviométrica na bacia do rio Malacara. Os dados de vazão medidos referentes aos períodos de 02/01/2020 a 06/01/2020 e 21/01/2020 a 26/01/2020, foram utilizados para calibração e validação do modelo HEC-HMS, respectivamente. Os hidrogramas com as vazões máximas simuladas pelo HEC-HMS ajustado (NSE de 0,87) foram utilizadas para propagar os hidrogramas no modelo HEC-RAS 2D. Com essas vazões foram gerados mapas de profundidades, velocidades e de perigo de inundação para os períodos de retorno (TR) de 5, 10, 50, 100 e 200 anos. Na reconstituição do evento de 2007 foram utilizadas as vazões máximas de $56,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $92,39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para os rios Molha Coco e Malacara, respectivamente, que foram obtidas com os parâmetros ajustado no HEC-HMS e correspondem ao período de retorno de 100 anos. Verificou-se que a extensão da área de inundação, a profundidade e a velocidade da água, simuladas no HEC-RAS 2D, aumenta à medida que a frequência dos eventos diminui. As profundidades de 1 m e as velocidades de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, predominam em todos os períodos de retorno (TR). Já as maiores profundidades e velocidades foram de 12,82 m (TR=200) e $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (limiar considerado para todos os TRs), respectivamente. Esses valores foram encontrados nas partes mais declivosas das bacias de estudo, dentro dos canais e nos locais de avulsão. Os mapas de perigo mostraram que, o maior valor do índice de perigo de inundação foi encontrado dentro da calha dos rios e nos locais de avulsão. Nesses locais, existem pousadas, restaurantes e residências, que podem sofrer danos estruturais e expor as pessoas ao perigo de um evento de inundação dessa magnitude. Também, comparou-se o modelo HAND com o HEC-RAS 2D para verificar se o seu desempenho em mapear as áreas de inundação em regiões montanhosas, como resultado obteve-se um F estatístico de 39,6% e o Kappa de 0,35, mostrando que seu desempenho foi razoável. O presente estudo, demonstrou a importância do monitoramento e modelagem dos processos hidrológicos em bacias montanhosas, os quais permitiram realizar o mapeamento de perigo de inundação, a fim de auxiliar os gestores no gerenciamento de desastres naturais hidrológicos e no planejamento territorial, como forma de prevenção para a ocupação de áreas de perigo de inundação.

Palavras-chave: Bacia Montanhosa. HEC-RAS 2D. HAND. Índice de Perigo. Mapeamento de Perigo.

ABSTRACT

Mountain basins areas are very attractive due to the beautiful landscape, the cold climate and because the lands are more available to be explored. However, these areas are prone to natural hazards, due to occurrence of high-intensity rainfall events and the type of steep terrain, which increase the destructive potential in these locations. The present study aimed to assess flood in mountain basins in southern Brazil, through monitoring and modeling with HAND and HEC-RAS 2D, aiming at hazard mapping. A survey was carried out in order to collect the historical records of flooding which occurred in 2007 in the basins of the Molha Coco and Malacara rivers, where the municipality of Praia Grande, south Santa Catarina, is located. In March 2007, events of great magnitude occurred in this region, caused by intense rain, in less than 24 hours. In September 2019, a river discharge station was installed in Malacara River basin. The flow data obtained during the periods from 1st to 6th of January, 2020 and 21st to 26th, 2020, were used for calibration and validation of the HEC-HMS, respectively. The maximum flow rates simulated by the calibrated HEC-HMS (coefficient of Nash = 0.87) were used to propagate the hydrographs in the HEC-RAS 2D. With these flows, maps of depths, speeds and flood hazards were generated for the return periods (TR) of 5, 10, 50, 100 and 200 years. In the reconstitution of the 2007 event, the maximum flows of $56.36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $92.39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ were used for the rivers Molha Coco and Malacara, respectively, which were obtained with the parameters calibrated in HEC-HMS and correspond to TR of 100 years. The results showed that the extension of flood area, depth and the water speed, simulated in the HEC-RAS 2D, increase as the frequency of the events decreases. Depths of 1 m and speeds of $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, predominate in all the TR. The largest depths and speeds were 12.82 m (TR = 200) and $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (for all TRs), respectively. These values were found in the steepest parts of the study basins, within the canals and in the places of avulsion. Hazard maps showed that the highest degree of flood hazard was found within river channels and at avulsion sites. In these locations there are inns, restaurants and residences, which can suffer from structural damage and expose people to the danger of a flood event of this magnitude. Also, the HAND was used to verify its performance in flood mapping in mountainous regions and a statistical F of 39.6% and a Kappa of 0.35 were obtained, which indicate a reasonable performance. The present study showed the importance of monitoring and modeling of hydrological processes in mountain basins, and allowed performing flood hazard mapping that can assist in the management of hydrological disasters and in territorial planning, as a way to avoid the occupation of flood hazard areas.

Keywords: Mountain Basin. HEC-RAS 2D. HAND. Hazard Index. Hazard Mapping.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxograma metodológico do estudo..... | 41 |
| Figura 2 -Mapa de localização da área de estudo..... | 42 |
| Figura 3 - Altimetria da área de estudo. | 43 |
| Figura 4 - Estação fluviométrica do rio Malacara, Praia Grande, SC. | 45 |
| Figura 5 - Localização das estações pluviométricas, meteorológicas e fluviométricas na área de estudo..... | 46 |
| Figura 6 – Distribuição espacial da precipitação pelo método de Isoietas..... | 47 |
| Figura 7 - Locais de medições topobatimétricas ao longo dos rios Molha Coco e Malacara na região de Praia Grande, SC..... | 48 |
| Figura 8 - Molinete hidrométrico utilizado para a medição de vazão. | 50 |
| Figura 9 - Seção transversal do rio Malacara. | 51 |
| Figura 10 - Fluxograma das etapas da modelagem com o HEC-HMS. | 53 |
| Figura 11 - Ilustração das resoluções da malha computacional utilizada nas bacias Molha Coco e Malacara..... | 58 |
| Figura 12 - Locais das entradas e saídas dos hidrogramas (ou vazões máximas) na área de estudo..... | 59 |
| Figura 13 - Fluxograma do descritor do terreno HAND. | 61 |
| Figura 14 – Índice de Perigo | 65 |
| Figura 15 - Chuva acumulada determinada com base na série histórica da estação pluviométrica ANA (2949001) do mês de março de 2007..... | 66 |
| Figura 16 - Pontos de inundação de 2007. | 68 |
| Figura 17 - Hietograma observado na estação pluviométrica do CEMADEN (2949013)..... | 69 |
| Figura 18 - Nível de água medido na estação fluviométrica do rio Malacara, Praia Grande... | 70 |
| Figura 19 – Vazões elevadas nos rios (a) Molha Coco e (b) Malacara. | 71 |
| Figura 20 - Curva-chave da estação fluviométrica da UFSC/UFRGS do rio Malacara, SC.... | 71 |
| Figura 21 - Série histórica de vazão da estação fluviométrica do rio Malacara..... | 72 |
| Figura 22 - Mapa dos grupos hidrológicos da bacia do rio Malacara, Praia Grande, SC. | 73 |
| Figura 23 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do rio Malacara, Praia Grande, SC. | 74 |
| Figura 24 - Mapa de escoamento superficial (CN) da bacia do rio Malacara, Praia Grande, SC. . | 75 |
| Figura 25 - Hietograma e hidrogramas observados e simulados na etapa de calibração. | 76 |
| Figura 26 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da etapa de validação..... | 79 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27 - Evento observado no período de 10 a 12/01/2020..... | 80 |
| Figura 28 - Hietograma referente ao evento de 2007 ocorrido em Praia Grande, SC..... | 81 |
| Figura 29 - Curva IDF para diferentes períodos de retorno | 82 |
| Figura 30 - Hietogramas de projeto para diferentes períodos de retorno para região de Praia Grande, SC | 83 |
| Figura 31 - Hidrogramas de projeto para o evento de 2007 para as bacias hidrográficas Malacara e Molha Coco. | 84 |
| Figura 32 - Hidrogramas de projeto para diferentes períodos de retorno..... | 84 |
| Figura 33 – Área de inundação para o evento de 2007 simulada com o HEC-RAS 2D..... | 87 |
| Figura 34 - Pontes danificadas no evento de 2007 (a) no rio Molha Coco e (b) no rio Malacara. | 88 |
| Figura 35 - Velocidade da água na área de inundação simulada para o evento de 2007. | 89 |
| Figura 36 - Área de inundação simulada pelo modelo HAND..... | 91 |
| Figura 37 - Profundidade da área inundada pelo modelo HAND | 92 |
| Figura 38 - Comparação de áreas de inundação geradas pelo HEC-RAS 2D e HAND..... | 94 |
| Figura 39 - Área de inundação das bacias Molha Coco e Malacara para os diferentes períodos de retorno..... | 96 |
| Figura 40 - Distribuição da frequência das profundidades da lâmina d’água para os períodos de retorno..... | 97 |
| Figura 41 - Mapa de inundação com as profundidades da lâmina de água para o TR 5 anos.. | 98 |
| Figura 42 - Mapa de inundação com as profundidades da lâmina de água para TR 200 anos | 98 |
| Figura 43 - Distribuição de frequência de velocidades da água para os diferentes períodos de retorno..... | 99 |
| Figura 44 – Mapa de inundação com as velocidades da lâmina de água para o TR 5 anos ... | 100 |
| Figura 45 - Mapa de inundação com as velocidades da lâmina de água para o TR 200 anos | 101 |
| Figura 46 – Área de inundação para cada grau de perigo | 102 |
| Figura 47 - Mapa de perigo de inundação para o TR 5 anos..... | 103 |
| Figura 48 - Mapa de perigo de inundação para o TR 100 anos..... | 104 |
| Figura 49 - Mapa de perigo de inundação para o TR 200 anos..... | 104 |

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos principais eventos extremos ocorridos em Praia Grande, SC.....39

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Características das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológica. | 46 |
| Tabela 2 - Fluxograma das etapas da modelagem com o HEC-HMS. | 57 |
| Tabela 3 - Valores do coeficiente de Manning para as bacias Molha Coco e Malacara. | 58 |
| Tabela 4 - Condição de saída de para a propagação dos hidrogramas utilizando como domínio a malha computacional. | 60 |
| Tabela 5 – Classificação do índice Kappa..... | 64 |
| Tabela 6 – Descrição dos diferentes níveis de perigo | 65 |
| Tabela 7 - Parâmetros iniciais para a etapa de calibração no modelo HEC-HMS..... | 75 |
| Tabela 8 - Parâmetros de calibração usados no modelo HEC-HMS..... | 77 |
| Tabela 9 - Indicadores estatísticos do desempenho do modelo HEC-HMS..... | 78 |
| Tabela 10 - Indicadores estatísticos do desempenho do modelo HEC-HMS na etapa de validação..... | 79 |
| Tabela 11 - Intensidade da chuva para diferentes períodos de retorno | 82 |
| Tabela 12 - Vazão de pico e volume escoado para diferentes períodos de retorno..... | 85 |
| Tabela 13 - Diferença relativa entre as profundidades da lâmina d'água e medidas em campo e obtidas com o modelo HEC-RAS 2D..... | 86 |
| Tabela 14 - Diferença relativa entre as profundidades da lâmina d'água e medidas em campo e obtidas com o modelo HAND. | 92 |
| Tabela 15 - Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar acurácia do modelo HAND com relação ao HEC-RAS..... | 94 |
| Tabela 16 – Distribuição da frequência das profundidades da lâmina d'água para os períodos de retorno..... | 96 |
| Tabela 17 - Distribuição de frequência de velocidades do fluxo de inundação para os diferentes períodos de retorno | 99 |
| Tabela 18 - Classificação das áreas de inundação em km ² para cada grau de perigo. | 101 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ANA | Agência Nacional das Águas |
| AVADAN | Avaliação de Danos |
| BHRMALA | Bacia Hidrográfica do rio Malacara |
| BHRMOCO | Bacia Hidrográfica do rio Molha Coco |
| CEMADEN | Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais |
| CN | Curva Número |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EPAGRI | Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina |
| GPDEN | Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais |
| HAND | <i>Height Above the Nearest Drainage</i> |
| HEC-HMS | <i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i> |
| HEC-RAS | <i>Hydrological Engineering Center - River Analysis System</i> |
| IP | Índice de perigo |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MM5 | <i>PSU/NCAR Mesoscale Mode</i> |
| NSE | <i>Nash Sutcliffe</i> |
| PBIAS | <i>Percent BIAS</i> |
| PNAS | Parque Nacional de Aparados da Serra |
| PNSG | Parque Nacional Serra Geral |
| RSR | <i>Ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data</i> |
| RTK | <i>Real Time Kinematic</i> |
| RVE | <i>Relative Volume Error</i> |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica |
| SRM | <i>Snowmelt Runoff Model</i> |
| TAF | Taxa de Alarme Falso |
| TAUDEM | <i>Terrain Analysis Using Digital Elevation Models</i> |
| TR | Período de retorno |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |

LISTA DE SÍMBOLOS

- a Parâmetro de ajuste na equação da curva-chave
- A Área da seção em (m²)
- A_C Área de controle
- A_{CS} Área de acerto
- A_i A_i é a área de cada uso e ocupação de solo (km²)
- A_m Área molhada da seção transversal (m²),
- A_S Área simulada
- A_t A_t é a área total da bacia do rio Malacara (km²);
- b Parâmetro de ajuste na equação da curva-chave.
- C_m Fator de correção da velocidade
- C_l Coeficiente de ponderação para o hidrograma unitário de Clark
- c_f Coeficiente de atrito
- CN *Curve Number*
- CN_i CN calculado para cada grupo hidrológico
- Co Coeficiente de ponderação para o hidrograma unitário de Clark
- D Duração da chuva (min)
- Decl.* Declividade média do rio principal (m.m⁻¹).
- f Parâmetro de Coriolis (s⁻¹)
- g Aceleração gravitacional
- H Elevação da superfície da água (m)
- h Profundidade da água (m)
- h Profundidade (m)
- ha Valor HAND
- hd Altitude da drenagem mais próxima do ponto X
- hf Profundidade do fluxo (m)
- hi Pixel HAND que corresponde ao alcance máximo da inundação (m)
- hn Valor de cada pixel do HAND
- h_x Altura da lâmina d'água medida no sensor de nível (m)
- hx Altitude no ponto X
- h_{x0} Altura da lâmina d'água quando vazão é próxima de zero (m)
- i i é a intensidade média máxima da chuva em (mm.h⁻¹)

| | |
|---------------|---|
| i | Intervalo de tempo (h) |
| I_a | I_a é abstração inicial de água (mm) |
| k | Coefficiente de armazenamento |
| K | Índice Kappa |
| L_m | Comprimento da distância percorrida pelo objeto flutuante (m) |
| m | Número de classes presentes na matriz de erro |
| n | Número de Manning ($s.m^{-1/3}$), |
| n° | Número de rotações por segundo da hélice do molinete. |
| N_i | Número total de unidades amostrais contempladas pela matriz |
| $nx+j$ | Total marginal da linha j |
| nx_{i+} | Total marginal da linha i |
| o | Número de observações. |
| P | Precipitação total (mm) |
| P_c | Proporção de unidades que concordam por casualidade |
| P_o | Exatidão geral |
| q | Vazão de entrada ($m^3.s^{-1}$). |
| Q | Vazão ($m^3.s^{-1}$) |
| Q_e | Q_e é a chuva efetiva total (mm) |
| Q_{i+l} | Q_{i+l} é a ordenada do hidrograma |
| $Q_{mean}(t)$ | Média das vazões observadas; |
| $Q_{obs}(t)$ | Vazão observada ($m^3.s^{-1}$) |
| $Q_{sim}(t)$ | Vazão simulada ($m^3.s^{-1}$) |
| R | Raio hidráulico (m) |
| Re | Precipitação efetiva distribuída (mm) |
| s | Declividade da seção em ($m.m^{-1}$) |
| S | Retenção potencial de água no solo (mm) |
| t | Tempo |
| T | Período de retorno (anos) |
| t_c | Tempo de concentração (h) |
| T_m | Tempo médio de deslocamento do flutuador (s) |
| u | Componente do vetor velocidade na direção x ($m.s^{-1}$) |
| v | Componente do vetor velocidade na direção y ($m.s^{-1}$) |
| V | Velocidade pontual na vertical ($m.s^{-1}$) |

- $|V|$ Magnitude do vetor velocidade
- v Velocidade (m.s^{-1})
- ν_t Coeficiente de viscosidade turbulenta
- ∇ Operador diferencial
- ∂ Derivada parcial
- Σ Somatório
- σ Desvio-padrão
- ∂ Derivada parcial

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 21 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 21 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 21 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 23 |
| 2.1 | BACIAS MONTANHOSAS E INUNDAÇÃO | 23 |
| 2.2 | MONITORAMENTO HIDROLÓGICO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS..... | 25 |
| 2.3 | MODELAGEM DE INUNDAÇÕES | 27 |
| 2.3.1 | Modelagem hidrológica com o HEC-HMS | 28 |
| 2.3.2 | Modelagem hidrodinâmica com HEC-RAS 2D | 30 |
| 2.3.2.1 | <i>Aplicação do modelo HEC-RAS 2D em região montanhosa.....</i> | <i>33</i> |
| 2.3.3 | <i>Height Above Nearest Drainage (HAND).....</i> | 35 |
| 2.4 | IMPORTÂNCIA DO MAPEAMENTO DE PERIGO DAS INUNDAÇÕES EM REGIÕES MONTANHOSAS..... | 36 |
| 2.5 | ESTUDOS HIDROLÓGICOS E INUNDAÇÃO NA BACIA DO RIO MAMPITUBA | 37 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 41 |
| 3.1 | ÁREA DE ESTUDO | 42 |
| 3.2 | MATERIAL..... | 44 |
| 3.2.1 | Dados hidrológicos | 45 |
| 3.3 | MÉTODOS | 47 |
| 3.3.1 | Identificação das áreas inundadas no evento de 2007 com registros históricos..... | 47 |
| 3.3.2 | Levantamento topobatimétrico e correção do MDE | 47 |
| 3.3.3 | Medição de vazão no rio Malacara..... | 49 |
| 3.3.4 | Chuva de projeto..... | 51 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 3.3.5 | Determinação da vazão máxima para diferentes períodos de retorno com o HEC-HMS..... | 52 |
| 3.3.5.1 | <i>Ajuste dos parâmetros de entrada do modelo HEC-HMS.....</i> | 55 |
| 3.3.6 | Modelo HEC-RAS 2D..... | 57 |
| 3.3.7 | Descritor do terreno HAND..... | 60 |
| 3.3.8 | Métricas para comparação dos modelos HAND e HEC-RAS 2D..... | 62 |
| 3.3.9 | Mapeamento de perigo de inundação..... | 64 |
| 4 | RESULTADOS..... | 66 |
| 4.1 | ÁREAS INUNDADAS NO EVENTO DE 2007 COM BASE NOS REGISTROS HISTÓRICOS..... | 66 |
| 4.2 | VAZÃO OBSERVADA NO RIO MALACARA..... | 69 |
| 4.3 | VAZÃO SIMULADA COM HEC-HMS..... | 73 |
| 4.4 | VAZÃO MÁXIMA..... | 81 |
| 4.5 | ÁREA INUNDADA COM O MODELO HEC-RAS 2D..... | 85 |
| 4.6 | ÁREA INUNDADA COM O MODELO HAND..... | 90 |
| 4.7 | COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS INUNDADAS PELO HEC-RAS 2D E HAND..... | 93 |
| 4.8 | MAPA DE PERIGO DE INUNDAÇÃO PARA A REGIÃO DAS BACIAS DE ESTUDO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO..... | 95 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 105 |
| 5.1 | RECOMENDAÇÕES..... | 106 |
| | REFERÊNCIAS..... | 107 |
| | APÊNDICE A – Levantamento topobatimétrico realizado nos rios Molha Coco e Malacara..... | 121 |

1 INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas montanhosas apresentam grandes variações de altura entre o topo dos morros e a planície e, e acentuada declividade, predominando a ocorrência de chuvas orográficas (KOBİYAMA et al., 2018). O elevado volume de água, proveniente de precipitações intensas ou derretimento de neve em bacias hidrográficas de cabeceiras das montanhas, frequentemente, leva à respostas geomorfológicas torrenciais aos canais, que podem variar de inundações (bruscas), transporte de carga no leito à fluxos de detritos (PRENNER et al., 2019). Além desses fatores, destacam Karagul e Çitgez (2018), também contribuem para a ocorrência de inundações nessas bacias, o tipo de solo, tipo de cobertura vegetal e a ocupação do solo.

A ocorrência de deslizamentos de terra, fluxo de detritos e inundações bruscas, podem provocar eventos em cascata (TAO e BARROS, 2014), aumentando o potencial destrutivo em bacias montanhosas. Adicionalmente, nessas bacias, ocorre a formação de leques aluviais que, segundo Scheiner et al. (2012), são características comuns encontradas na borda dos vales (geralmente vales de rios ou vales controlados por falhas) adjacentes à bacias declivosas. Sendo a morfometria do leque aluvial, o resultado direto do transporte de sedimentos da bacia adjacente para o vale.

Nesses locais, as inundações geralmente são muito perigosas, uma vez que o fluxo emerge do ápice do leque em alta velocidade transportando uma grande quantidade de detritos (GARFI et al., 2007). Consequentemente, essas características podem levar a avulsão que trata-se da formação de novos canais durante a ocorrência de inundação (LANCASTER et al., 2012) potencializando o perigo da ocupação humana desses locais (VENTRA e CLARKE, 2018). Sendo, portanto, muito importante para o gerenciamento de perigos naturais, como inundações bruscas identificar bacias hidrográficas propensas às atividades torrenciais, e os processos que podem ocorrer, a fim de fornecer maior proteção para as comunidades ameaçadas (PELLETIER et al., 2005).

Neste contexto, o mapeamento de perigo de inundação é uma ferramenta importante, que pode auxiliar no gerenciamento de desastres naturais, uma vez que, permite a identificação dos locais inadequados para determinados usos e ocupações do solo (WMO, 2016).

No Brasil, Monteiro e Kobiyama (2014) comentam que, a identificação, o mapeamento e o monitoramento de risco, perigo e vulnerabilidades, são ações de

prevenção de desastres naturais, previstas em Lei (Decreto Nº 7.257/2010). Assim, esses autores desenvolveram uma metodologia para o mapeamento de perigo de inundação, com base em dados hidrológicos e topográficos, usando modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para simular eventos de inundações em bacias hidrográficas.

Os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos requerem como dados de entrada séries temporais de chuva e vazão, bem como dados topográficos para gerar e propagar hidrogramas de vazão máxima. Entre os modelos atualmente disponíveis, existem o HEC-HMS (USACE, 2018), HEC-RAS 1D e 2D (USACE, 2016) e o descritor do terreno HAND (RENNÓ, 2008), que são de acesso livre e utilizados para o mapeamento de inundações. O HEC-HMS é um modelo hidrológico que transforma chuva em vazão em bacias e sub-bacias hidrográficas. Já o HEC-RAS 2D é um modelo hidrodinâmico que propaga o hidrograma em um terreno, sendo necessário como entrada, dados topográficos e hidrológicos, sendo muito utilizado para o mapeamento de inundações porque, além da extensão da inundação, simula a velocidade da onda de cheia e a profundidade da lâmina d'água, com uma boa aproximação (TENG et al., 2017). O HAND calcula a altura de um determinado local propenso a inundação em relação ao rio mais próximo, possibilitando ter uma referência dos locais suscetíveis a inundação.

Entretanto, os modelos hidrodinâmicos ainda são pouco utilizados em bacias montanhosas, devido às dificuldades de simular o comportamento hidráulico e a topografia complexa desses locais (PINOS e TIMBE, 2019). Além disso, a escassez de dados devido à baixa densidade de monitoramento hidrometeorológico, com dados pontuais, sem longas séries históricas, dificulta a simulação precisa das inundações nessas bacias (MASCARO et al., 2013). Neste contexto, diversos estudos têm avaliado se os modelos que utilizam apenas dados topográficos para simular a área de inundação (AFSHARI et al., 2018; ZHENG et al., 2018; MONTE et al., 2019), como o HAND, fornecem resultados coerentes, quando comparados aos modelos hidrodinâmicos. O HAND inicialmente foi desenvolvido para simular áreas de planície de inundação, usando como dado de entrada um modelo digital de elevação (MDE) (RENNÓ, 2008). Portanto, ainda é um desafio utilizá-lo para modelar regiões montanhosas com presença de leques aluviais, uma vez que, são regiões onde paisagem e os rios se alteram com frequência, requerendo que o MDE seja sempre atualizado para acompanhar essas modificações.

O extremo sul de Santa Catarina e o nordeste do Rio Grande do Sul, tem parte do seu território em regiões montanhosas, sendo propensa à ocorrência de deslizamentos,

fluxos de detritos e inundações bruscas (STRIEDER et al., 2008). Nessa região está situada a bacia do rio Mampituba que, segundo Ronsani (1999), nos anos de 1903, 1911, 1974, 1995 e 2007 ocorreram eventos de inundações bruscas de grande magnitude. As cabeceiras dessas bacias estão localizadas nos Parques Nacionais Aparados da Serra e Serra Geral, que possuem belezas naturais exuberantes, composta por vários cânions. Por esse motivo, a região dos parques é muito procurada para atividades de turismo e lazer, fator que expõe as pessoas ao perigo, devido à ocorrência de eventos extremos nesses locais. As sub-bacias Molha Coco e Malacara, área de estudo do presente trabalho, estão localizadas na bacia do rio Mampituba.

Estudos hidrológicos com enfoque em desastres naturais e mapeamento de perigo de inundação ainda são raros na região da bacia do rio Mampituba. Sendo, portanto, de fundamental importância estudos que realizem monitoramento e modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas para compreender a magnitude e a frequência com que ocorrem as inundações em bacias montanhosas com presença de leques aluviais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a inundação em bacias montanhosas no Sul do Brasil, por meio de monitoramento e modelagem com HAND e HEC-RAS 2D, visando o mapeamento de perigo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar as cotas dos locais de inundação do evento ocorrido em março de 2007, com base em registros históricos;
- Estimar a vazão máxima com o modelo HEC-HMS para diferentes períodos de retorno para a bacia do rio Malacara;
- Regionalizar a vazão máxima para as sub-bacias dos rios Molha Coco e Malacara;
- Avaliar a velocidade e a profundidade da lâmina d'água do evento de inundação de 2007;

- Estabelecer o mapeamento de perigo de inundação para os diferentes períodos de retorno e comparar com o evento de 2007;
- Comparar as manchas de inundações simuladas pelo modelo HEC-RAS 2D e pelo HAND.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BACIAS MONTANHOSAS E INUNDAÇÃO

Os rios montanhosos encontram-se em vários locais do planeta, principalmente em regiões de cabeceiras. Esses rios são utilizados para diversas finalidades, como: recreação, prática de esportes radicais, ecoturismo, fonte de água para abastecimento e fonte de geração de energia elétrica (PAIXÃO e KOBIYAMA, 2019). O uso e a ocupação de bacias montanhosas tem se intensificado, sendo que estes locais são propensos a ocorrência de desastres hidrogeomorfológicos e ainda são pouco estudados (KOBIYAMA et al., 2018). Kuksina et al. (2017) constataram que, devido à curta duração dos eventos extremos, tais como deslizamentos, fluxo de detrito e inundações bruscas, dificultam o monitoramento dessas bacias.

A resposta hidrológica das bacias montanhosas, é desencadeada por diversos fatores, como por exemplo: temperatura, precipitação, solo, litologia, vegetação ou declividade (IVES e MESSERLI, 1989; STOFFEL et al., 2016). No Brasil, segundo o IBGE (2004), são consideradas regiões montanhosas aquela que apresentam declividades maiores do que 15% e altitudes acima do nível do mar de 300 m.

Nas regiões montanhosas, os rios caracterizam-se por apresentar altas declividades, grande variação entre vazão mínima e máxima e elevada movimentação dos sedimentos no leito dos rios, bem como transições entre escoamento subcrítico e supercrítico (WOHL, 2010). As precipitações intensas que ocorrem nessas regiões, causam os deslizamentos, fluxos de detritos e inundações bruscas (BORGA et al., 2014). Esses fenômenos extremos podem ser desencadeados por diversos fatores relacionados à variação de altitude (baixas temperaturas, maior volume de precipitação, solo pouco profundo e vegetação) e à geomorfologia da região (declividade acentuada e efeito barlavento) (WEINGARTNER et al., 2003). A geomorfologia contribui para o hidroclima local (SLAYMAKER e EMBLETON-HAMANN, 2018), sendo as regiões montanhosas muito sensíveis as variações climáticas (temperatura, precipitação), que resultam em uma importante contribuição para a geração de vazão (VIVIROLI; WEINGARTNER e MESSERLI, 2003).

Adicionalmente, Kuksina et al. (2017) ressaltam que, as regiões de montanhas intensificam o processo de convecção, potencializando a capacidade de gerar escoamento superficial.

Para Prenner et al. (2019), há pouco conhecimento sobre o impacto das condições meteorológicas na resposta geomorfológica no canal. Os autores verificaram que, em bacias montanhosas as condições que originam inundações bruscas e fluxo de detritos mudam conforme as características geomorfológicas e hidrometeorológicas da bacia. Assim constataram que, as inundações bruscas são originadas por derretimento de neve e precipitações intensas de curta duração.

A ocorrência simultânea de deslizamentos de terra, fluxo de detritos e inundações bruscas, podem desencadear eventos em cascata (TAO e BARROS, 2014, TRIGILA et al., 2015). Conforme Destro et al. (2018), os deslizamentos podem bloquear rios, formando represas com elevado potencial de rompimento, aumentando as chances de desencadear inundações bruscas. Portanto, como destacam Bryndal et al. (2017) é fundamental quantificar as respostas hidrológicas (distribuição espacial e temporal da precipitação e vazão na bacia) e os impactos geomorfológicos (erosão no canal) para minimizar os impactos negativos das inundações bruscas em bacias hidrográficas montanhosas.

A observação das inundações bruscas são raras, uma vez que, ocorrem em uma escala espaço-temporal muito rápida (BORGA et al., 2014). Além disso, segundo Amponsah et al. (2016), a ocorrência simultânea de inundações bruscas e fluxo de detritos, aumenta a incerteza na estimativa da vazão de pico nas análises realizadas após o evento, devido ao transporte de sedimentos, que altera a estabilidade das seções transversais dos rios.

A presença de leques aluviais também é um fator importante que deve ser considerado no estudo de inundações em bacias montanhosas. Os leques aluviais são locais de depósitos de sedimentos em formato de um leque, originados pelos processos de erosão, transporte e deposição. Os leques se formam a partir do trecho onde o rio não está mais confinado nos vales se abrindo em forma de leque, no sopé das montanhas e caracterizam-se pelo aumento da largura do canal, redução da declividade e aumento da carga de sedimentos no canal (VENTRA e CLARKE, 2018).

Nos leques aluviais é recorrente o processo de avulsão, que consiste na mudança brusca da direção do rio através de um deslocamento súbito do meandro, resultando em um novo traçado (CHRISTOFOLETTI, 1988; ASSINE et al., 2005). Desta maneira, originam-se outros canais, aumentando o alcance do fluxo de água, inundando as regiões

mais baixas e, conseqüentemente, aumentando o poder destrutivo (MOLLAEI et al., 2016).

Com base na morfometria da bacia hidrográfica é possível compreender os processos hidrológicos, como o tempo de concentração, o tempo de pico da vazão e o potencial de erosão, os quais permitem identificar os locais com potencial de inundação (QUIROGA et al., 2017; ALTAF et al., 2013).

Na Venezuela, Mata (2016) analisou as características morfológicas de bacias hidrográficas montanhosas, considerando três unidades de análise: encosta, canal de drenagem principal e leque aluvial. As encostas foram caracterizadas por apresentarem declividades entre 20% a 60% nos canais de cabeceira da bacia. Nesses locais, o autor verificou que, as precipitações de alta intensidade e grande duração, aumentaram o potencial de erosão e produção de sedimentos. Já no canal de drenagem principal (região de transição onde ocorre o transporte de sedimentos) e nos leques aluviais constatou que, são locais atingidos por fluxo de detritos e inundações. Ainda, das 13 bacias do estudo, os parâmetros que mais influenciaram na dinâmica hidrogeomorfológica (inundações, fluxos hiperconcentrados e fluxo de detritos) foram a declividade média, altitude máxima, concavidade do perfil longitudinal e altura da cabeceira da bacia.

No Brasil, um estudo de revisão feito Paixão e Kobiyama (2019) sobre bacias montanhosas mostrou que, há poucos estudos relacionados à inundações nessas regiões. Os autores verificaram que os parâmetros mais comumente utilizados para caracterização de rios de montanhas são: a declividade do canal, a relação entre a largura e profundidade do rio, o grau de entrenchamento do canal (relação das áreas propensas a inundação e a largura do canal), a vazão, a carga de sedimentos e a granulometria dos sedimentos são os mais empregados. Contudo, reforçam que apesar de existirem técnicas para extrair esses dados a partir de MDE, é muito importante a coleta desses parâmetros *in loco*.

2.2 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Na hidrologia, o monitoramento é uma etapa fundamental para compreender a dinâmica dos processos hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. O monitoramento consiste em um registro contínuo de coleta de dados em um intervalo de tempo, que a longo prazo, compõe um banco de dados com longas séries históricas dos processos monitorados (MALUTTA, 2012). Porém, nem sempre é possível obter longas

séries históricas e, por isso, são utilizados modelos computacionais para tentar reproduzir os processos hidrológicos nas bacias. No entanto, a utilização dos modelos se torna válida quando há dados medidos para realizar o ajuste dos parâmetros calculados. Sendo assim, os resultados na modelagem são totalmente dependentes da qualidade dos dados monitorados (KOBİYAMA, CHAFFE e MOTA, 2011).

Em regiões montanhosas, o monitoramento automático de chuva e vazão é uma das etapas das ações necessárias para a prevenção de desastres naturais associados à inundações bruscas e fluxo de detritos (KOBİYAMA et al., 2018). Por isso, Kobiyama et al. (2009) recomendam a construção de bacias-escola, que através do monitoramento detalhado possibilita a melhor compreensão dos processos que ocorrem nestes locais. Além disso, devido às altas velocidades dos processos hidrológicos, os autores sugerem que os intervalos de medição sejam de no máximo 10 min, para que se possa registrar os eventos. Collischonn e Dornelles (2015) salientam que, para pequenas bacias de regiões montanhosas, com respostas rápidas a eventos de precipitação, o mais adequado são intervalos de medição de um minuto.

A precipitação e a vazão são as variáveis mais utilizadas para monitorar os processos hidrológicos. A precipitação pode ser registrada por meio de pluviógrafos ou pluviômetros (SANTOS, 2001). Para iniciar o monitoramento hidrológico de um rio é necessário definir, preliminarmente, o local da seção de medição, pois a delimitação da bacia hidrográfica depende da definição do exutório, que frequentemente trata-se do mesmo local onde está instalada a estação fluviométrica (MOTA et al., 2017).

A vazão é determinada a partir do nível, usando a equação da curva-chave (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). Para a determinação da curva-chave é necessário a medição de vazão e de nível da água simultaneamente. Essas medições são obtidas a partir de equipamentos tradicionais como, molinete e micro molinete hidrométrico, que apresentam boa precisão, são fáceis de usar, porém, sua aplicação é limitada para locais pouco profundos e sem a ocorrência de altas velocidades (TAZIOLI, 2011). Atualmente, existem equipamentos mais sofisticados utilizando tecnologia de radar de velocimetria de superfície, velocímetros acústicos Doppler e câmeras ópticas acoplados. Essas técnicas de velocimetria de imagem, aumentam a precisão dos dados medidos (TAURO et al., 2018).

Segundo Manfreda et al. (2020), existem vários fatores que dificultam a elaboração da curva-chave, tais como: dificuldade de realizar a observação de campo

durante eventos com altas vazões (não necessariamente inundações); mudanças morfológicas no canal; presença de vegetação; custo; tempo; viabilidade de acesso e segurança dos operadores durante a medição de vazões elevadas. Esses fatores segundo os autores acima citados, são os principais motivos pelos quais as medições de vazão são descontínuas.

Por essas razões, as medições não representam adequadamente a subida e descida do hidrograma e, muitas vezes, essas medições também tornam as campanhas de campo onerosas, demoradas e nem sempre fornecem resultados satisfatórios (DETERT et al., 2017).

Entretanto, apesar de todas as dificuldades apresentadas anteriormente, o monitoramento em campo torna-se imprescindível para compreender o comportamento do fluxo principalmente em região montanhosa.

Asano e Ushida (2016) apresentaram os resultados de um monitoramento da velocidade e profundidade de um canal montanhoso, utilizando sensor ultrassônico para a medição do nível, com intervalo de medição de 1 min e velocidade medida com Doppler de micro-ondas, também com intervalo de 1 min. O evento medido com essas técnicas foi de 59 horas de duração, precipitação acumulada de 288 mm e intensidade máxima de 25 mm.h^{-1} . Os autores observaram que, durante o evento a profundidade da lâmina de água aumentou 4 vezes e a velocidade 12 vezes em relação às condições normais do rio. Com a redução da precipitação, a velocidade reduziu de forma abrupta. Através da observação em campo deste evento, esses autores conseguiram compreender melhor a capacidade de vazão nos canais e também as mudanças nas propriedades hidráulicas durante eventos de maior magnitude, sendo essas informações utilizadas para a previsão de inundações. Contudo, reafirmaram a importância do monitoramento detalhado nessas regiões.

2.3 MODELAGEM DE INUNDAÇÕES

A modelagem hidrológica trata-se de uma ferramenta importante para a realização de avaliações e apoio à tomada de decisão para o gerenciamento dos recursos hídricos, dentre eles, o gerenciamento de inundações. Assim, os modelos hidrológicos são representações matemáticas que simulam o comportamento do ciclo hidrológico em bacia hidrográfica (FAN e COLLISCHONN, 2014). De acordo com Tucci (1998) esses

modelos podem ser classificados em relação a variabilidade espacial dos dados (concentrado ou distribuído), o tipo de variável utilizada (estocástico ou determinístico) e as relações estabelecidas entre essas variáveis (empíricos ou conceituais).

No entanto, para entender e representar o processo de propagação do fluxo no rio e no terreno, são utilizados modelos hidrodinâmicos, que podem representar matematicamente o escoamento considerando, uma, duas ou três dimensões (FAN et al., 2014). Porém, em regiões montanhosas, esses modelos ainda são pouco utilizados devido à heterogeneidade espacial e temporal das precipitações na região, além das elevadas declividades, devido a sensibilidade do modelo a esses parâmetros (PINOS e TIMBE, 2019). Além disso, os dados históricos de chuva e vazão são pontuais, dificultando a reprodução de eventos de inundação (MASCARO et al., 2013).

Por isso, como alternativa para regiões com escassez de dados hidrológicos, há a possibilidade de utilizar descritores do terreno, que utilizam apenas dados topográficos para delimitar a área suscetível a inundação (MANFREDA et al., 2014, TENG et al., 2017).

2.3.1 Modelagem hidrológica com o HEC-HMS

O modelo HEC-HMS da *US Army Corps of Engineers* é gratuito e é composto por equações que permitem a transformação chuva- vazão, em bacias hidrográficas, bem como fornece hidrogramas e informações sobre o volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamento (USACE, 2018). Conforme a classificação de Tucci (1998), o modelo pode ser classificado como concentrado, empírico/conceitual e determinístico.

O modelo calcula o hidrograma utilizando a precipitação, usando a estrutura de bacia e sub-bacias. Além disso, no HEC-HMS há vários métodos que podem ser selecionados para calcular as perdas por infiltração, a transformação da chuva em vazão, escoamento subterrâneo e também a propagação do fluido (USACE, 2018).

O modelo é dividido em seis módulos para o gerenciamento de dados, são eles: gerenciador da bacia; gerenciador meteorológico; gerenciador de especificações de controle; gerenciador de séries temporais; gerenciador de dados pareados; gerenciador de dados em grade (CANHOLI, 2014).

Desta maneira, diversos autores tem utilizado o modelo HEC-HMS para o cálculo de vazões máximas (KNEBL et al., 2005, CHU e STEINMAN, 2009, YUCEL e KESKIN, 2011, MULUNGO, 2012, MONTEIRO e KOBİYAMA, 2013, LIZ, 2018).

Porém é desafiador realizar modelagem hidrológica em região montanhosa, pois há o aumento da complexidade de análise devido à baixa densidade da rede de estação meteorológica, o aumento da variação dos parâmetros de entrada devido a variação da altitude e a complexidade das fontes de escoamento, como precipitação e degelo (CHEN et al., 2017).

Apesar das dificuldades apresentadas, um estudo comparou os modelos hidrológicos HEC-HMS e *Snowmelt Runoff Model* (SRM) utilizados em uma região montanhosa com baixa densidade de estações de monitoramento. Concluíram que o HEC-HMS obteve destaque por apresentar componentes hidrológicos como: evapotranspiração, armazenamento de água no solo, derretimento da neve e escoamento das chuvas, separados o que ajuda a entender o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas com características diferentes (AZMAT et al., 2018).

Em uma bacia montanhosa na China, utilizou-se o modelo *PSU/NCAR Mesoscale Mode* (MM5) aplicado para fazer previsões sobre o clima associado com o modelo HEC-HMS para verificar o perigo hidrogeomorfológico. Utilizando o MM5 para prever a precipitação e o HEC-HMS para gerar as vazões, conseguiram identificar em quais altitudes os fatores topográficos interferiam e qual a vazão gerada (HE et al., 2012).

Em bacias de cabeceira na região do Zimbábue, Gumindoga et al. (2017), utilizaram o modelo HEC-HMS para calcular os hidrogramas das sub-bacias de contribuição, as quais não possuíam medições de vazão. Através da calibração e validação das sub-bacias, com dados fluviométricos, obtiveram bons resultados utilizando para a avaliação o *Nash Sutcliffe* (NSE) e o *Relative Volume Error* (RVE), reproduzindo com sucesso o volume total do escoamento e a vazão de pico para o período de 2004 a 2010.

Outros dois estudos realizados por Yuan, Liu e Wan (2019) e Tu et al. (2020) aplicaram o modelo HEC-HMS em bacias montanhosas não monitoradas. Para a transformação chuva-vazão, ambos os estudos utilizaram o hidrograma unitário *Soil Conservation Service* (SCS) e utilizando o NSE para a avaliação das simulações, obtiveram resultados satisfatórios. Assim, verifica-se que, o modelo HEC-HMS pode ser aplicado para bacias hidrográficas montanhosas com o intuito de reconstruir eventos de inundação.

2.3.2 Modelagem hidrodinâmica com HEC-RAS 2D

Os modelos hidrodinâmicos utilizam a forma completa das equações de Saint-Venant de escoamento, sem desprezar termos da equação de quantidade de movimento. Estes modelos são considerados mais precisos e mais representativos fisicamente, ao simularem o escoamento. Para a resolução desses modelos é necessário um maior número de dados iniciais e um sistema de equações diferenciais parciais quase lineares. Estas equações não possuem resolução analítica, quando considerado o escoamento em rios e canais, sendo então resolvidas por métodos numéricos (TUCCI, 2005).

Os modelos hidrodinâmicos, destacam Teng et al. (2017), são modelos matemáticos que tentam reproduzir o movimento de fluidos e, geralmente, necessitam de resolução computacional. Dependendo da representação espacial do fluxo na planície de inundação, eles podem ser agrupados em modelos do tipo unidimensional (1D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D).

Em superfície o escoamento pode ser permanente e não-permanente (ou transiente). No primeiro caso, a gradiente da velocidade e do nível com relação ao tempo é nula, ou seja, não há variação de estado no sistema. Já no segundo caso, há uma variação no tempo e no espaço da gradiente velocidade e do nível (TUCCI, 2005), ou seja, apresenta uma alteração brusca na vazão (GRIBBIN, 2009). Ainda, na natureza escoamentos permanentes são raros, mas dependendo do detalhamento que se deseja e/ou da escala que se quer analisar, pode ser considerado permanente, como no caso de projetos de engenharia (TUCCI, 2005).

Na maioria de estudos hidrológicos de escoamento superficial de rios e canais considera-se escoamento em regime não-permanente. Sendo este escoamento representado pelas equações de conservação da massa e quantidade de movimento (TUCCI, 2005).

Portanto, quando o interesse é verificar a variação do fluxo com o tempo utilizam-se equações que consideram a variação temporal do escoamento. Assim, para analisar a propagação de hidrogramas em rios, comumente utiliza-se a equação de Saint-Venant, que é composta pelas equação de conservação da massa e do momento. Essas equações são utilizadas em modelos hidrodinâmicos (FAN et al., 2014), para estudos de propagação de vazão em rios e de inundação.

Entre os modelos hidrodinâmicos destaca-se o *Hydrological Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE, 2016). Esse modelo simula a onda de cheia ao longo de um canal e permite que sejam feitas simulações de forma unidimensional ou bidimensional para perfis d'água em situações de escoamento permanente ou transiente, transporte de sedimentos e qualidade de água (USACE, 2016).

O HEC-RAS pode ser utilizado para representar a dinâmica do fluxo em canais naturais ou artificiais e sistemas dendríticos (formado por grande número de afluentes), e também permite incluir estruturas hidráulicas como bueiros, pontes, barragens, ilhas, etc. (USACE, 2014).

O modelo HEC-RAS está em constante desenvolvimento, tanto que, nas primeiras versões uma das grandes limitações era o fato de as simulações serem unidimensionais (HEC-RAS 1D) (MOYA QUIROGA et al., 2016). Assim, para a aplicação da modelagem hidrodinâmica em regiões de leques aluviais é aconselhado o uso da versão bidimensional do HEC-RAS (USACE, 2016).

O modelo HEC-RAS 2D, consiste basicamente em duas equações para simular a propagação do fluido. Essas equações partem do princípio de que o fluido é incompressível, de densidade uniforme e pressão hidrostática. As equações de conservação da massa (continuidade) e momento (quantidade de movimento) resultam na equação de Saint-Venant.

No modelo bidimensional do HEC-RAS podem ser utilizadas as equações de Saint-Venant 2D (ou Equação do Momento Completa) ou uma simplificação desta, chamada de Onda Difusa. Nesta última, foram suprimidos determinados termos da equação da conservação de momento 2D. As duas equações são resolvidas através de um esquema numérico de volumes finitos de primeira ordem e implícitos. O método de volumes finitos possibilita maior estabilidade e robustez no modelo, além de conseguir simular regimes subcríticos, supercríticos e mistos (USACE, 2016).

A equação bidimensional de conservação da massa estabelece que, a massa líquida que passa pelo volume de controle é igual à mudança no armazenamento no volume de controle. A equação é demonstrada pela Equação 1 (USACE, 2016):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

Onde H é a elevação da superfície da água (m), h é a profundidade da água (m), u e v são componentes do vetor velocidade nas direções de x e y ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), t é o tempo (s) e q é o termo de fonte, que representa a entrada de fluxo ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

Já a equação do momento estabelece que o somatório de forças que atuam em um elemento é igual à taxa de variação no momento. Considerando as forças da gravidade, viscosidade turbulenta, atrito e o efeito Coriolis, as Equações 2 e 3 representam na direção x e y , respectivamente (USACE, 2016):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (3)$$

Em que v_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta; c_f é o coeficiente de atrito; f é o parâmetro de Coriolis (s^{-1}), o termo g é a aceleração gravitacional.

Nas equações do momento os termos do lado esquerdo da igualdade representam a aceleração local e a aceleração convectiva. O primeiro termo do lado direito da igualdade descreve a força da gravidade, o segundo a viscosidade turbulenta, o terceiro o atrito do leito e margens do rio e o quarto a força de Coriolis. O fator de atrito é calculado usando a fórmula de Manning, dada pela Equação 4 (USACE, 2016):

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{r^{4/3}} \quad (4)$$

Onde o n é o número de Manning ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1/3}$), $|V|$ é a magnitude do vetor velocidade e R o raio hidráulico (m).

A equação da onda Difusa é considerada mais estável e requer um tempo computacional menor, onde os termos de gravidade e atrito possuem maior relevância no modelo, podendo ser desprezado os termos relacionados à força de Coriolis e a viscosidade turbulenta. Desta maneira, a simplificação da equação de conservação de momento é expressa da seguinte forma (USACE, 2016):

$$g \nabla H = -c_f V \quad (5)$$

Assim, utilizando a equação de Manning para descrever o atrito do fundo do canal, a equação é reescrita da seguinte forma:

$$V = \frac{-(r(H))^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (6)$$

Sendo $R(H)$ o raio hidráulico na altura da elevação da superfície da água H , ∇ é operador diferencial. Desta maneira, inserindo a Equação 6 na 1, obtém-se a 7:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (7)$$

Onde β é calculado por:

$$\beta = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} \quad (8)$$

Assim, a Equação 8 é a representação final da equação da Onda Difusa. Com essa simplificação, há uma redução no tempo computacional e há uma estabilidade maior do modelo (BETSHOLTZ; NORDLÖF, 2017).

Na modelagem hidrodinâmica bidimensional é necessário utilizar uma malha computacional (conjunto de células), que representa a topografia do terreno para propagar o fluido. Neste caso, é utilizado um Modelo Digital de Elevação (LIZ, 2018). Essa malha é definida com um polígono que cobre a área onde será propagado o fluxo (USACE, 2016).

Para propagar o fluido, o HEC-RAS 2D requer a definição das condições de contorno, sendo necessário atribuir valores para no mínimo duas. A primeira refere-se a vazão de entrada no modelo, e a segunda a saída de água do modelo. As condições de contorno do modelo bidimensional podem ser: hidrogramas, cotagramas, curvas-chave ou profundidades normais (USACE, 2016).

2.3.2.1 Aplicação do modelo HEC-RAS 2D em região montanhosa

O modelo HEC-RAS tem sido amplamente utilizado para o mapeamento das áreas inundadas em várias partes do mundo, como por exemplo, Motevalli e Vafakhah (2016) no Irã; Kheradmand et al. (2018) no Níger; Pasquier et al. (2018) na Inglaterra; Monteiro e Kobiyama (2014) e Tschiedel e Paiva (2018) no Brasil.

Em regiões montanhosas, o Sattar et al., (2019) utilizaram o modelo HEC-RAS 2D para simular o rompimento de lagos glaciais no Himalaia. Nas simulações os autores

verificaram que, uma cidade localizada a 46 km a jusante do barramento poderia ser atingida pela onda de cheia em 3 horas e 38 minutos, após o início da brecha, com uma vazão máxima de $3928,16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e velocidade máxima de $13,6 \text{ m.s}^{-1}$.

No Líbano, um estudo feito por Hdeib et al. (2018) em uma bacia montanhosa utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS e hidrodinâmico HEC-RAS 2D, para reproduzir um evento de inundação. Os autores calibraram e validaram o modelo hidrológico utilizando 12 eventos de menor magnitude e, verificaram que a área inundada gerada pelo HEC-RAS 2D conseguiu sobrepor 93% dos 27 pontos coletados em campo.

Na Indonésia, Syafri et al., (2020) também utilizaram o HEC-RAS 2D para simular a inundação em uma bacia montanhosa, reproduzindo hidrogramas para diferentes períodos de retorno: 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Os autores observaram que, o evento com o período de retorno de 100 anos, se ajustou melhor a profundidade da lamina de água dos pontos inundados, mapeados em campo.

O HEC-RAS 2D também foi comparado a outros três modelos hidrodinâmicos: Ilber 2D, Flood Modeller 2D e PCSWMM 2D em uma bacia montanhosa no Equador. O trecho do canal utilizado para a propagação da vazão tinha 5 km e uma declividade de 0,25%. Os autores utilizaram como referência a área inundada gerada pelo HEC-RAS 1D para fazer as comparações com os demais modelos. Com relação a precisão do modelo HEC-RAS 2D, conseguiu representar 88,2% da área inundada para um período de retorno de 20 anos e 86,7% para um período de retorno de 50 anos. O HEC-RAS 2D (PINOS e TIMBE, 2019).

Amora et al., (2016) utilizaram o HEC-RAS 2D para simular inundações em regiões montanhosas com a presença de leques aluviais. Os autores utilizaram um MDE com 1 m de resolução espacial e uma malha computacional de 15 x 15 m. Os hidrogramas obtidos de uma área de contribuição de $84,36 \text{ km}^2$ foram propagados no ápice do leque aluvial ($4,36 \text{ km}^2$). Consideraram que a precipitação atingiu a bacia de contribuição e na área do leque. Por isso, além de utilizarem o hidrograma da bacia de contribuição, adicionaram a precipitação de uma estação pluviométrica localizada próxima ao leque. Assim, encontraram profundidades ultrapassaram os 4 m e as velocidades foram superiores a 2 m.s^{-1} . Verificaram que para um período de retorno de 2 anos, 64,5% da área foi inundada, enquanto que, para um período de retorno de 100 anos, esse total foi de 89,1%.

2.3.3 *Height Above Nearest Drainage (HAND)*

O HAND é um descritor do terreno que calcula a distância vertical em relação à drenagem mais próxima, utilizando os dados do modelo digital de elevação (MDE). Com o HAND é possível gerar um novo MDE com os valores calculados a partir da diferença de elevação entre o pixel da superfície e o pixel do leito do rio para a qual é drenado (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011; CUARTAS et al., 2012, TARBOTON, 2016).

Visando identificar os locais mais propensos a afloramentos do lençol freático Rennó et al., (2008) testaram o HAND em uma bacia hidrográfica na floresta Amazônica para distinguir as florestas pantanosas inundáveis das florestas de terra-firme não inundáveis. Os resultados do HAND mostraram forte correlação entre as condições de água e topografia, mostrando que somente com o MDE é possível identificar áreas propensas à inundação.

O modelo HAND tem sido aplicado para diversos fins, como por exemplo, na análise de paisagem hidrológica e geomorfológica, identificação de deslizamentos de terra e/ou de áreas suscetíveis à inundação, mapeamento digital do solo e de águas superficiais (RAHMATI et al., 2018).

No estudo sobre inundações realizado por Nobre et al. (2015) na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açú, Santa Catarina, o modelo HAND foi validado por meio de comparação entre a mancha de inundação simulada, com a obtida de mapas de inundação de alta resolução espacial. Os autores verificaram que o HAND simulou a área de inundação nos rios atingidos com uma precisão de 86% a 98%.

Mcgrath et al. (2018), realizaram um estudo no Canadá comparando os resultados obtidos com modelos conceituais (método planar, plano inclinado e HAND) com mapas de inundação de eventos históricos, avaliando o tempo de processamento, a profundidade e a extensão da inundação. O HAND obteve um desempenho melhor que os demais métodos.

Afshari et al. (2018) compararam o HAND e AutoRoute com o modelo bidimensional HEC-RAS 2D em duas bacias com declividades de $0,0001 \text{ m.m}^{-1}$ e $0,0003 \text{ m.m}^{-1}$. Constataram que, as áreas de inundação obtidas pelo HAND obtiveram 91% de concordância em relação ao HEC-RAS 2D, utilizando uma hidrograma de projeto com

um período de retorno de 100 anos. O HAND se aproximou dos resultados obtidos pelo HEC-RAS 2D nos locais onde o rio era mais retilíneo e o terreno era plano.

Teng et al. (2017) realizaram um estudo de revisão sobre modelos conceituais empíricos, hidrodinâmicos e simples (sem base física) mais utilizados para simulação de manchas de inundação. Os autores destacaram a importância dos modelos conceituais como o HAND, para aplicação em grandes áreas e locais com escassez de dados hidrológicos para simulação hidrodinâmica da mancha de inundação. No entanto, salientam que esse modelo pode ser inadequado para modelagem de inundações bruscas, por não representar a dinâmica de fluxo e a velocidade.

Zheng et al. (2018) utilizaram o HAND para gerar uma curva-chave sintética, relacionando a vazão ao nível do rio, a partir de informações da geometria do canal determinadas com o HAND. Verificaram que os resultados foram compatíveis com o do modelo HEC-RAS 1D.

O modelo HAND foi desenvolvido para simular áreas de inundação em regiões planas, porém há escassez de estudos em regiões montanhosas. Prenner et al. (2019), utilizaram o HAND para identificar as zonas de rápida resposta hidrológica em bacias montanhosas, utilizando a altura de 3 m para delimitar essa região.

Jafarzadegan et al. (2018), destacaram que o modelo HAND pode ser uma alternativa para simular áreas inundadas em regiões onde há escassez de dados hidrológicos, pois utilizar modelos hidrodinâmicos nesses locais pode se tornar inviável.

2.4 IMPORTÂNCIA DO MAPEAMENTO DE PERIGO DAS INUNDAÇÕES EM REGIÕES MONTANHOSAS

Os mapas de perigo de inundação mostram a probabilidade de ocorrência de inundação, ou seja, é uma ferramenta que mostra a área possivelmente atingida e a intensidade do perigo. Esses mapas são instrumentos que podem ser utilizados para o planejamento territorial (MONTEIRO e KOBİYAMA, 2014; WMO, 2016), uma vez que, permitem identificar as áreas mais adequadas para ocupação.

O mapeamento de perigo de inundações, além de auxiliar no planejamento de uso e na ocupação do solo em regiões montanhosas, possibilita instruir as pessoas sobre os locais de perigo, atuando como ferramenta para auxiliar na gestão do turismo e recreação de forma segura (MAZZORANA et al., 2013). Em situações de ocorrência de inundações, as fatalidades acontecem devido ao comportamento inadequado da

população como, atravessar rios com vazão muito alta, caminhar ou dirigir em ruas inundadas no momento do evento (MARTÍNEZ-GOMARIZ et al., 2016; ARRIGHI et al., 2017).

Existem diferentes métodos para elaborar mapas de perigo de inundações, considerando a altura da lâmina d'água e a velocidade de propagação do fluxo. Por exemplo, Koks et al. (2015) e Bates et al. (2018) propuseram métodos para a elaboração de mapas de perigo, considerando somente a altura da lâmina d'água.

Stephenson (2002) propôs um índice de perigo calculado pelo produto da profundidade pela velocidade do fluxo, e associou o perigo conforme a intensidade e frequência de um evento extremo, gerando o índice de risco de perigo. Para Martínez-Gomariz et al. (2016) a velocidade mostra-se uma influência significativa para níveis de perigo mais elevados na composição do índice de perigo.

Em regiões montanhosas com presença de leques aluviais, as inundações são muito perigosas, uma vez que, o fluxo vem em alta velocidade e transportando uma grande quantidade de detritos, podendo ocorrer o processo de avulsão, aumentando a área de perigo nas regiões adjacentes (LANCASTER et al., 2012). Kain et al. (2018) utilizou a modelagem hidrodinâmica com RiverFlow 2D para compreender os processos que ocorreram em dois eventos extremos. Os autores verificaram que o local foi atingido principalmente por deslizamento de terra e inundações bruscas, e reforçaram a importância de estudar estes locais para a prevenção de desastres naturais.

Em estudo realizado por Mollaei et al. (2018) em uma região de leque aluvial, aplicaram um modelo hidrodinâmico FLO-2D, um modelo FAN utilizado para análise de perigo em regiões de leques aluviais e uma abordagem geomorfológica, afim de identificar com precisão as regiões ativas e inativas do leque. Os autores verificaram que a combinação dos três métodos possibilitou resultados satisfatórios, mostrando-se como alternativa para regiões que possuem poucos dados monitorados. Desta forma, torna-se importante o aumento do mapeamento das áreas de perigo em regiões montanhosas.

2.5 ESTUDOS HIDROLÓGICOS E INUNDAÇÃO NA BACIA DO RIO MAMPITUBA

A bacia do rio Mampituba está localizada no extremo sul de Santa Catarina, e também abrange áreas do litoral norte do Rio Grande do Sul. O baixo curso do rio Mampituba é o limite político entre os dois Estados. A bacia faz parte do sistema da

vertente atlântica, sendo que as porções mais elevadas da bacia estão nas escarpas da Serra Geral.

Na bacia do rio Mampituba está o município de Praia Grande. Segundo relatos de Ronsani (1999), na história de Praia Grande ocorreram eventos de inundações em 1903, 1911, 1947, 1974 e 1995. Sendo o evento de 1974, um dos mais catastróficos, desencadeado por elevadas precipitações que iniciaram no dia 23 de março. No entanto, nesse dia não houve aumento do nível do rio Mampituba, em decorrência de um barramento natural no rio formado por sedimentos no cânion Itaimbezinho. Porém, o autor relata que no dia 24 de março pela manhã, os moradores ouviram um estrondo e em minutos ocorreu a inundação brusca na cidade, causando a morte de 32 pessoas, e bloqueios nas estradas do município, deixando a população isolada, tendo que receber mantimentos por meio de helicópteros.

Tenfen (2008) também destaca que, em maio de 2007 ocorreram na região eventos de grande magnitude, causados por uma chuva intensa, em menos de 24 horas. Esse evento desencadeou escorregamentos nas encostas da serra, fluxos de detritos, inundações bruscas, migração de leito dos rios e assoreamentos na planície de inundação. Esses fenômenos causaram muitos danos sociais e materiais à população do município, inclusive com perda de uma vida.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2017) em 2017 fez um levantamento dos riscos de desastres naturais na região do município de Praia Grande (SC) e classificou os locais como de risco alto e risco muito alto de ocorrência de movimentos de massa e inundações. Como medidas para a redução de desastres naturais dessa natureza propôs, a realização de estudos hidrológicos, já que ainda são raros nessa região.

Sehnem et al. (2015) realizaram estudos preliminares para identificar o potencial de inundação na bacia do rio Mampituba, avaliando as características morfométricas de duas sub-bacias, que denominaram de Molha Coco e Malacara. Através da análise da densidade de drenagem, constataram que as sub-bacias são bem drenadas nas cabeceiras e mal drenadas na região de planície. Além disso, a elevada variação de altitude entre as nascentes até a foz dos rios é favorável à ocorrência de fluxos torrenciais, com potencial elevado de assoreamento e ocorrência de inundações na região de planície, culminando em desastres naturais. O Quadro 1 apresenta alguns registros dos principais eventos extremos ocorridos até 2007 e posteriormente a esta data, foram listados eventos recentes de menor magnitude ocorridos em Praia Grande (SC).

Quadro 1 - Descrição dos principais eventos extremos ocorridos em Praia Grande, SC.

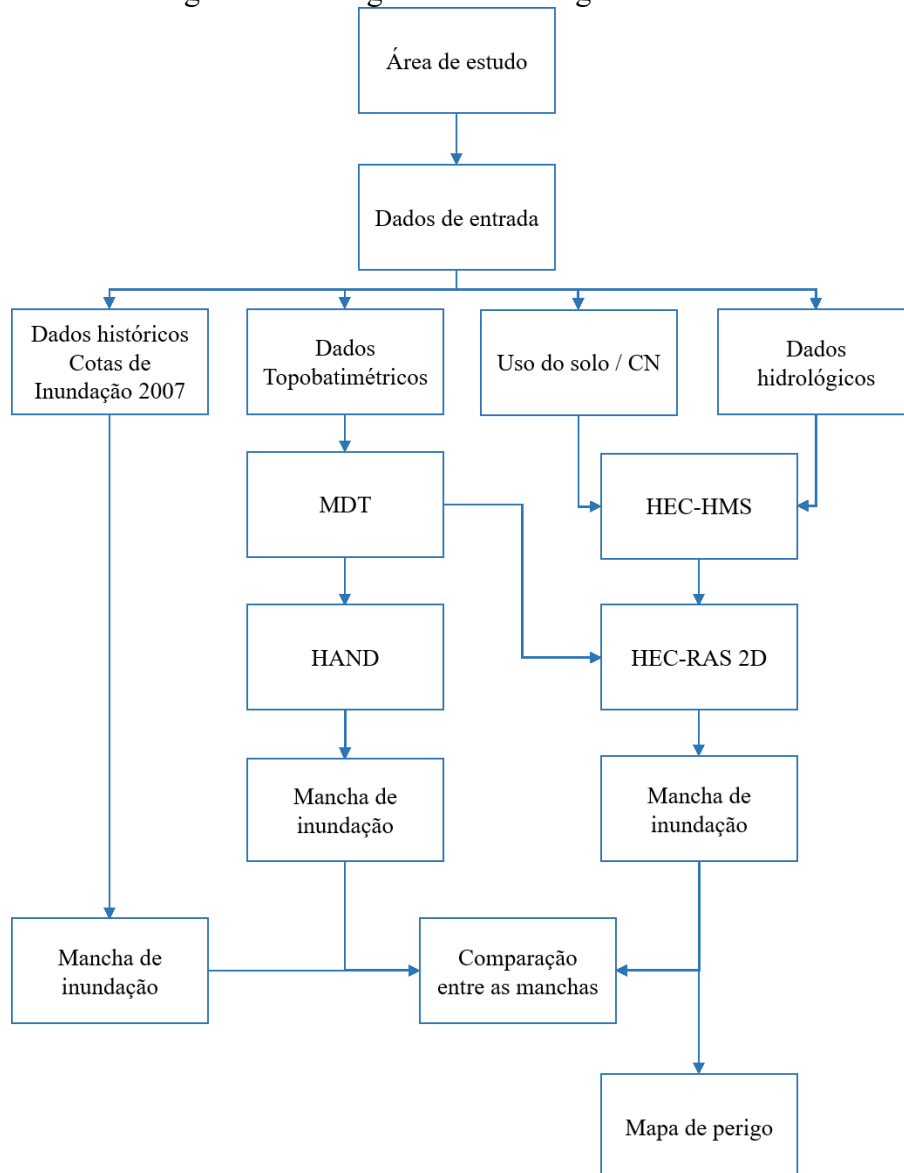
| Mês e ano | Descrição do evento | Danos causados | Número de vítimas | Referência |
|------------------|--|--|--|---|
| Março de 1974 | Chuvas intensas com 8 dias de duração, sem alterar o nível, devido à um barramento. | Morte de animais de criação e casas arrastadas. | 32 mortes | Ronsani (1999) |
| Dezembro de 1995 | Chuva repentina de um único dia | Morte de animais de criação e casas arrastadas. | Sem registro | Ronsani (1999) |
| Março de 2007 | Precipitações intensas a partir das 16 h do dia 03/03/2007 até às 3 h do dia 04/03/2007 totalizando um 211 mm. | 15 edificações danificadas e 1 casa destruída | 1 óbito; 5 pessoas levemente feridas e 1 gravemente ferida | Prefeitura Municipal de Praia Grande (2007) |
| Maio de 2008 | Precipitações intensas causadas por um ciclone extratropical, totalizando 170 mm, no período de 2 a 5 de maio de 2008. | 12 km de estradas foram danificadas, inundação de 45 ha de áreas de arroz irrigado. | Não houve mortes e nem pessoas feridas, mas 23 pessoas ficaram desalojadas | Prefeitura Municipal de Praia Grande (2008) |
| Janeiro de 2009 | Volume de chuva de 217 mm, nos dias 3 e 4 de janeiro | 2 residências danificadas, 32 km de estradas danificadas, perda de 120 ha de lavoura de arroz, 8 ha de milho e 5 ha de mandioca. | 10 pessoas desalojadas e 1 levemente ferida | Prefeitura Municipal de Praia Grande (2009) |

| | | | | |
|------------------|---|--|--------------------------------|---|
| Março de 2009 | Inundação provocada por chuvas intensas e localizadas, nos dias 08 e 09 de Março de 2009, com o transbordamento do leito dos rios: Pavão, Malacara, Molha Coco. | Danos de 30 casas e 15 km de estradas. | 30 pessoas ficaram desalojadas | Prefeitura Municipal de Praia Grande (2009) |
| Setembro de 2009 | Precipitação de 8 a 12/09/2009 | Aterramento de plantas e perda de solo agrícola em 350 ha e 1 residência danificada | 1 morte | Prefeitura Municipal de Praia Grande (2009) |
| Março de 2010 | Precipitação de mais de 200 mm em 48h nos dias 27 e 28 de março de 2010. | Foram danificadas 9,8 km de estradas e perda total de 120 ha de lavoura de arroz. | Não houve | Prefeitura Municipal de Praia Grande (2011) |
| Janeiro de 2011 | Precipitações intensas e localizadas no período de 17 a 22/01/2011. | Deslizamentos de terras, rompimento de cabeceiras das pontes e danos de 4 km de estradas. | Não houve | Prefeitura Municipal de Praia Grande (2011) |
| Janeiro de 2019 | Precipitação intensa na encosta da Serra Geral, na bacia do rio Malacara, com 40,8 mm em 40 minutos no dia 13/01/2019. | Após duas horas e meia do início da precipitação, um grupo de 50 pessoas ficaram presos na trilha do rio Malacara. | Não houve | Nortesul (2019) |

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar a inundação do evento de 2007 foram utilizados os modelos HEC-HMS, HEC-RAS 2D e HAND. Os principais dados de entrada para esses modelos foram: série histórica de precipitação e vazão; chuva efetiva; MDE. Além disso, realizou-se o mapeamento de perigo de inundação, utilizando os registros históricos da inundação de 2007 afim de avaliar a precisão da área de inundação reproduzida pelos modelos HEC-RAS 2D e HAND. A Figura 1 apresenta o fluxograma metodológico com as principais etapas apresentadas no presente trabalho.

Figura 1 - Fluxograma metodológico do estudo.



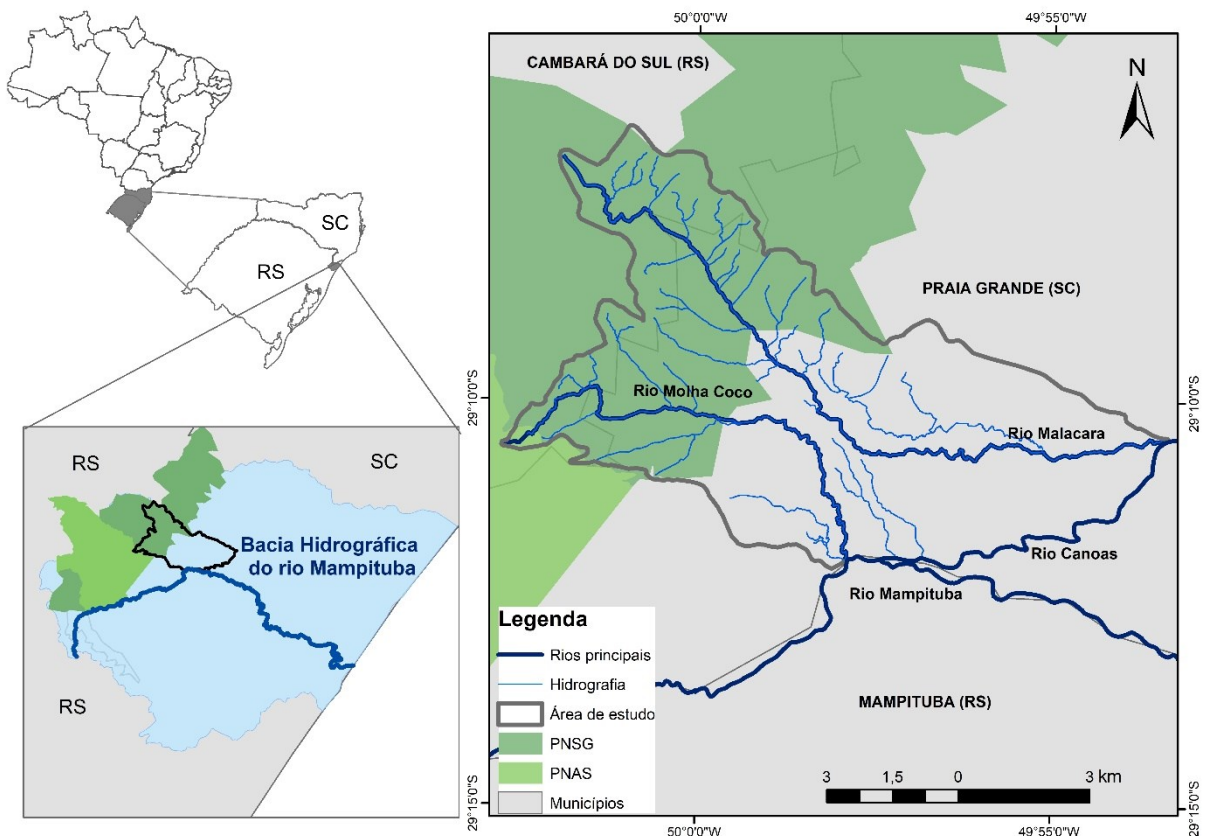
Fonte: do autor.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende duas sub-bacias da bacia do rio Mampituba, (1940 km²), que são: a bacia do rio Molha Coco e Malacara. A bacia do rio Mampituba abrange áreas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo o rio principal o limite político entre esses dois estados.

Os rios Molha Coco e Malacara (Figura 2), nascem nas escarpas da Serra Geral, aproximadamente 1100 m de altitude, e encontram em pouca distância (10 km), a planície de inundação (altitude de 100 m), onde está localizado o município de Praia Grande – SC (SEHNEN et al., 2015).

Figura 2 -Mapa de localização da área de estudo.

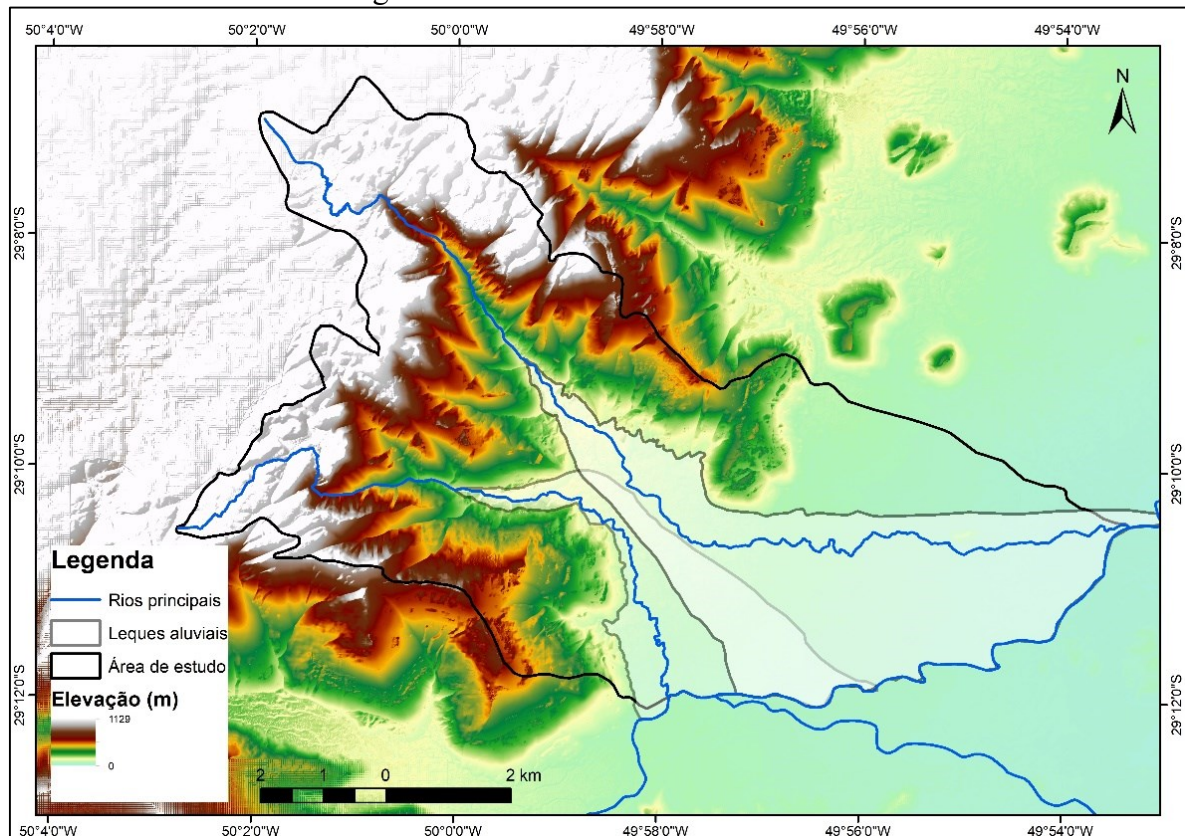


Fonte: do autor.

Nessa região, segundo Scheibe et al. (2010), as escarpas são formadas por rochas de derrames basálticos, onde predomina a vegetação característica de Floresta Ombrófila Mista (Mata Atlântica), onde estão localizados os Parques Nacionais Serra Geral (PNSG) e Aparados

da Serra (PNAS). A parte mais plana dessa região é formada por sedimentos basálticos grosseiros (cascalhos, seixos, e matacões), arenosos e argilosos. As encostas da serra são abruptas, apresentando grande amplitude altimétrica, com vales fortemente encaixados que se abrem na planície, formando depósitos de leques aluviais, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Altimetria da área de estudo.



Fonte: do autor.

Os solos da área de estudo são do tipo: (a) Neossolo Quartzarênico hidromórfico típico (65%), b) Cambissolos Húmicos (30%), Gleissolo Melânico Eutrófico (5%) (SEHNEN et al., 2015).

Segundo a EMBRAPA (2004), os Neossolo Quartzênico hidromórfico, de formação muito recente, ocorrem em relevos ondulados a montanhosos, originados de sedimentos aluviais e de decomposição de rochas do cristalino e apresentam profundidade (> 60 cm). Os Cambissolos Húmicos, que variam de rasos a profundos (60 cm a 150 cm), ocorrem no domínio do Planalto Basáltico. Já os Gleissolos Melânicos Eutróficos são solos (<60 cm), muito mal drenado, de cor acinzentada ou preta, e ocorrem nas várzeas dos rios e nas planícies lagunares, atualmente ocupadas com lavouras de arroz.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo Cfa, ou seja, subtropical (mesotérmico úmido), com verões quentes e invernos frios. A precipitação média anual é de 1500 mm e evapotranspiração média anual de 900 mm (PANDOLFO et al., 2002).

3.2 MATERIAL

Os materiais utilizados para o presente trabalho foram:

- GPS RTK TPS T10 utilizado para fazer o levantamento topobatimétrico dos rios Molha Coco e Malacara;
- GPS de navegação modelo Etrex 20 da Garmin, para a identificação dos locais inundados no evento de 2007;
- Nível topográfico automático FOIF/AL 132 para o levantamento das profundidades e distâncias em diferentes pontos da seção transversal no rio Malacara;
- Molinete hidrométrico MLN-7 189.09.14 para medição de velocidade para o cálculo da vazão;
- Estação fluviométrica da marca SOLAR, com sensor de pressão modelo SL2000-NV para medição do nível e o sensor de turbidez modelo SL-2000-TL e réguas linimétricas (Figura 4);
- Levantamento de solos do Rio Grande do Sul na escala 1:5000000 (EMBRAPA, 2011) e Santa Catarina na escala 1:250000 (EMBRAPA, 2004) para identificação dos grupos hidrológicos e cálculo do CN;
- Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de espacial de 1m x 1m e ortofotos com resolução de espacial de 0,39 m x 0,39 m obtidos do mapeamento aerofotogramétrico realizado em 2010 (em escala 1:10000) para o estado de Santa Catarina (SDS, 2010);
- Software AutoCAD 2019 para a determinação da área molhada e perímetro molhado da seção transversal do rio Malacara;
- Software ArcGIS 10.3.1 para elaboração do mapa de uso do solo e determinação das características físicas da bacia (área, declividade, comprimento dos rios);
- Software HEC-HMS para as simulações hidrológicas;
- Software HEC-RAS 2D para as simulações hidrodinâmicas;
- Software HAND para obtenção da área de inundação.

Figura 4 - Estação fluviométrica do rio Malacara, Praia Grande, SC.



Fonte: do autor.

3.2.1 Dados hidrológicos

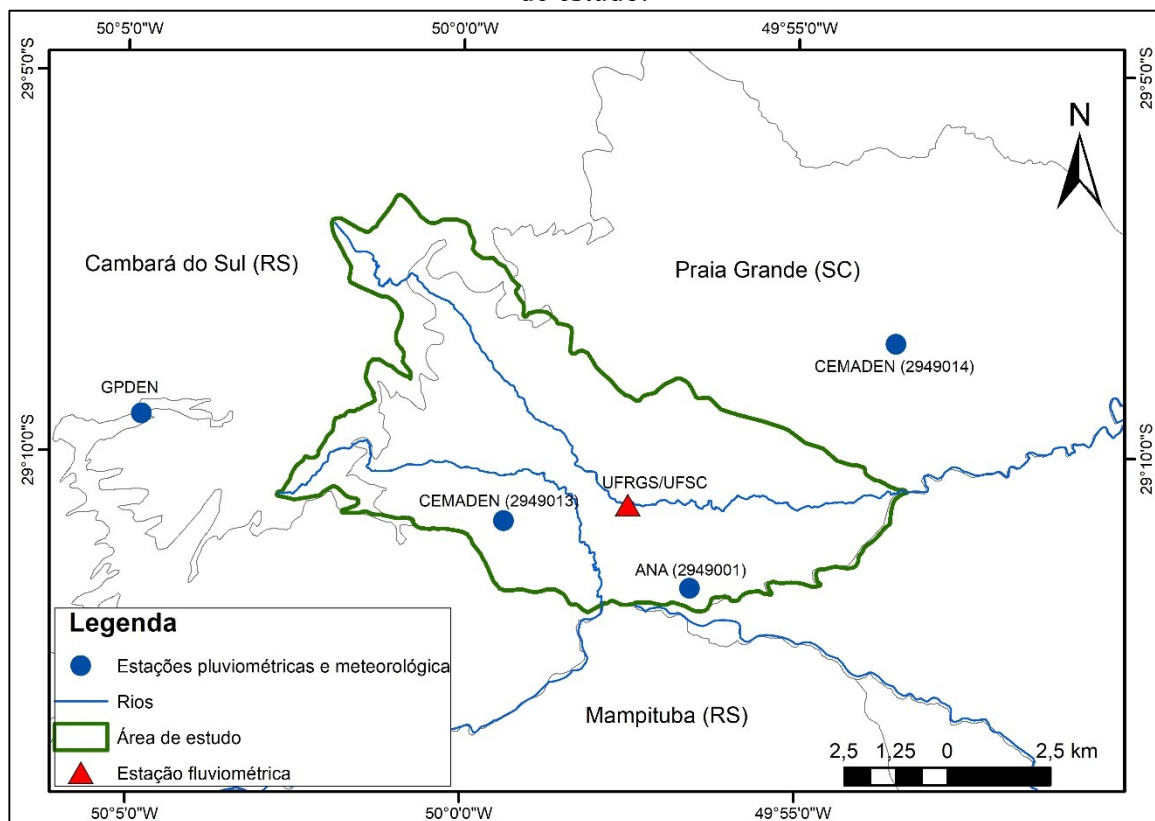
A Tabela 1 mostra as características das estações fluviométricas (F), pluviométricas (P) e meteorológica (M) utilizadas no presente trabalho. A Figura 5 mostra localização das estações e a Figura 6, apresenta a distribuição espacial da precipitação.

Tabela 1 - Características das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológica.

| Responsável | Tipo | Local | Lat. | Long. | Alt. (m) | Intervalo | Período de dados |
|----------------------|------|-------|---------|---------|-------------|-----------|------------------|
| ANA (2949001) | P | PG* | -29,20° | -49,96° | 60 | 1 dia | 1977 a 2019 |
| GPDEN | M | Camb* | -29,16° | -50,08° | 917 | 10 min. | 2017 a 2020 |
| CEMADEN (2949013) | P | PG* | -29,18° | -49,99° | 492 | 10 min. | 2015 a 2020 |
| CEMADEN (2949014) | P | PG* | -29,14° | -49,89° | 38 | 10 min. | 2014 a 2020 |
| UFRGS/UFSC | F | PG* | -29,18° | -49,96° | 74 | 10 min. | 2019 a 2020 |

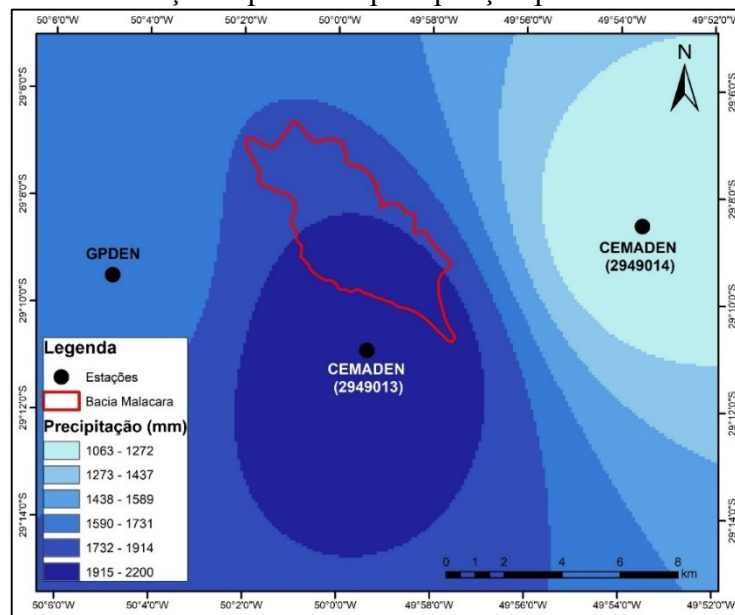
*Camb. - Cambará do Sul (RS), PG-Praia Grande (SC).

Figura 5 - Localização das estações pluviométricas, meteorológicas e fluviométricas na área de estudo.



Fonte: do autor.

Figura 6 – Distribuição espacial da precipitação pelo método de Isoietas



Fonte: do autor.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Identificação das áreas inundadas no evento de 2007 com registros históricos

No presente trabalho foi escolhido o evento de 2007 por ser de grande magnitude, relativamente recente e por ter registros históricos, como: AVADANS, acervo fotográfico, livros, etc.

Para o mapeamento da área inundada em 2007 foi realizado um levantamento em campo dos locais inundados (latitude, longitude e altitude), utilizando um GPS de navegação e uma trena para medir a altura da lâmina d'água. Para identificação desses locais utilizou-se como referência os registros históricos do município e também as informações dos questionários aplicados à comunidade. Os locais de inundação mapeados em campo serviram como referência para ajustar às áreas simuladas a simulada no modelo HEC-RAS 2D.

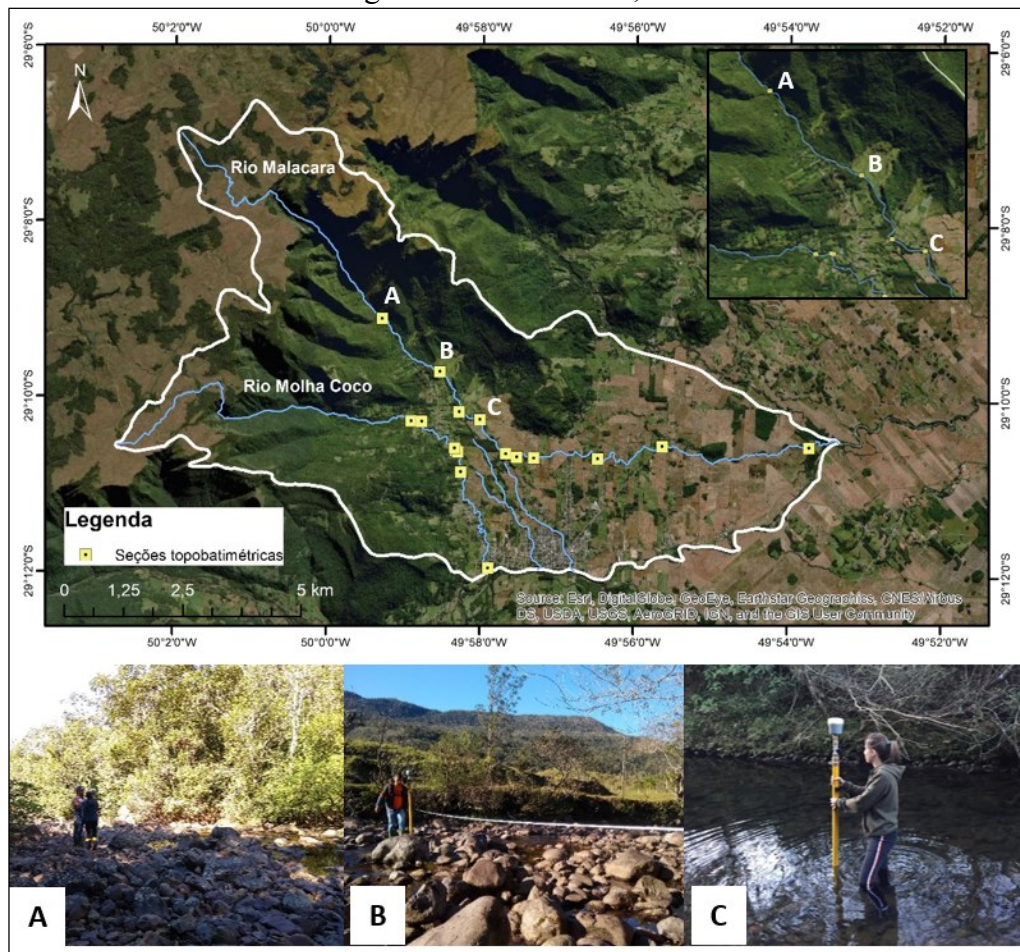
3.3.2 Levantamento topobatimétrico e correção do MDE

Com objetivo de representar os rios Molha Coco e Malacara no MDE de 1m de resolução, foi realizado um levantamento topobatimétrico nos trechos dos rios inseridos nos leques aluviais. Nesse levantamento foram coletados 8 seções transversais no rio Molha Coco

em um trecho de 7 km e 10 seções no Malacara no trecho de 13 km, com um GPS RTK, pelo método de posicionamento cinemático, com correção em tempo real. Essas seções foram determinados levando em consideração vários aspectos, como: mudanças na declividade, o fácil acesso ao local e os meandros acentuados, conforme recomenda Merwade et al. (2008). As seções estão apresentadas no Apêndice A.

Os pontos de elevação de cada seção foram interpolados, usando o método Inverso do Quadrado da Distância, com a finalidade de gerar um arquivo *raster* de cada rio, que foi integrado ao MDE, a fim de corrigir a profundidade dos *pixels* e a largura dos canais. Essas operações foram feitas no ArcGIS 10.3.1. A Figura 7 mostra os locais onde foram feitas as medições das altitudes dos pontos, distribuídos nos rios Molha Coco e Malacara e o limite da região de abrangência de estudo.

Figura 7 - Locais de medições topobatimétricas ao longo dos rios Molha Coco e Malacara na região de Praia Grande, SC.



Fonte: do autor.

3.3.3 Medição de vazão no rio Malacara

Na bacia do rio Malacara foi instalada uma estação hidrossedimentológica (régua linimétrica, sensor de nível e de turbidez) próximo à ponte na localidade de Alvorada (Figura 4) para monitorar o nível do rio. Na seleção do local para instalação dessa estação foram considerados os seguintes aspectos: local de fácil acesso, margens paralelas onde a vazão do rio é mais estável, ponte para fixar as régua linimétrica e local seguro para instalar os sensores de nível e turbidez.

As vazões mais baixas foram determinadas à Vau, usando um molinete hidrométrico. Já para as vazões mais altas foi necessário utilizar um objeto flutuante.

Com o molinete hidrométrico foi utilizado o método de Integração da velocidade com a área. Para a medição da velocidade média do rio, foi demarcada uma seção transversal usando uma corda fixada de margem a margem no rio, sobre a qual foi posicionado o molinete hidrométrico e medida a velocidade do fluxo a cada 1 m de distância, totalizando 11 verticais. A distância entre as verticais foi determinada dividindo-se a largura do rio (12,40 m) pelo número de verticais adotado. Em cada vertical, onde as profundidades eram menores ou iguais a 0,6 m, as velocidades foram medidas a 60% da profundidade. Já para profundidades acima de 0,6 m foram realizadas medições a 20% e 80% da profundidade na vertical, conforme recomenda Santos (2001). A velocidade média em cada vertical foi determinada utilizando a Equação 9 do próprio molinete. Essa equação foi determinada a partir da calibração feita no Laboratório de Instrumentação e Canal de Velocidade do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 07 de novembro de 2019.

$$V = 0,26675.n^o + 0,00189 \quad (9)$$

Onde V é a velocidade pontual na vertical em $m.s^{-1}$ e n^o é o número de rotações por segundo da hélice do molinete.

Com os dados obtidos da seção transversal foi calculada a vazão, usando o método da Seção Média (SANTOS, 2001). A Figura 8 mostra o equipamento utilizado para medir a vazão.

Figura 8 - Molinete hidrométrico utilizado para a medição de vazão.



Fonte: do autor.

O método do flutuador consiste em determinar a velocidade de deslocamento de um objeto flutuante, cronometrando o tempo percorrido pelo objeto a uma distância conhecida.

Assim, nos dias de chuva intensa, onde a vazão e a velocidade do rio Malacara eram muito altas, não sendo possível realizar as medições à Vau com o molinete hidrométrico, utilizou-se uma vara de bambu como objeto flutuante. Para validar cada medição, o objeto foi lançado 4 vezes. Desta forma, a vazão foi calculada pela Equação 10 (PALHARES et al., 2007):

$$Q = \frac{A_m L_m C_m}{T_m} \quad (10)$$

Onde Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), A_m é a área molhada da seção transversal (m^2), determinada com o nível óptico topográfico, L_m é o comprimento da distância percorrida pelo objeto flutuante (34 m), C_m é o fator de correção da velocidade (valor adotado de 0,6) e T_m é o tempo médio de deslocamento (s) do flutuador na distância L_m .

Para a determinação da equação da curva-chave (Equação 11) da seção do rio Malacara foram realizadas medidas simultâneas do nível da água com sensor de nível e de vazão com molinete e flutuador. No total foram realizadas 12 medições de vazão e de nível e utilizada a equação da curva-chave:

$$Q = a \cdot (h_x - h_{x0})^b \quad (11)$$

Onde Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); h_x é a altura da lâmina d'água medida no sensor de nível (m); h_{x0} é a altura da lâmina d'água quando vazão é próxima de zero (m); a e b são parâmetros (adimensionais), ajustados pelo método dos mínimos quadrados. Para o presente trabalho adotou-se o adotou-se uma altura de lâmina d'água (h_{x0}) de 0,28 m.

No entanto, foi necessário realizar a extrapolação da curva-chave para o cálculo das vazões máximas, devido à ausência de medições de vazão com cotas mais elevadas. Para a extrapolação da curva-chave utilizou-se a Equação 12 de Manning, dada por:

$$Q = A \cdot \frac{1}{n} \cdot r^{2/3} s^{1/2} \quad (12)$$

Onde A é a área da seção em m^2 ; n é o número de rugosidade de Manning; r é o raio hidráulico (m) e s é a declividade da seção em $m.m^{-1}$.

O raio hidráulico consiste na razão entre a área molhada e o perímetro molhado e foram determinados no software Autocad. A declividade foi calculada com base nos nas altitudes determinadas com GPS RTK, medidos a uma distância de 30 m a montante e a jusante da seção transversal.

Os coeficiente de Manning (n) adotados variaram de 0,04 a 0,07, definidos com base em CHOW (1959), levando-se em consideração as características do leito e das margens do rio Malacara. A Figura 9 mostra o tipo de leito e margens dos rios dessas bacias.

Figura 9 - Seção transversal do rio Malacara.



Fonte: do autor.

3.3.4 Chuva de projeto

O cálculo da chuva de projeto foi realizado por meio da equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) determinada por BACK (2013) para a região de Praia Grande (SC), dada pela Equação 13:

$$i = \frac{974,22T^{0,211}}{(t + 8,92)^{0,699}} \quad (13)$$

Onde o i é a intensidade média máxima da chuva em mm.h^{-1} ; T é o período de retorno (anos); d é a duração da chuva (minutos).

Para o cálculo da intensidade média máxima da chuva (i) foi utilizada a estação da ANA, monitorada pela EPAGRI (2949001). Para determinação dos hietogramas foram utilizados os períodos de retorno de 5, 10, 50, 100 e 200 anos, com a finalidade de identificar as regiões atingidas pela ocorrência dessas vazões máximas. Para a distribuição temporal da intensidade da chuva foi considerada a curva com 50% de frequência do 3º quartil de Huff (1967).

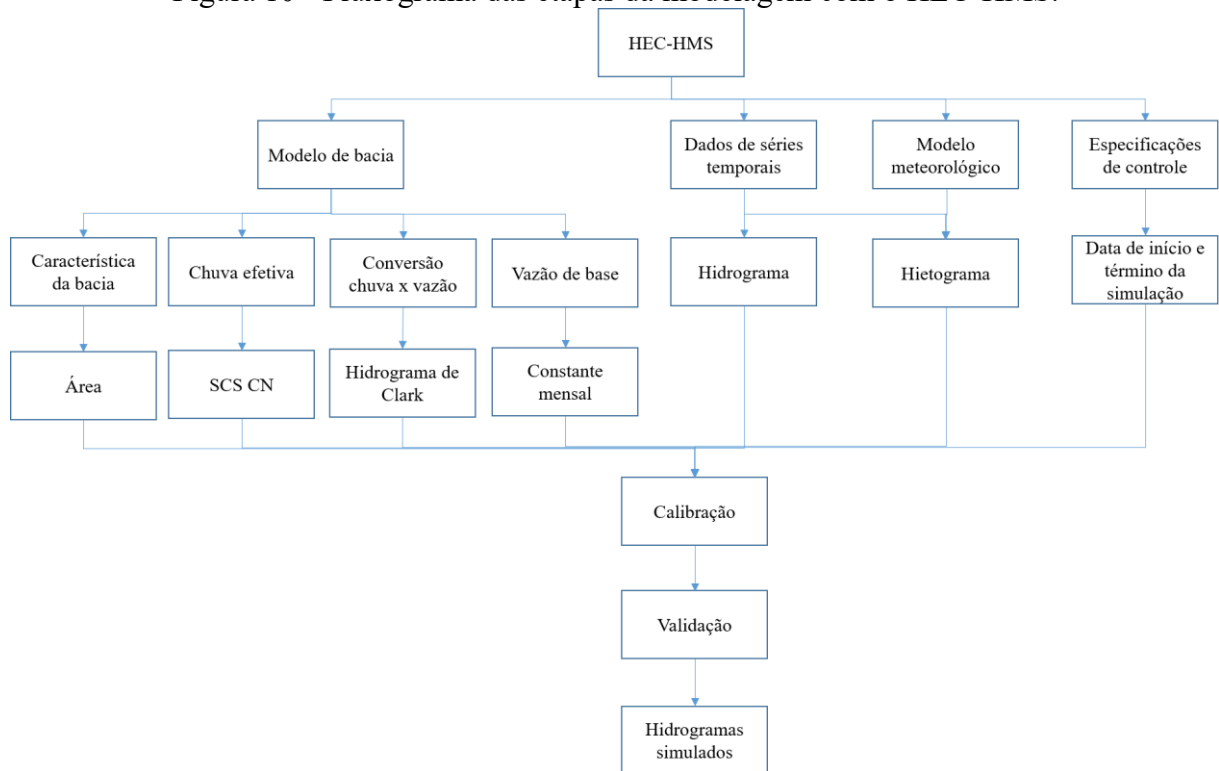
3.3.5 Determinação da vazão máxima para diferentes períodos de retorno com o HEC-HMS

Para determinar a vazão máxima ocorrida no evento de 2007 foi utilizado o modelo hidrológico HEC-HMS. Modelos hidrológicos transformam a chuva em vazão, gerando hidrogramas e informações sobre o volume de escoamento, vazão de pico e tempo de escoamento (USACE, 2018). O hidrograma é obtido, através de um método que determina a chuva efetiva, juntamente com uma função de transferência, que realiza a distribuição temporal do volume total de chuva efetiva (CUNHA et al., 2015).

Para transformar a chuva em vazão o modelo HEC-HMS calcula as perdas de precipitação e os escoamentos direto e de base.

A Figura 10 apresenta um fluxograma dos processos utilizados no HEC-HMS para determinar a vazão máxima nas bacias Molha Coco e Malacara.

Figura 10 - Fluxograma das etapas da modelagem com o HEC-HMS.



Fonte: do autor.

Para estimar a chuva efetiva utilizou-se o método *Curve Number* (CN) desenvolvido pela *Soil Conservation Service* (SCS) dos EUA. Esse método é amplamente utilizado para pequenas bacias hidrográficas sem dados medidos de vazão (MISHRA e SINGH, 2003). Os valores de CN são definidos combinando o grupo hidrológico do solo, as condições de umidade antecedente e o tipo de uso e ocupação do solo, característicos de bacias experimentais agrícolas dos Estados Unidos (USDA, 1985).

Neste estudo, os valores de CN foram determinados combinando, por sobreposição, o mapa contendo os grupos hidrológicos do solo com o mapa de uso e ocupação do solo bacia do rio Malacara. A sobreposição dos mapas foi feita no software ArcGIS 10.3.1. Essa combinação resultou em diversos valores de CN, correspondentes a cada grupo hidrológico.

Para o mapa de uso e ocupação do solo foram utilizadas ortofotos digitais, com resolução espacial de 1 m. Este mapa foi elaborado no ArcGIS 10.3.1, usando o método de classificação supervisionada Máxima Verossimilhança. Foram definidas seis classes de uso e ocupação do solo, representativas da área da bacia de estudo, como: florestas (nativa e plantada); pastagem, lavoura, solo exposto (áreas de agricultura e estradas de terra); edificações e água. Já os grupos hidrológicos dos solos da bacia foram estabelecidos com base em Sartori

et al. (2005). Dessa combinação obteve-se diversos valores de CN, sendo adotado o valor de CN obtido pela média ponderada, calculada pela Equação 14:

$$CN = \frac{\sum A_i CN_i}{A_t} \quad (14)$$

Em que A_i é a área de cada uso e ocupação de solo (km^2); A_t é a área total da bacia do rio Malacara (km^2); CN_i é o CN calculado por grupo hidrológico.

A precipitação efetiva foi calculada pela Equação 15:

$$Q_e = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)} \quad (15)$$

Onde Q_e é a chuva efetiva total (mm); P a precipitação total, (mm); S é a retenção potencial de água no solo (mm); Ia é abstração inicial de água (mm), que no método SCS representa 20% da precipitação total, valor adotado no presente trabalho.

A retenção potencial de água no solo é determinada em função do CN (USDA, 1985), e calculada por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (16)$$

Os valores de CN foram determinados para uma condição média de umidade antecedente do solo (CNII), que leva em consideração a altura pluviométrica acumulada em 5 dias antecedentes à chuva máxima (USDA, 1985).

A estimativa da vazão máxima foi obtida usando o hidrograma unitário de Clark. Este método considera o histograma tempo-área, o tempo de concentração e o coeficiente de armazenamento (CLARK, 1945).

O método do hidrograma unitário de Clark (1945) considera: (a) a atenuação da vazão gerada pela precipitação efetiva (mm) em função do armazenamento na bacia; (b) o processo de translação, que considera o intervalo de tempo entre a chuva efetiva na bacia hidrográfica e sua contribuição para a vazão no exutório da bacia.

O hidrograma unitário de Clark utiliza o tempo de concentração, o coeficiente de armazenamento e a vazão de base. A ordenada do hidrograma é calculada pela Equação 17:

$$Q_{i+1} = 2C_o R_{e(i)} + C_1 Q_i \quad (17)$$

Onde, Q_{i+1} é a ordenada do hidrograma; i é o intervalo de tempo (h); Re é a precipitação efetiva distribuída (mm), dependendo do histograma de área-tempo; C_o e C_1 são coeficientes de ponderação, calculados por:

$$C_o = \frac{0,5t}{k + 0,5t} \quad (18)$$

$$C_1 = \frac{k - 0,5t}{k + 0,5t} \quad (19)$$

Sendo k o coeficiente de armazenamento e t o intervalo de tempo da simulação (horas). O coeficiente de armazenamento foi calculado pela equação de Dooge (1973), expressa por:

$$k = 80,7A^{0,23}Decl.^{-0,70} \text{ (partes por 10000)} \quad (20)$$

Onde A é a área da bacia (km^2); $Decl.$ a declividade média do rio principal (m.m^{-1}).

A área de estudo foi delimitada no ArcGIS 10.3.1, usando como base as curvas de nível, espaçadas de metro em metro, determinadas a partir do MDE da SDS (2010). A seção de controle (exutório) foi definida no rio Malacara, no local onde foi instalada a estação fluviométrica. O tempo de concentração (t_c) foi calculado pela equação de Dooge (DOOGE, 1973), expressa por:

$$t_c = 0,365A^{0,41}Decl.^{-0,17} \quad (21)$$

Para o escoamento de base utilizou-se a vazão mínima medida na estação fluviométrica do Malacara correspondente ao evento utilizado para a calibração.

3.3.5.1 Ajuste dos parâmetros de entrada do modelo HEC-HMS

Para a o ajuste do modelo HEC-HMS para sub-bacia do rio Malacara foram utilizados dois eventos, um no período de 02/01/2020 a 06/01/2020, adotado para a calibração e outro no período de 21/01/2020 a 26/01/2020 para a etapa de validação.

A precipitação média da bacia Malacara utilizada como entrada no modelo HEC-HMS foi calculada da pelo método de Isoietas, usando as estações pluviométricas do GPDEN e CEMADEN (Tabela1). Na Figura 6 consta o mapa de Isoietas com a precipitação média da bacia. Além da precipitação, utilizou-se os dados da estação fluviométrica da UFSC/UFRGS, também com intervalo de medição de 10 min. Na etapa de calibração automática foram ajustados os parâmetros de tempo de concentração (t_c), coeficiente de armazenamento (k), CN e abstração inicial (Ia). Esse ajuste foi feito utilizando um intervalo de valores tomando como referência o t_c , k , CN e Ia calculados (em torno de 10% para mais e para menos). Na calibração utilizou-se a função objetivo *Nash Sutcliffe* (NSE) (NASH e SUTCLIFFE, 1970), a qual permite

comparar as vazões simuladas, com as medidas, sendo mais sensível aos erros nas vazões máximas, considerado adequado para a previsão de vazões máximas (TUCCI, 2005). Os valores de NSE variam de menos infinito a 1, sendo este último representativo de ajuste perfeito entre os hidrogramas simulados e observados, sendo calculado por:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^o (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^o (Q_{obs}(t) - Q_{mean}(t))^2} \right] \quad (22)$$

Onde $Q_{obs}(t)$ é a vazão observada ($m^3.s^{-1}$), $Q_{sim}(t)$ é a vazão simulada ($m^3.s^{-1}$); $Q_{mean}(t)$ é a média das vazões observadas; t é o tempo; e o é o número de observações.

Além da função objetivo, o modelo permite utilizar indicadores para avaliar o desempenho das simulações, como: *Ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data* (RSR) e *Percent BIAS* (PBIAS). O RSR é calculado como a razão entre a raiz quadrada do erro médio (RMSE) com o desvio-padrão (σ) dos dados observados e simulados, logo, quanto mais próximo de zero o valor do RSR, menor será o erro (RMSE) e consequentemente, melhor será o desempenho da simulação (MORIASI et al., 2007). A Equação 23 mostra o cálculo do RSR:

$$RSR = \frac{RMSE}{\sigma} \left[\frac{\sqrt{\sum_{t=1}^o (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^o (Q_{obs}(t) - Q_{mean}(t))^2}} \right] \quad (23)$$

O PBIAS avalia a tendência média das vazões simuladas, serem maiores ou menores do que a vazão observada sendo que, valores positivos indicam que o modelo tende a subestimar os resultados, enquanto valores negativos indicam que o modelo tende a superestimar (GUPTA et al., 1999). Seu valor ideal é zero, sendo que se o resultado for positivo, indica uma subestimação dos dados simulados, enquanto negativos, indica a superestimação das vazões simuladas. O PBIAS é calculado por:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{t=1}^o (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)) * (100)}{\sum_{t=1}^o (Q_{obs}(t))} \right] \quad (24)$$

A Tabela 2 mostra os índices estatísticos e respectivos valores de tolerância, utilizados no presente estudo.

Tabela 2 - Fluxograma das etapas da modelagem com o HEC-HMS.

| Avaliação | NSE | RSR | PBIAS (%) |
|------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Muito bom | $NSE > 0,75$ | $0,00 \leq RSR \leq 0,50$ | $PBIAS < \pm 10$ |
| Bom | $0,65 < NSE \leq 0,75$ | $0,50 < RSR \leq 0,60$ | $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ |
| Satisfatório | $0,50 < NSE \leq 0,65$ | $0,60 < RSR \leq 0,70$ | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ |
| Não satisfatório | $NSE \leq 0,50$ | $RSR > 0,70$ | $PBIAS > \pm 25$ |

Fonte: Moriasi et al. (2007).

Para a etapa de validação foi utilizado um outro evento referente ao período de 21/01/2020 a 26/01/2020. Limitou-se o ajuste do hidrograma a esses dois eventos, devido à disponibilidade de dados de todas as estações também optou-se por ajustar o modelo com eventos de maior magnitude medidos na estação fluviométrica para tentar reproduzir melhor o hidrograma de 2007.

3.3.6 Modelo HEC-RAS 2D

Para a avaliação da capacidade máxima de transporte de vazões em canais e geração das áreas inundadas no evento de 2007 foi realizada a modelagem hidrodinâmica bidimensional por meio de HEC-RAS 2D.

Desta maneira, a equação da onda difusa é expressa da seguinte forma (USACE, 2016):

$$g\nabla H = -c_f V \quad (25)$$

Assim, utilizando a equação de Manning para descrever o atrito do fundo do canal, a velocidade é calculada da seguinte forma:

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (26)$$

Sendo $R(H)$ o raio hidráulico na altura da elevação da superfície da água H (m), ∇ é operador diferencial, e o n é o coeficiente de atrito de Manning ($s.m^{-1/3}$).

A Equação 25 é a forma simplificada da Equação de Saint Venant para a análise bidimensional do escoamento. Essa equação possibilita a redução no tempo computacional e uma estabilidade maior do modelo (BETSHOLTZ; NORDLÖF, 2017), por essa razão foi utilizada no presente trabalho.

Na Tabela 3 apresenta os valores do coeficiente de Manning ajustados para as bacias Molha Coco e Malacara utilizando como base Chow (1959).

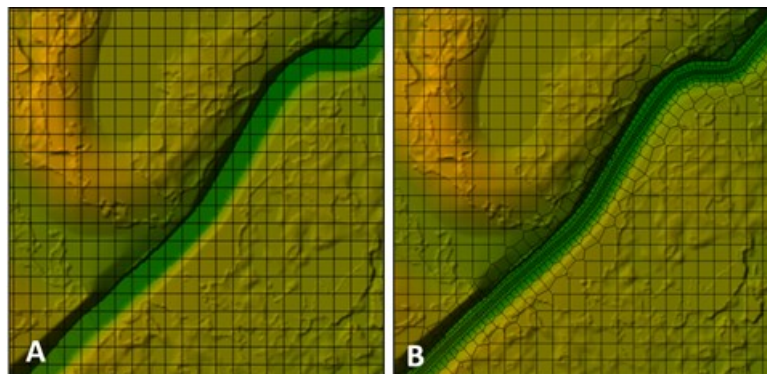
Tabela 3 - Valores do coeficiente de Manning para as bacias Molha Coco e Malacara.

| Descrição do local | Coeficiente de Manning |
|--|------------------------|
| Rios Molha Coco e Malacara (<i>Decl.* > 0,026 m.m⁻¹</i>) | 0,070 |
| Rios Molha Coco e Malacara (<i>Decl.* < 0,026 m.m⁻¹</i>) | 0,045 |
| Planície de inundação (exceto área urbana) | 0,040 |
| Área urbana | 0,030 |

Fonte: do autor.

As vazões máximas foram estimadas no HEC-HMS, pelo Hidrograma Unitário de Clark e propagadas no HEC-RAS 2D usando o MDE de 1,0 metro de resolução de pixel. Neste caso, considerou-se o evento de 2007, a fim de comparar com os dados de inundação levantados em campo. Para propagar os hidrogramas no HEC-RAS 2D utilizou-se uma malha computacional: (a) com resolução espacial de 10 m x 10 m na planície de inundação, (b) 5 m x 5 m na calha dos rios Molha Coco e Malacara dentro dos leques aluviais (Figura 11). O tamanho da malha correspondente a uma área de 32,00 km². A escolha dessa área teve por objetivo, verificar se o HEC-RAS 2D era capaz de representar as mudanças dos cursos dos canais que, normalmente, acontece em regiões de leques aluviais.

Figura 11 - Ilustração das resoluções da malha computacional utilizada nas bacias Molha Coco e Malacara.

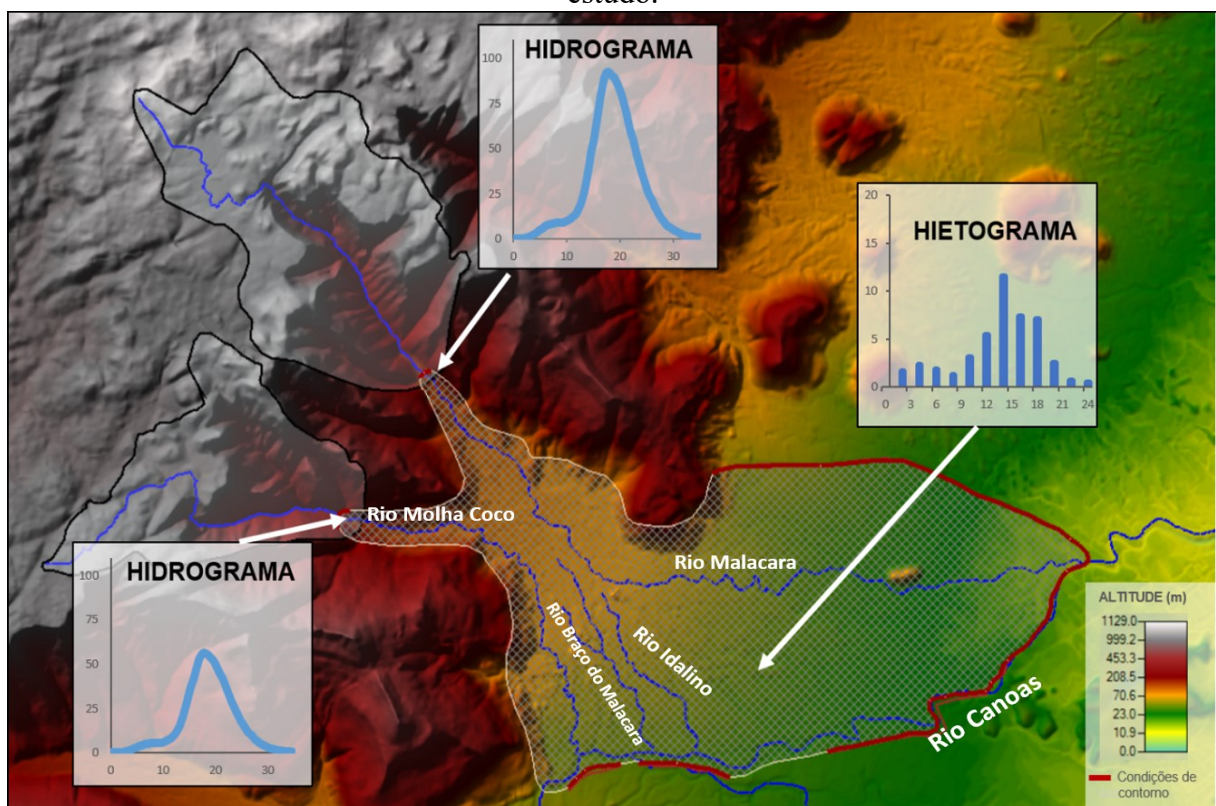


Fonte: do autor.

A Figura 12 mostra os locais de propagação dos hidrogramas nas bacias de estudo, utilizando como domínio a malha computacional, descrita no parágrafo anterior. Esses

hidrogramas foram propagados no ápice dos leques aluviais dos rios Molha Coco e Malacara. Visando melhorar a propagação da vazão, também utilizou-se a precipitação do 3º quartil de Huff (hietograma), na planície de inundação, considerando que a precipitação é homogênea em toda a área de estudo. Como condição de saída de água da malha computacional, foi adicionado a jusante, no exutório dos rios Molha Coco, Malacara, Idalino e Braço do Malacara, a profundidade normal, que trata-se de uma declividade utilizada pelo modelo para calcular a profundidade do fluxo utilizando a equação de Manning (USACE, 2016).

Figura 12 - Locais das entradas e saídas dos hidrogramas (ou vazões máximas) na área de estudo.



Fonte: do autor.

Os hidrogramas utilizados no modelo foram gerados para os seguintes períodos de retorno: 5, 10, 50 100 (evento de 2007) e 200 anos a partir dos parâmetros calibrados no HEC-HMS 4.3. Os hidrogramas obtidos no rio Malacara, no local onde está instalada a estação fluviométrica foi regionalizado para o ápice dos leques aluviais, usando o método de adimensionalização, uma vez que, as áreas são próximas e possuem características (climáticas e geomorfológicas) semelhantes, como mencionado no item 3.1. Para a saída do fluxo, foram utilizadas as profundidades normais citadas acima. Essas declividades foram determinadas

usando o MDE com resolução 1 m da SDS (2010) e adotadas para os trechos considerando os exutórios dos rios Molha Coco, Malacara, Idalino, Braço do Malacara e também na lateral do leque aluvial do rio Malacara. A Tabela 4 mostra os valores das profundidades normais adotadas nas simulações para cada local.

Tabela 4 - Condição de saída de para a propagação dos hidrogramas utilizando como domínio a malha computacional.

| Local | Declividade para a profundidade normal (m.m⁻¹) |
|-----------------------------------|--|
| Rio Molha Coco | 0,026 |
| Rio Malacara | 0,014 |
| Lateral do leque aluvial Malacara | 0,014 |
| Rio Idalino | 0,015 |
| Rio Braço do Malacara | 0,015 |

Fonte: do autor.

Para propagação da vazão (hidrogramas), utilizou-se o regime de escoamento “não permanente”, ou seja, aquele em que ocorre variação de vazão ao longo do tempo, com intervalo de tempo computacional de 20 s.

Para a verificar a precisão da área de inundação simulada pelo modelo HEC-RAS 2D, foram utilizados 27 pontos levantados em campo, comparando os pontos de borda com a distância até a área inundada e as profundidades da lamina d’água dos pontos no seu interior. Esses pontos foram coletados com GPS de navegação em diferentes locais inundados no evento de 2007. Desta forma, o ajuste da área de inundação simulada em relação aos pontos medidos em campo foi realizado alterando o coeficiente de Manning.

3.3.7 Descritor do terreno HAND

No presente trabalho, utilizou-se o descritor do terreno HAND desenvolvido por Rennó et al. (2008). O resultado gerado pelo descritor mostra que, quanto mais próximo do canal um local estiver, e quanto menor a variação altimétrica entre estes dois pontos, maior a suscetibilidade a inundações (GOERL et al., 2017). O HAND é um MDE modificado. O MDE considera a altitude, ou seja, a altura em relação ao nível dos mares. Já o HAND considera a altura em relação ao rio mais próximo.

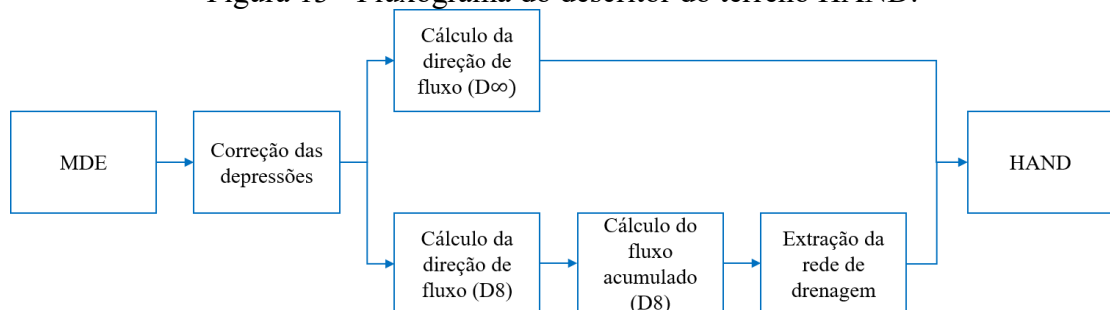
As áreas de inundação simuladas pelo HAND foram comparadas com o HEC-RAS 2D, já que o modelo foi calibrado com dados de campo nesse evento. O objetivo de utilizar o HAND é de verificar a capacidade de representar a área de inundação em região montanhosa, com a presença de leques aluviais. Para comparação utilizou-se o mapa de inundação simulado no HEC-RAS 2D para o evento de 2007. Logo, a área adotada para a simulação no HAND foi a mesma utilizada no HEC-RAS 2D.

A geração do MDE normalizado, HAND foi realizada usando o software Taudem (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), proposto por Tarboton (2016), integrado ao SIG ArcGIS 10.3.1.

Para gerar o HAND é necessário apenas o MDE como dado de entrada. Desta maneira é necessário que o MDE esteja hidrologicamente consistido para representar corretamente a direção do fluxo dos rios. Desta forma foi realizada uma correção do MDE para eliminar pixels com valores espúrios. Após a correção das depressões foi realizado o cálculo da direção de fluxo pelos métodos D8, proposto por O’Callaghan e Mark (1984) e D_{∞} por Tarboton (1997) que tem por objetivo representar o sentido do escoamento de um pixel. A partir da direção de fluxo, calculou-se o fluxo acumulado, que consiste em um somatório de pixels que drenam para o mesmo local, indicando os locais mais propensos a serem identificados como rio.

O MDE com representação do fluxo acumulado foi utilizado para a identificação da rede de drenagem. Neste processo, adotou-se uma área de contribuição de 0,08 km² para definir o local onde iniciam as nascentes. Para verificar se esse limiar estava correto, comparou-se visualmente por sobreposição no ArcGIS 10.3.1, a hidrografia obtida do MDE, com a hidrografia da base cartográfica (escala a 1:10000) da SDS (2010). O fluxograma apresentado na Figura 13 resume essas etapas para a obtenção do mapa de inundação simulado no HAND.

Figura 13 - Fluxograma do descritor do terreno HAND.



Fonte: do autor.

Com o resultado do HAND, utilizou-se os pontos de inundação coletados em campo, referentes ao limite da área inundada no evento de 2007, sendo a altura máxima adotada foi de

5m. A partir dessa classificação, foi realizado o cálculo da profundidade do fluxo (CARON et al., 2018), apresentado na Equação 27:

$$hf = hi - hn \quad (27)$$

Onde hf é a profundidade do fluxo (m), hi é o pixel HAND que corresponde ao alcance máximo da inundação (m) e hn é o valor de cada pixel do HAND.

3.3.8 Métricas para comparação dos modelos HAND e HEC-RAS 2D

Para avaliar o desempenho do modelo HAND foram utilizadas métricas que levam em consideração áreas de acerto, omissão e comissão.

Para fazer as análises considerou-se a área simulada pelo modelo HEC-RAS 2D como área de controle e a área do modelo HAND, como área simulada. O modelo HAND foi comparado com o HEC-RAS 2D com objetivo de verificar a capacidade do primeiro em representar a área de inundação em região montanhosa com a presença de leques aluviais, uma vez que, este modelo foi desenvolvido para representar inundações em planícies. Monte et al. (2019) ressaltam que, os dois modelos apresentam limitações, porém modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS que, além do MDE utilizam dados hidrológicos (chuva e vazão), fornecem resultados com maior precisão, desde que os dados de entrada sejam confiáveis. Também o HEC-RAS foi desenvolvido para propagar a onda de cheia, tanto em regiões de relevo acentuado, como em planície de inundação (USACE, 2016).

As áreas inundadas pelo HAND e pelo HEC-RAS 2D foram sobrepostas utilizando o software ArcGIS 10.3.1, sendo consideradas como áreas de acerto, àquelas que tiveram 100% de sobreposição (A_{CS}). Também foram determinadas áreas de omissão (A_O) e comissão (A_{COM}). Na avaliação, foram consideradas: (a) áreas de acerto (100% de sobreposição); (b) áreas de omissão (áreas que o HAND não inundou); (c) áreas de comissão (áreas inundadas pelo HAND e não pelo HEC-RAS 2D).

Os parâmetros estatísticos utilizados para comparar as áreas de inundação simuladas pelos dois modelos foram: (a) F estatístico (COOK e MERWADE, 2009); (b) Acurácia geral (YU e LANE, 2006); (c) Taxa de alarme falso (TAF) (STEPHENSON, 2000) e (d) índice Kappa (K) (MOREIRA, 2011).

O F estatístico considera apenas as áreas inundáveis compatíveis com os dois modelos, conforme Equação 28:

$$F (\%) = \frac{A_{cs}}{A_c + A_s - A_{cs}} 100 \quad (28)$$

Onde A_{cs} são as áreas de acerto; e A_c é a área de controle e A_s a área simulada. Os valores de F variam de 0 a 100, onde 100% representa a sobreposição perfeita entre as áreas simulada e observada.

A Acurácia Geral considera a relação entre a área de acerto simulada e a área total de controle, conforme Equação 29. Com valores que variam de zero a 100%, onde 100 representa a total sobreposição da área simulada com a área de controle (YU e LANE, 2006).

$$Acurácia\ Geral (\%) = \frac{A_{cs}}{A_c} 100 \quad (29)$$

A Taxa de Alarme Falso (TAF) tem por objetivo verificar os erros de comissão, ou seja, permite verificar se a área de acerto teve uma sobreposição perfeita entre as áreas simulada e de controle, ou se a simulação superestimou muito a área observada (STEPHENSON, 2000). Desta forma, quanto mais próximo de zero, melhor será o desempenho do modelo. A Equação 30 apresenta o cálculo do parâmetro TAF:

$$TAF (\%) = \frac{A_s - A_{cs}}{A_s} 100 \quad (30)$$

O índice Kappa tem por objetivo verificar o grau de concordância entre as áreas de controle e observada. Esse índice é calculado a partir da construção de uma matriz de erro, onde é realizada a combinação das áreas. O índice Kappa varia de zero a 1, sendo 1 correspondente à concordância total (MOREIRA, 2011). O índice Kappa é expresso por (Equação 31 e 32):

$$K = \frac{Po - Pc}{1 - Pc} \quad (31)$$

$$Pc = \frac{\sum_{i=1}^m nx_{i+} nx_{+j}}{N_t^2} \quad (32)$$

Sendo Po a exatidão geral; Pc a proporção de unidades que concordam por casualidade; m , o número de classes presentes na matriz de erro; nx número de observações na linha i e coluna j ; nx_{i+} e nx_{+j} , os totais marginais da linha i e da coluna j , respectivamente; e N_t ,

o número total de unidades amostrais contempladas pela matriz. A Tabela 5 mostra a qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa.

| Valor de Kappa | Classificação |
|----------------|---------------|
| < 0,00 | Péssima |
| 0,00 – 0,20 | Ruim |
| 0,20 – 0,40 | Razoável |
| 0,40 – 0,60 | Boa |
| 0,60 – 0,80 | Muito boa |
| 0,80 – 1,00 | Excelente |

Fonte: Adaptado de Moreira (2011).

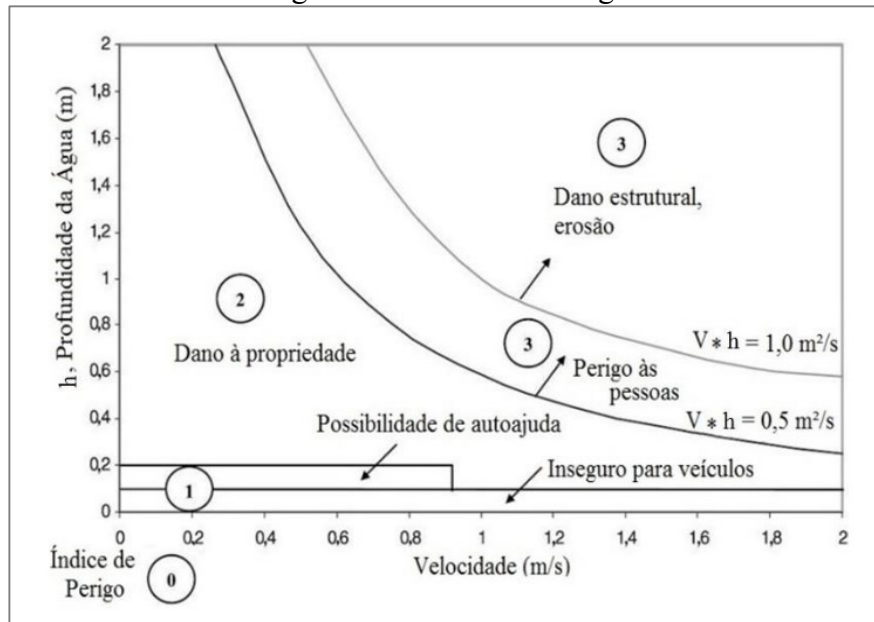
3.3.9 Mapeamento de perigo de inundação

Para a geração do mapa de perigo de inundação para diferentes períodos de retorno, foi utilizado a metodologia de Stephenson (2002). Essa metodologia calcula o Índice de Perigo (IP) através da combinação da altura da lâmina de água e a velocidade do fluido em um determinado ponto da área inundada, como apresentado na Equação 33:

$$IP = h \cdot v \quad (33)$$

Onde, h é a profundidade (m) e v é a velocidade ($m.s^{-1}$). Desta maneira, o IP está diretamente relacionado a energia do escoamento, logo, ao seu potencial destrutivo (MONTEIRO e KOBAYAMA, 2013). Desta maneira a Figura 14 mostra o índice de perigo relacionado a profundidade e velocidade do fluxo.

Figura 14 – Índice de Perigo



Fonte: Adaptado de Stephenson (2002).

O mapa de perigo foi obtido multiplicando os mapas de velocidade e profundidade do fluxo obtidos no HEC-RAS 2D, utilizando a ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS 10.3.1, para os períodos de retorno de 5, 10, 50, 100 e 200 anos. Esse mapa foi categorizado utilizando as classes de perigo propostas por Loat e Petrascheck (1997). Na Tabela 6, são apresentados os perigos associados para cada grau de perigo.

Tabela 6 – Descrição dos diferentes níveis de perigo

| Grau de Perigo | Cor de referência | Descrição |
|----------------|-------------------|---|
| Alto | Vermelho | As pessoas estão em perigo dentro e fora de suas casas, pois as construções podem ser destruídas repentinamente. |
| Médio | Amarelo | As pessoas estão em perigo fora de suas casas. As construções também podem sofrer danos. |
| Baixo | Azul | Seguro para adultos, mas para crianças e veículos podem ser perigosos. Podem ocorrer pequenas perdas no interior das construções. |

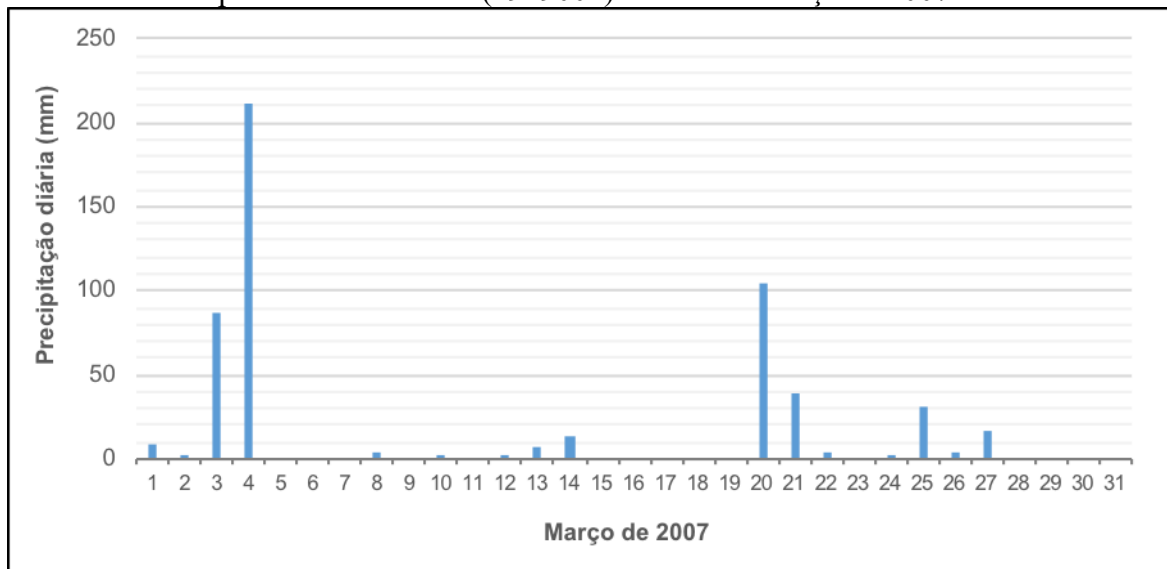
Fonte: Adaptado de Loat e Petrascheck (1997).

4 RESULTADOS

4.1 ÁREAS INUNDADAS NO EVENTO DE 2007 COM BASE NOS REGISTROS HISTÓRICOS

Em Praia Grande, no extremo sul de Santa Catarina, como descrito no item 2.1, o evento de 2007 foi caracterizado por precipitações intensas com início às 16h00 do dia 03/03/2007 e término às 3h00 do dia 04/03/2007, totalizando 211 mm. O evento iniciado no dia anterior, com um total acumulado de 86 mm somado aos 211 mm, totalizou 297 mm em 24 horas. Essa chuva, corresponde a um período de retorno de 100 anos, definido pela Equação IDF de Praia Grande (Equação 13). O gráfico da Figura 15 mostra a chuva acumulada para este período, e foi elaborado com os dados de chuva da estação ANA (2949001), localizada no centro da cidade (Figura 5).

Figura 15 - Chuva acumulada determinada com base na série histórica da estação pluviométrica ANA (2949001) do mês de março de 2007.



Fonte: do autor.

A Figura 16-A mostra os 27 pontos inundados no evento de 2007, que foram mapeados com GPS de navegação com base nos dados históricos da prefeitura de Praia Grande e nos relatos obtidos das entrevistas realizadas com a comunidade local. Sendo que dos 27 pontos, 19 estão localizados na borda da área inundada e 8 estão situados no interior. Também as Figuras 16-B a 16-G, mostram as fotografias dos locais atingidos nesse mesmo evento, que também

foram disponibilizadas pela prefeitura de Praia Grande. As Figuras 16-B e 16-C mostram as casas invadidas pela água, durante o extravasamento no rio Molha Coco. A Figura 16-D mostra a estrada de terra de acesso a uma propriedade rural (cota altimétrica de 69,6 m) que acompanha a margem direita do rio Malacara (cota altimétrica do talvegue de 67,9 m), próximo do local onde está instalada a estação fluviométrica UFSC/UFRGS (Figura 4). A Figura 16-E mostra uma casa que foi arrastada e fica aproximadamente 120 m das margens do rio Malacara. A Figura 16-F mostra a casa arrastada no centro da cidade. Já a Figura 16-F é possível ver as marcas na parede até onde o nível d'água chegou. Esse local fica no centro da cidade, onde o rio Molha Coco deságua no rio Mampituba.

Figura 16 - Pontos de inundação de 2007.

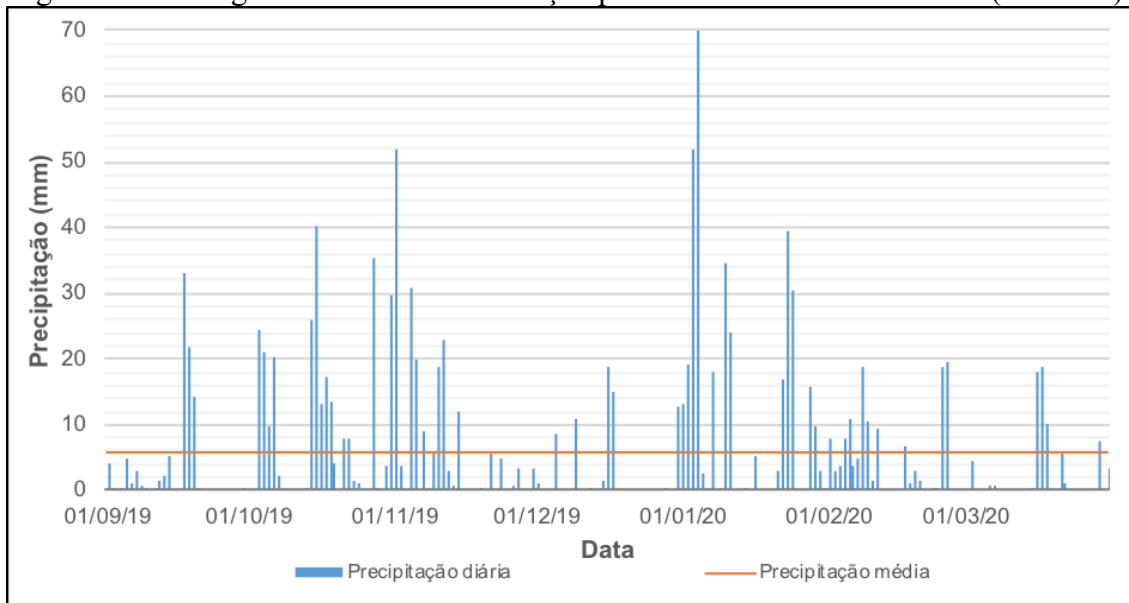


Fonte: Prefeitura Municipal de Praia Grande, SC (2007).

4.2 VAZÃO OBSERVADA NO RIO MALACARA

A Figura 18 apresenta a série histórica da variação do nível do rio Malacara, obtida da estação fluviométrica (sensor de nível) no período 05/09/2019 a 13/03/2020. Os pontos em vermelho mostram o valor de vazão medida com molinete hidrométrico e flutuador, onde verifica-se que, para o período analisado, a vazão mínima medida foi de $0,39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a máxima de $11,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Também observa-se que, os níveis mínimos e máximos (linha azul) registrados nesse período pelo sensor de nível foram de 0,34 m e 1,37 m, respectivamente. Ressalta-se que, nesse período não houve extravasamento da calha do rio Malacara. Esse fenômeno também pode ser observado no gráfico da Figura 17, que mostra a chuva diária medida na estação pluviométrica do CEMADEN (2949013), no período de 01/09/2019 a 01/03/2020. Verifica-se que a chuva média para o período foi de 5,6 mm, sendo a máxima acumulada de 69,8 mm medida no dia 04/01/2020.

Figura 17 - Hietograma observado na estação pluviométrica do CEMADEN (2949013).



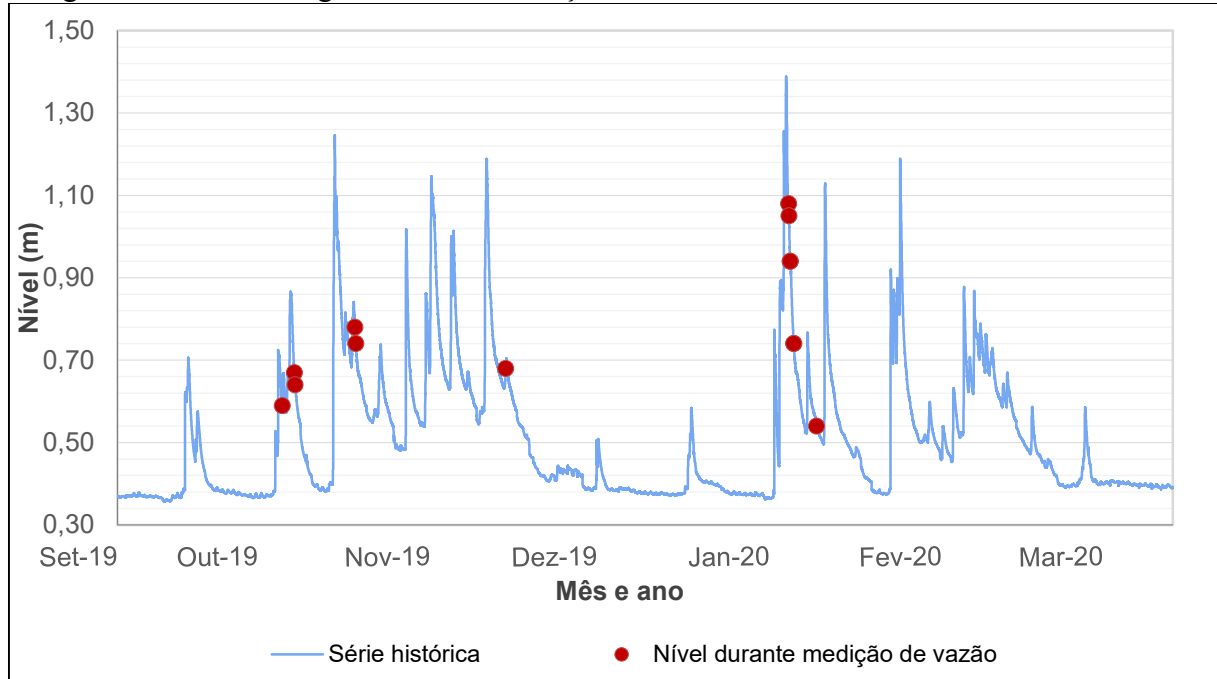
Fonte: do autor.

Na Figura 18 verifica-se ao longo da série histórica observada que o nível do rio Malacara sobe rapidamente em um curto intervalo de tempo, este fenômeno assemelha-se a cabeça d'água. Segundo Collischonn e Kobiyama (2019), a cabeça d'água ocorre devido ao aumento da vazão de forma instantânea, onde é possível observar a chegada de uma onda de cheia descontínua da vazão e do nível da água. O evento de cabeça d'água foi verificado nos

dados medidos nos dias 17/09/2019, 04/10/2019, 27/10/2019, 01/01/2020 e 02/01/2020, em que o nível aumentou, num intervalo de 10 min de: 0,38 para 0,58 m; de 0,50 para 0,69 m; de 0,61 para 0,92 m; de 0,38 para 0,77 m; de 0,45 para 0,69 m, respectivamente.

A Figura 18 apresenta a série histórica da variação do comportamento do nível do rio Malacara entre o período de 05/09 a 13/03/2020.

Figura 18 - Nível de água medido na estação fluviométrica do rio Malacara, Praia Grande.



Fonte: do autor.

A Figura 20 mostra as vazões medidas e calculadas para a determinação da curva-chave da seção de controle do rio Malacara, em Praia Grande (SC). Para determinação da curva-chave foram realizadas 12 medições de vazão, sendo 8 com molinete hidrométrico, 4 com um objeto flutuante, e 6 estimadas pelo método de Manning. Com molinete hidrométrico a vazão máxima obtida foi de $6,73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Já as vazões mais altas (Figura 19), determinadas com flutuador e Manning foram de $11,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $40,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.

Entretanto, mesmo aplicando três métodos diferentes para determinar a vazão, verifica-se no gráfico que houve uma boa correlação entre os dados, confirmada por R^2 de 0,9772. Entretanto, ressalta-se que, devido à falta de equipamentos mais robustos para medir altas vazões com segurança, a coleta das amostras ficou prejudicada. Com isso, a faixa de variabilidade das medições de vazão não representa adequadamente as vazões máximas do

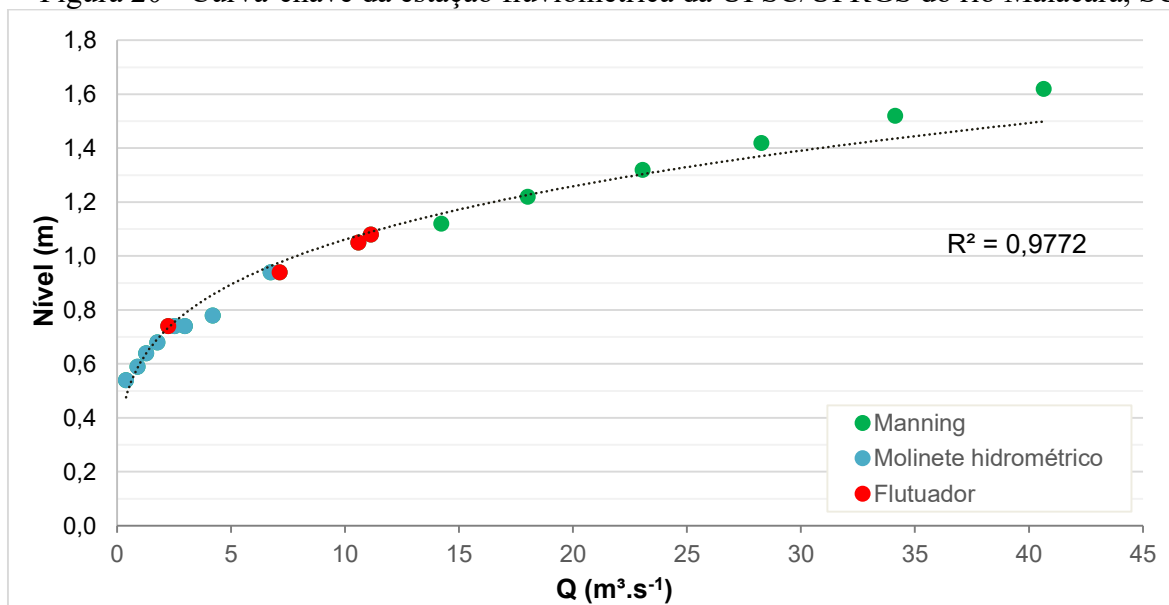
evento de 2007, objeto de análise do presente trabalho. Manfreda et al. (2020) explicaram que, diante destas limitações, a curva-chave pode até apresentar um bom ajuste da vazão, porém não fornece bons resultados para eventos de grandes magnitudes, devido ao número reduzido de medições de vazões mais altas.

Figura 19 – Vazões elevadas nos rios (a) Molha Coco e (b) Malacara.



Fonte: do autor.

Figura 20 - Curva-chave da estação fluviométrica da UFSC/UFRGS do rio Malacara, SC.



Fonte: do autor.

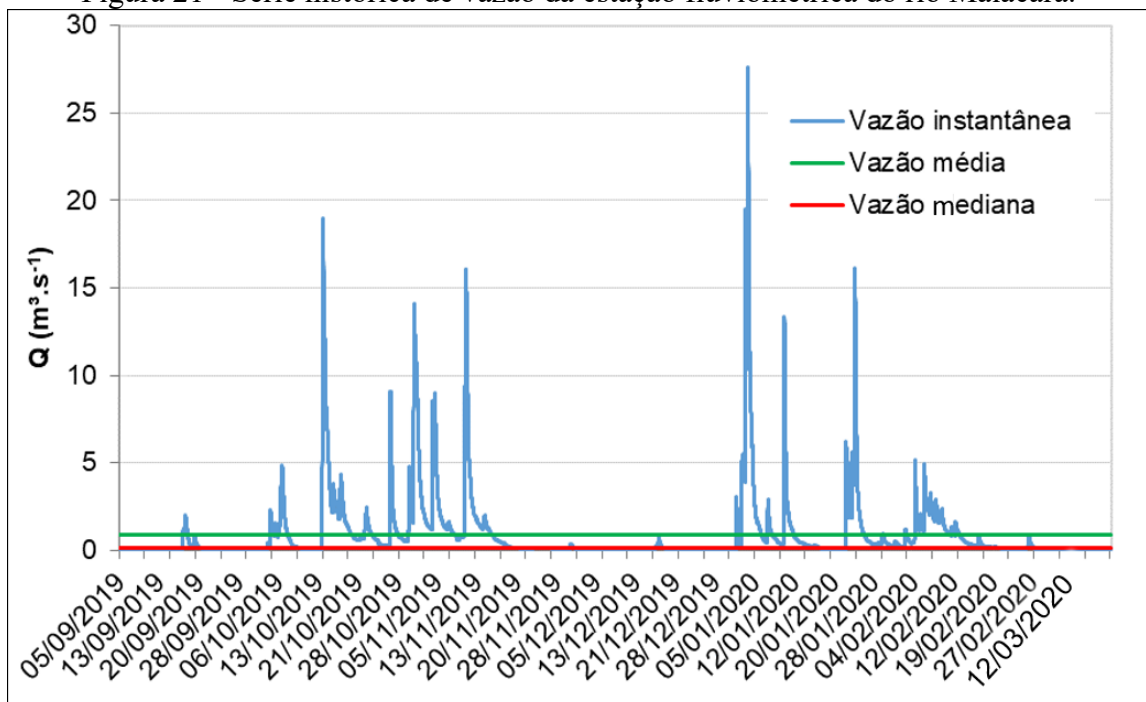
Assim, esses fatores são fontes de incertezas do presente trabalho, portanto, recomenda-se para trabalhos futuros que sejam realizadas um número maior de medições de

altas vazões, visando substituir aquelas calculadas por Manning, e com isso, melhorar o ajuste da curva-chave para vazões máximas.

A Figura 21 mostra as vazões calculadas pela equação da curva-chave para o período de 05/09/2019 a 13/03/2020. A maior vazão observada foi de $27,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Neste período, aconteceram apenas três eventos com vazão de pico acima de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, sendo que, em a vazão média encontrada foi de $0,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (linha verde) e a mediana (linha vermelha) foi de $0,14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Através da mediana é possível observar que em 50% do período as vazões eram muito baixas. Observa-se também que, os picos de vazões são mais acentuados em relação às vazões de base que, logo após a recessão, toda a água é escoada rapidamente.

Cupak et al. (2017) verificaram que, em 95% do tempo as vazões em bacias montanhosas são baixas (variando de $0,003$ a $0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Além da resposta rápida das vazões, da região deste estudo também passou por um período de estiagem, reduzindo em quantidade e a magnitude dos eventos. Condições semelhante às do presente trabalho.

Figura 21 - Série histórica de vazão da estação fluviométrica do rio Malacara.



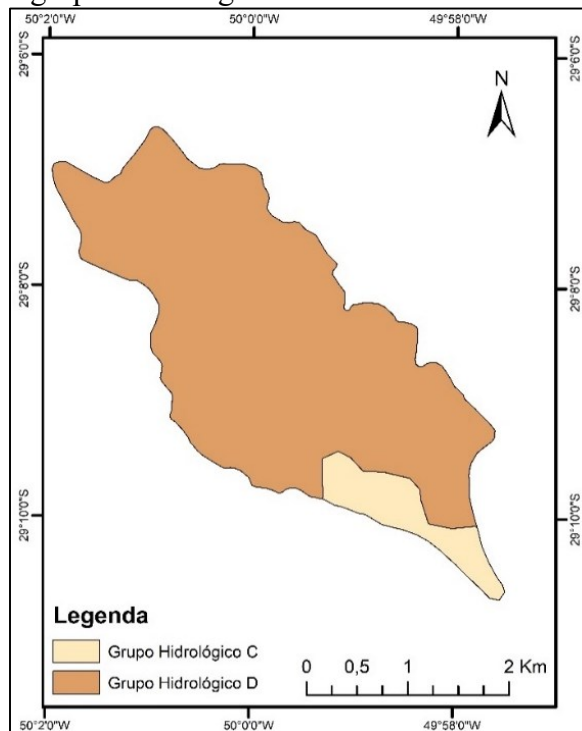
Fonte: do autor.

4.3 VAZÃO SIMULADA COM HEC-HMS

Na simulação das vazões usando o modelo hidrológico HEC-HMS considerou-se como área de contribuição a bacia do rio Malacara, com o exutório no local da seção de medição de vazão próximo onde está estação fluviométrica UFSC/UFRGS. Assim, as características físicas utilizadas para o cálculo do CN e demais parâmetros utilizaram a área da bacia do rio Malacara.

Nas Figuras 22, 23 e 24 constam os mapas dos grupos hidrológicos do solo, do uso e ocupação do solo e de escoamento superficial (CN) da bacia do rio Malacara, utilizados para o cálculo da chuva de projeto (vazão máxima).

Figura 22 - Mapa dos grupos hidrológicos da bacia do rio Malacara, Praia Grande, SC.



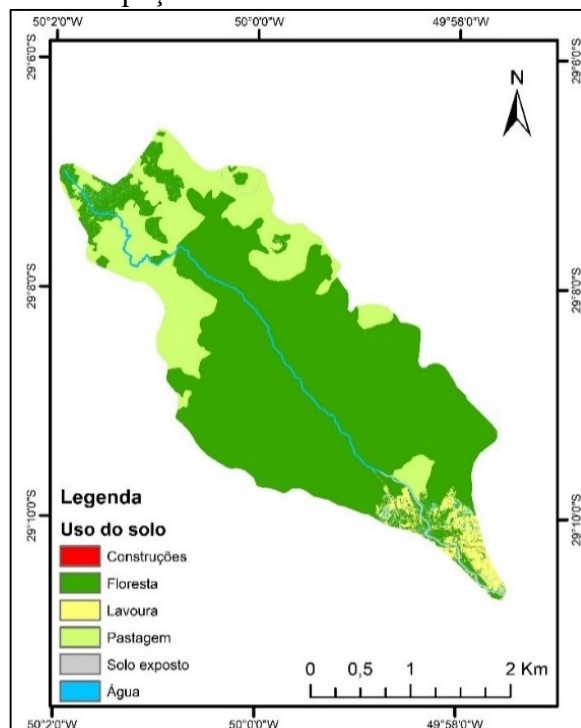
Fonte: do autor.

Na Figura 22 verifica-se que, o grupo hidrológico predominante na bacia é o D (90% da área total), seguido do grupo C (10%). Os solos do grupo D, de acordo com Sartori et al. (2005), apresentam permeabilidade lenta, textura arenosa e argilosa, com camada restritiva forte e moderada, profundidade menor ou igual a 50 cm, taxa de infiltração muito baixa, com pouca resistência e tolerância à erosão. Já no grupo hidrológico C os solos apresentam uma permeabilidade moderada a lenta, são arenosos e bastante intemperizados, com profundidades

entre 50 e 100 cm, podendo apresentar mudança textural abrupta. Desta forma, verifica-se que na bacia a condição de permeabilidade é predominantemente lenta, ou seja, o escoamento superficial tende a ser mais rápido.

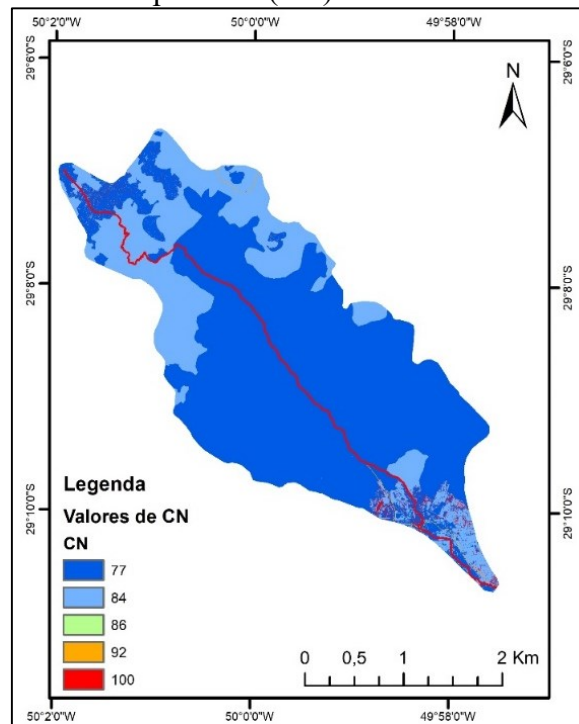
Na bacia do rio Malacara predominam remanescentes da Mata Atlântica (71%), seguida de pastagens (22,8%) e plantios agrícolas de subsistência (3,6%), conforme mostra a Figura 23. Já na Figura 24 consta o mapa de CN, obtido a partir da combinação entre os grupos hidrológicos com o de uso e ocupação do solo da bacia. Observa-se que o valor do número de CN varia de 77 a 100 que, de acordo com Sartori et al. (2005), para as condições de CN II esses solos são medianamente permeáveis e impermeáveis, respectivamente. O valor médio de CN II obtido (Equação 14) foi de 79,04, que indica que a bacia do rio Malacara apresenta uma baixa permeabilidade e, conseqüentemente, maior capacidade de escoamento superficial.

Figura 23 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do rio Malacara, Praia Grande, SC.



Fonte: do autor.

Figura 24 - Mapa de escoamento superficial (CN) da bacia do rio Malacara, Praia Grande, SC.



Fonte: do autor.

A Tabela 7 mostra os parâmetros iniciais calculados para a bacia do rio Malacara, conforme métodos descritos no item 3.3.5 os quais foram utilizados na simulação do processo chuva-vazão na etapa de calibração do modelo HEC-HMS.

Tabela 7 - Parâmetros iniciais para a etapa de calibração no modelo HEC-HMS.

| Parâmetro Inicial | Valor | Unidade |
|--|-------|---------------------------------|
| Área da bacia do rio Malacara (A) | 22,61 | km ² |
| Declividade média do rio principal (Decl.) | 0,08 | m.m ⁻¹ |
| Comprimento do rio principal (L) | 12,03 | km |
| Tempo de concentração (tc) | 2 | h |
| CN II | 79,04 | - |
| Abstração inicial (Ia) | 5 | % |
| Coeficiente de armazenamento (K) | 2,38 | - |
| Vazão de base | 0,1 | m ³ .s ⁻¹ |

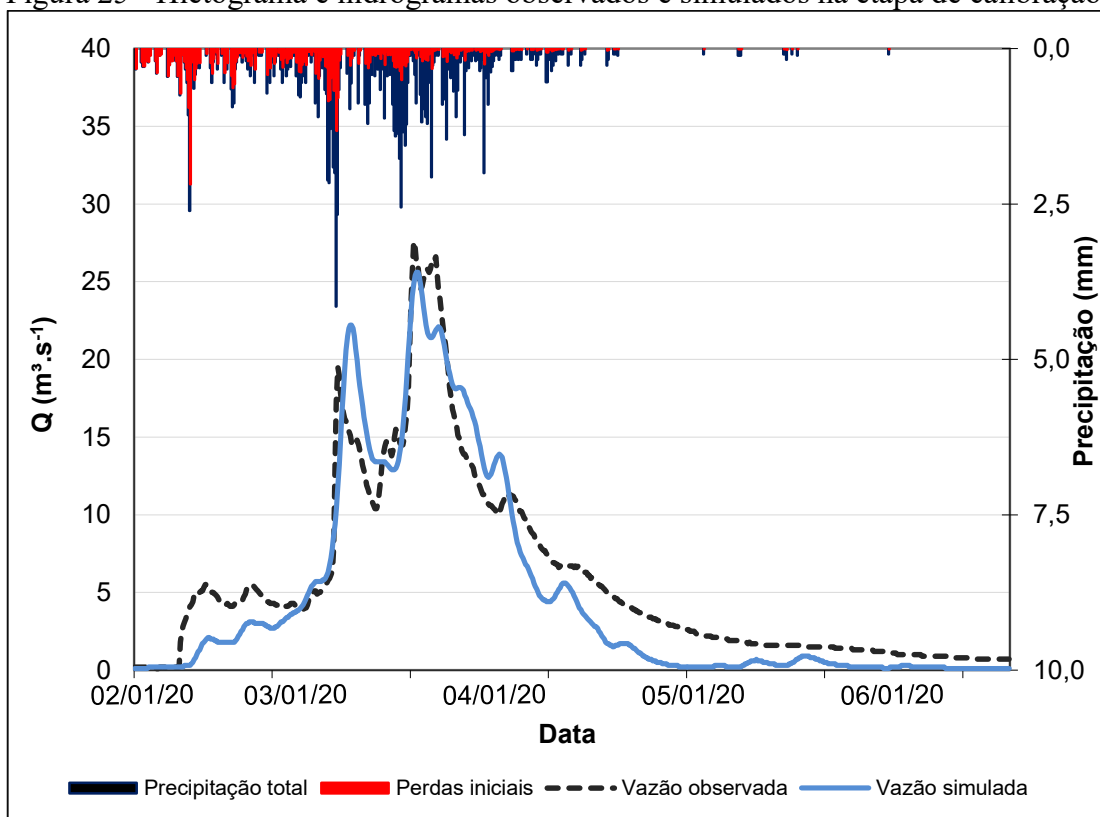
Fonte: do autor.

O método SCS-CN estabelece que as perdas iniciais correspondam a 20% do valor de CN (USDA, 1985). Entretanto, diversos estudos têm sido realizados para contornar esse

problema, dentre os quais um deles realizado em 39 bacias montanhosas florestais por Ajmal et al. (2016) mostrou que, ao adicionar a declividade no cálculo do CN e reduzir a abstração inicial para 1%, os resultados obtidos foram satisfatórios, confirmados por um NSE de 0,87. Também Walega et al. (2020) utilizaram 5% de abstração inicial (0,05.S) e obtiveram bons resultados, evidenciados por um NSE de 0,63, para um estudo com 3 bacias florestais, sendo uma delas montanhosas. Assim, para o presente trabalho adotou-se um valor de 5% para as perdas iniciais, porque a bacia do rio Malacara caracteriza-se por ser uma região montanhosa com predomínio de florestas.

Na calibração utilizou-se o evento de maior duração ocorrido no período de 02 a 06/01/2020, que corresponde às maiores vazões determinadas com base nas medidas do sensor de nível na estação do rio Malacara, cuja a vazão de pico foi de $27,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a precipitação acumulada no período foi de 119 mm. A Figura 25 apresenta o hietograma e os hidrogramas, observado e simulado pelo HEC-HMS após a calibração do modelo, com dados discretizados em intervalos de 10 min para um período de 5 dias.

Figura 25 - Hietograma e hidrogramas observados e simulados na etapa de calibração.



Fonte: do autor.

No evento analisado (Figura 25) o maior pico do hidrograma simulado ($25,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) está subestimado em 7,25% em relação ao pico do hidrograma observado ($27,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), mostrando que o modelo conseguiu ajustar bem a vazão máxima, sendo está a vazão que determinará a extensão máxima da área de inundação. No hidrograma simulado houve um atraso de 20 minutos na vazão de pico em relação ao hidrograma observado. Já às vazões mínimas simuladas foram subestimadas durante todo tempo analisado em relação às vazões medidas. Ainda, verificou-se uma diferença de 19,5% entre o volume total escoado medido na estação ($2170,7 \text{ m}^3$) e o simulado ($1746,0 \text{ m}^3$), o qual parte pode estar na vazão de base estabelecida. Esta diferença pode estar associada ao CN e ao índice de abstração inicial (Ia) da bacia de estudo, pois esses parâmetros foram calculados e não foram medidos em campo.

A Tabela 8 mostra a diferença entre os parâmetros utilizados na etapa de calibração do modelo HEC-HMS.

Tabela 8 - Parâmetros de calibração usados no modelo HEC-HMS.

| Parâmetros | Valores iniciais | Valores calibrados | Diferença (%) |
|------------|------------------|--------------------|---------------|
| tc | 2,00 | 1,82 | -9,00 |
| CN II | 79,04 | 80,03 | 1,25 |
| Ia | 3,95 | 4,18 | 5,83 |
| K | 2,38 | 2,61 | 9,66 |

Fonte: do autor.

Na etapa de calibração do modelo HEC-HMS os parâmetros mais sensíveis foram a CN e o Ia. Abushandi e Merkel (2013), que utilizaram o HEC-HMS para transformar chuva em vazão em uma bacia montanhosa na Jordânia, onde o CN e o Ia também foram os parâmetros mais sensíveis na etapa de calibração. Um estudo realizado por HDEIB et al. (2018) constatou que, o CN afeta diretamente os resultados da simulação; o Ia é o parâmetro que afeta diretamente o volume escoado e o pico do escoamento e a porcentagem de área impermeável interfere diretamente no volume escoado e o CN.

Adicionalmente, verifica-se na Tabela 8 que os parâmetros calibrados não apresentaram diferenças maiores do que 10%, em relação aos valores iniciais. Isso mostra que, os parâmetros iniciais adotados na simulação chuva-vazão no modelo HEC-HMS foram adequados para a região da bacia do Malacara.

A Tabela 9 mostra os indicadores estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo HEC-HMS na etapa de calibração.

Tabela 9 - Indicadores estatísticos do desempenho do modelo HEC-HMS.

| Indicador | Valor | Classificação Moriasi et al. (2007) |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| NSE | 0,87 | Muito bom |
| RSR | 0,4 | Muito bom |
| PBIAS (%) | -17,27 | Satisfatório |

Fonte: do autor.

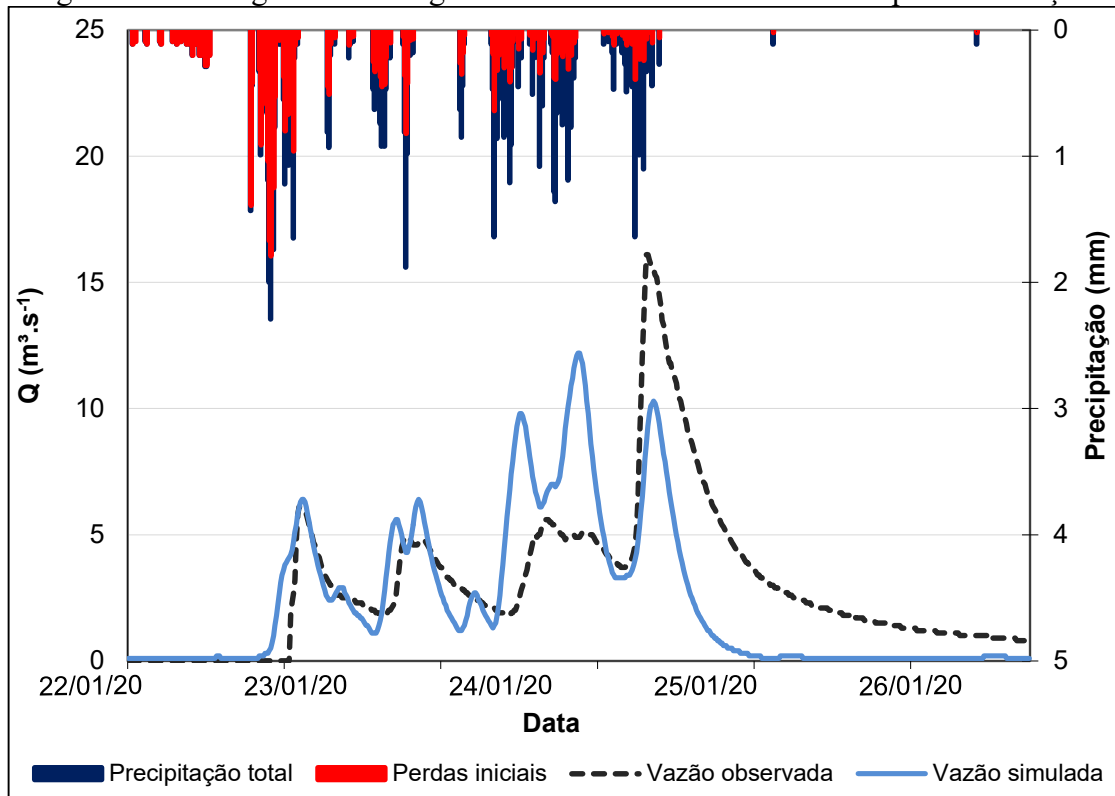
Analisando os indicadores na Tabela 9 verifica-se que, no geral o modelo apresentou um bom desempenho na simulação das vazões.

O valor de NSE de 0,87 mostra que o modelo teve um desempenho “muito bom” para representar as vazões máximas, ou seja, reflete que o modelo conseguiu aproximar o pico do hidrograma simulado ao pico do hidrograma observado.

Enquanto o valor de PBIAS indica que as vazões simuladas superestimam em 17,27% as vazões medidas. Já um RSR de 0,4, também mostra que o desempenho do modelo na calibração foi “muito bom”.

Na etapa de validação foi utilizado um evento de menor magnitude, sendo a precipitação acumulada de 75,8 mm, medida no período de 21 a 26 de janeiro de 2020. A Figura 26 mostra o hietograma e os hidrogramas simulados e observados para esse período. Observa-se que o hidrograma simulado está representado na distribuição temporal da vazão, coincidindo os picos com o hidrograma observado, porém há diferenças na magnitude dos picos do hidrograma simulado em relação ao observado. Sendo que, a vazão máxima observada no dia 24/01/2020 foi de $16,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e a simulada foi de $10,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, apresentando uma diferença de 36,6 %. Neste caso, o desempenho do modelo HEC-HMS “não foi satisfatório”, isso pode ser atribuído aos erros relacionados à curva-chave e a quantidade insuficiente dos dados medidos de vazão, onde foi medido apenas 3 eventos. A Tabela 10 mostra os resultados dos indicadores na etapa de validação.

Figura 26 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da etapa de validação.



Fonte: do autor.

Tabela 10 - Indicadores estatísticos do desempenho do modelo HEC-HMS na etapa de validação.

| Indicador | Valor | Classificação Moriasi et al. (2007) |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| NSE | 0,36 | Não satisfatório |
| RSR | 0,8 | Não satisfatório |
| PBIAS (%) | -24,87 | Satisfatório |

Fonte: do autor.

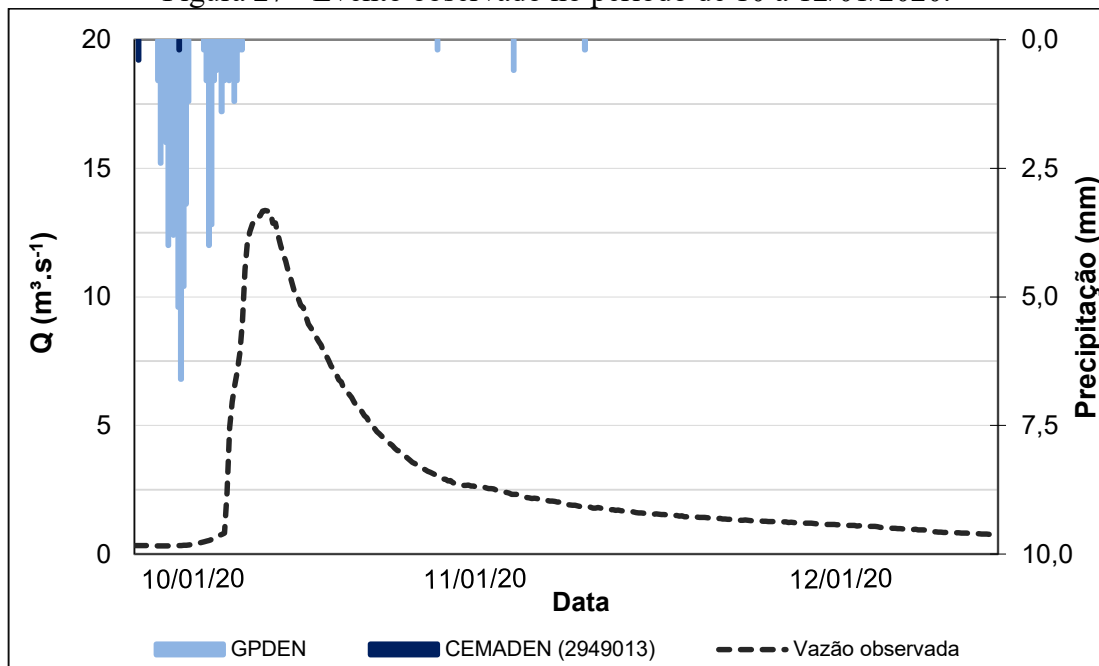
Os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 10 mostram que o modelo HEC-HMS não foi validado para a bacia do rio Malacara. Neste caso, vários fatores influenciaram os resultados da validação, entre os quais destaca-se a diferença na magnitude dos eventos utilizados na calibração e validação do modelo. Apesar de terem durações parecidas, as vazão de pico do evento utilizado na validação foi 42% inferior, comparada ao evento utilizado na etapa de calibração. Além disso, neste período, não ocorreram eventos de grande magnitude, que possibilitasse gerar uma nova série de dados para serem utilizados na validação do modelo, como comentado no item 4.2.

Além disso ressalta-se que, na região das bacias deste estudo, predominam chuvas orográficas. As chuvas orográficas apresentam intensidade variável e grande duração, abrangendo áreas relativamente pequenas e caracterizam-se por serem frequentes. Back e Poletto (2018) destacam que, os eventos de chuvas orográficas estão relacionados com inundações, enchentes e deslizamentos de encosta no litoral das regiões Sul e Sudeste do Brasil.

A variabilidade espacial da precipitação é comum em regiões montanhosas. Os estudos realizados por Destro et al. (2018) e Nikolopoulos et al. (2011) encontraram variabilidade espacial das precipitações num raio de 10 km e 8 km, respectivamente em região montanhosa. Gregoretto et al. (2016) monitoraram uma bacia montanhosa com uma área de 0,032 km², e também constataram variação na distribuição da precipitação, com estações pluviométricas distantes a 500 m.

As estações pluviométricas presentes na área de estudo estão localizadas a uma distância de 9 km uma da outra e 6 km de distância da bacia do rio Malacara. Assim, a Figura 27 mostra o evento ocorrido nos dias 10 a 12/01/2020, onde choveu somente na região no topo dos Aparados da Serra em Cambará do Sul (RS), onde está localizada a estação meteorológica do GPDEN (altitude 917 m), e não choveu na estação pluviométrica do CEMADEN (2949013) (altitude 492 m), tornando complexa a identificação precisa do volume precipitado para a validação dos modelos.

Figura 27 - Evento observado no período de 10 a 12/01/2020.

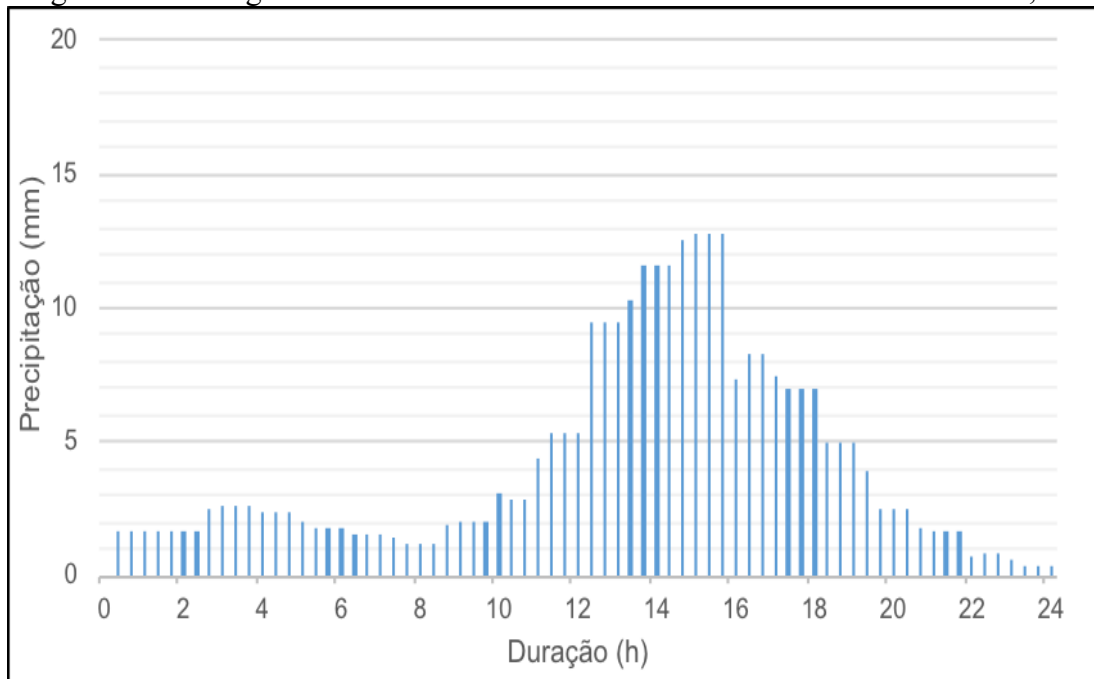


Fonte: do autor.

4.4 VAZÃO MÁXIMA

A Figura 28 mostra a precipitação acumulada entre os dias 3 e 4 de março de 2007, totalizando 297 mm, a qual foi utilizada para estimar a vazão máxima após esse evento catastrófico. Ressalta-se que, como os dados da estação de Praia Grande (ANA 2949001) são diários, estimou-se o evento com uma duração total de 24 h, discretizado em intervalos de 20 min utilizando o 3º quartil de Huff, em que, o maior volume de chuva ocorre a 75% da duração da precipitação e, de acordo com Huff (1967), essas chuvas são mais intensas e tem duração moderada (12-24 horas). Além disso, essas chuvas tendem a gerar maior escoamento superficial, uma vez que, o solo já se encontra saturado (ABREU et al., 2016).

Figura 28 - Hietograma referente ao evento de 2007 ocorrido em Praia Grande, SC



Fonte: do autor.

O evento de 2007 calculado com a Equação IDF (Equação 13) corresponde ao período de retorno de 100 anos. Essa equação também foi utilizada para calcular as intensidades e posteriormente a precipitação dos períodos de retorno (TR) de 5, 10, 50 e 200 anos. Na Tabela 11 é possível verificar que a intensidade da chuva dobra de 5 anos para 200 anos de período de retorno.

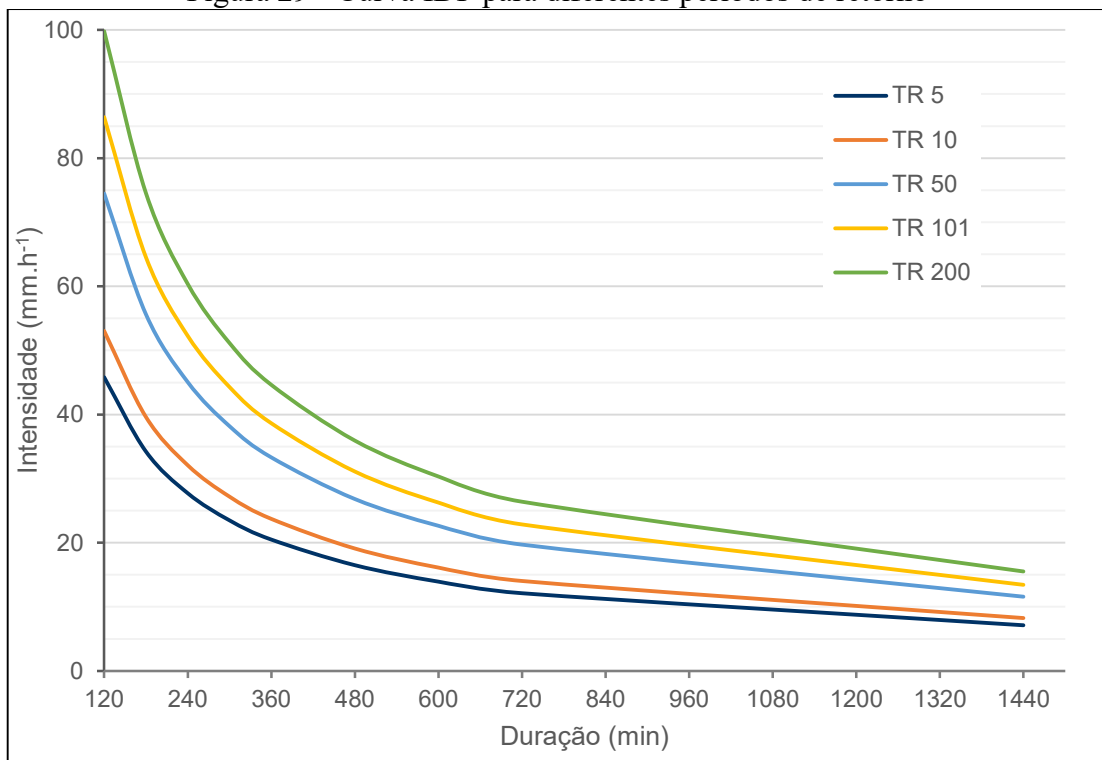
Tabela 11 - Intensidade da chuva para diferentes períodos de retorno

| Período de retorno (anos) | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 |
|--|------|------|-------|-------|-------|
| Intensidade da chuva (mm.h ⁻¹) | 7,13 | 8,25 | 11,58 | 12,38 | 15,52 |

Fonte: do autor.

Na Figura 29 é possível observar as curvas IDF para geradas para a região de Praia Grande, para os diferentes períodos de retorno. Nota-se que, para durações de até 2 h a intensidade da chuva é muito maior em relação à durações de até 24 h, como é o caso do evento de 2007. Ainda, as curvas apresentaram boa correlação, verificada pelo valor de R^2 de 0,94.

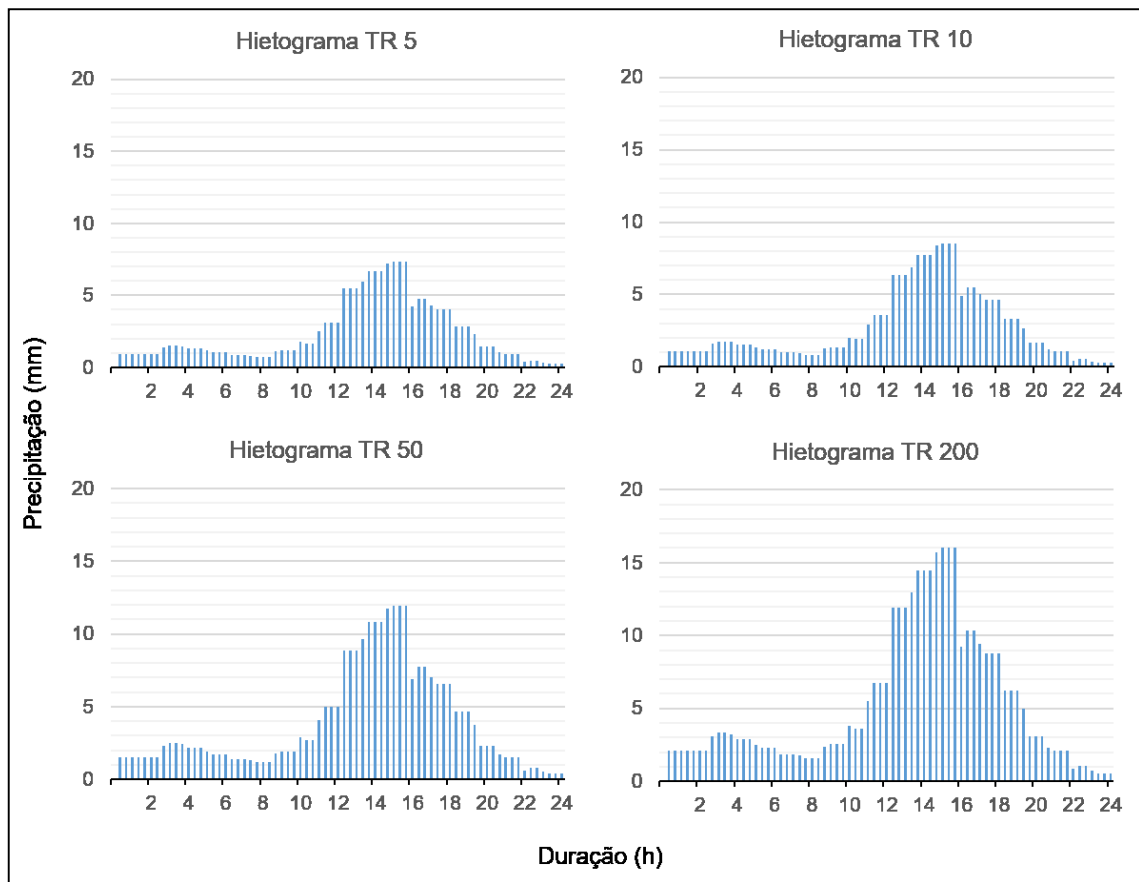
Figura 29 - Curva IDF para diferentes períodos de retorno



Fonte: do autor.

Com as intensidades foi calculada a precipitação total com duração de 24 h para os períodos de retorno, obtendo-se desta forma valores de 171,01 mm (TR=5), 197,94 mm (TR=10), 277,98 mm (TR=50) e 372,43 mm (TR=200). Os hietogramas para cada período de retorno estão apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Hietogramas de projeto para diferentes períodos de retorno para região de Praia Grande, SC

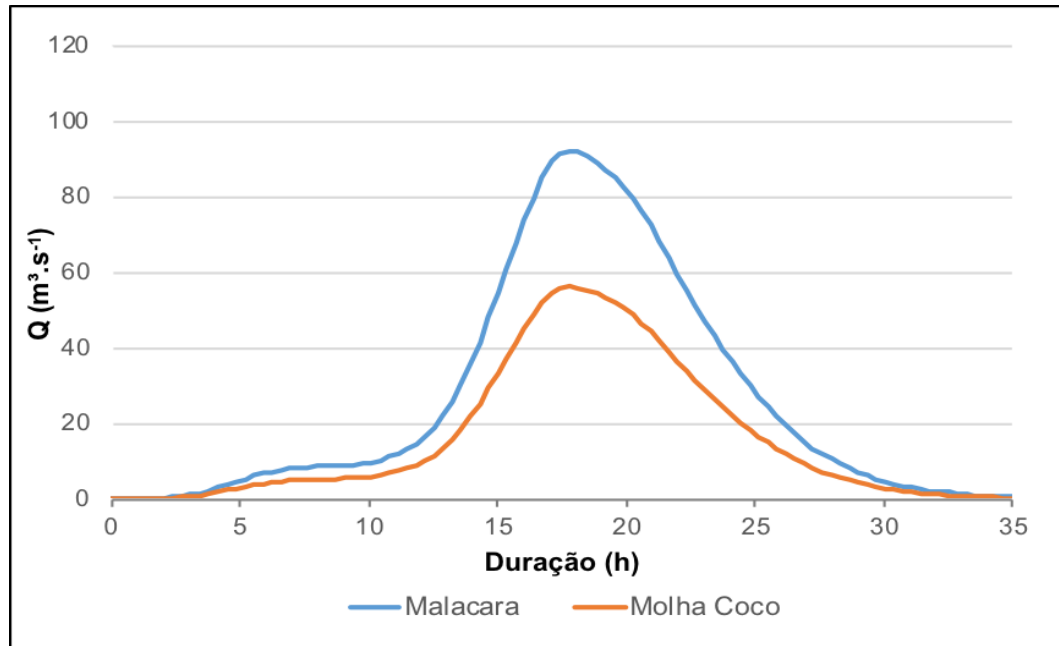


Fonte: do autor.

A partir dos hietogramas e dos parâmetros calibrados no HEC-HMS foram regionalizados os hidrogramas, considerando como áreas de contribuição 13,08 km² e 7,98 km² para os rios Malacara e Molha Coco, respectivamente. Estas áreas correspondem às bacias de contribuição para os leques aluviais, conforme mostra a Figura (12). A Figura 31 mostra os hidrogramas do evento de 2007, onde verifica-se que para o evento de 2007 as vazões de pico dos rios Malacara e Molha Coco foram de 92,39 m³.s⁻¹ e 56,36 m³.s⁻¹, respectivamente.

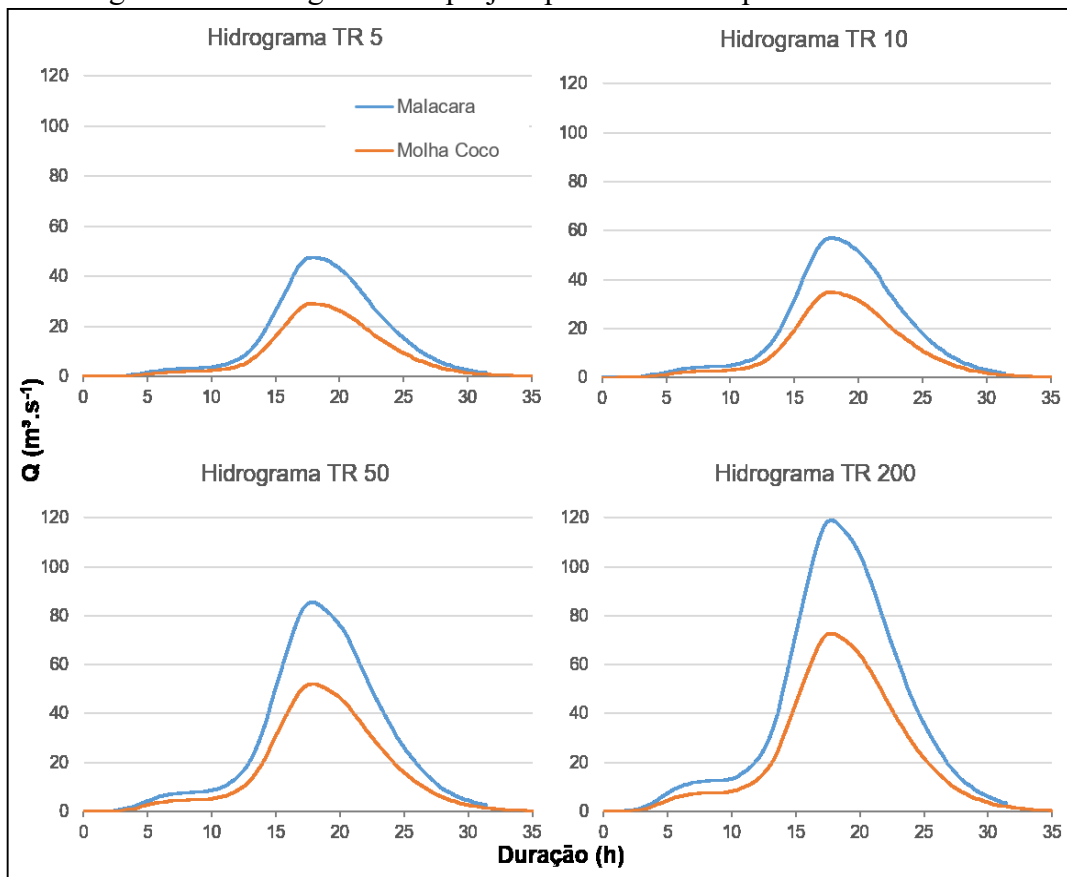
A Figura 32 apresenta os hidrogramas de projeto das bacias de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 50 e 200 anos. As vazões de pico calculadas para estes períodos de retorno foram de: 29,05 m³.s⁻¹, 34,83 m³.s⁻¹, 52,23 m³.s⁻¹, 72,74 m³.s⁻¹ para o rio Molha Coco e 46,61 m³.s⁻¹, 57,09 m³.s⁻¹, 85,62 m³.s⁻¹, 119,23 m³.s⁻¹ para o rio Malacara, respectivamente.

Figura 31 - Hidrogramas de projeto para o evento de 2007 para as bacias hidrográficas Malacara e Molha Coco.



Fonte: do autor.

Figura 32 - Hidrogramas de projeto para diferentes períodos de retorno.



Fonte: do autor.

A partir dos hidrogramas calculados que são parte dos processos hidrológicos da área de estudo, observa-se que a área de contribuição da sub-bacia do rio Molha Coco representa 38,4% enquanto que o Malacara representa 61,6% da área de contribuição total. Desta forma, considerando que a região é homogênea e o que as difere é a área de contribuição, verifica-se que a sub-bacia do rio Malacara possui maior contribuição no volume total escoado. As diferenças calculadas para os períodos de retorno de 5 e 100 anos em relação ao período de 200 anos foram de 61% e 23% para as vazões de pico e volume escoado. Esta redução das diferenças ocorre devido ao aumento da intensidade dos eventos, e conseqüentemente, o aumento da vazão e volume escoado, tendem a aumentar a área de inundação (MONTEIRO e KOBAYAMA, 2014). A Tabela 12 apresenta as vazões de pico e os volumes escoados para as sub-bacias dos rios Molha Coco e Malacara.

Tabela 12 - Vazão de pico e volume escoado para diferentes períodos de retorno

| Período de retorno (anos) | Vazão de pico ($m^3.s^{-1}$) | | Volume escoado (m^3) | |
|------------------------------|--------------------------------|----------|--------------------------|----------|
| | Molha Coco | Malacara | Molha Coco | Malacara |
| 5 | 29,05 | 46,61 | 974,40 | 1597,14 |
| 10 | 34,83 | 57,09 | 1173,95 | 1924,22 |
| 50 | 52,23 | 85,62 | 1784,19 | 2924,46 |
| 100 | 56,36 | 92,39 | 1931,47 | 3165,87 |
| 200 | 72,74 | 119,23 | 2517,99 | 4127,23 |

Fonte: do autor.

4.5 ÁREA INUNDADA COM O MODELO HEC-RAS 2D

A mancha de inundação analisada no presente trabalho corresponde à área de 5,53 km², determinada para o período de retorno de 100 anos que representa o evento de 2007. Essa área abrange o ápice dos leques aluviais e a região mais urbanizada do município de Praia Grande (SC). Com isso, desconsiderou-se parte do rio Malacara na planície de inundação que desemboca no rio Canoas (exutório), uma vez que, não foram encontradas informações confiáveis (fotos, relatórios, etc.) dos locais inundados para realizar a identificação com GPS.

As Figuras 33 e 35 mostram a profundidade e a velocidade da área de inundação simulada para o evento de 2007, obtida a partir da equação de Onda Difusa, usando como base

o MDE elaborado no ano de 2010, com a correção da batimetria feita em 2019, conforme Apêndice A.

Para verificar a precisão da área de inundação foram utilizados os 27 pontos coletados em campo com o GPS de navegação (descrito no item 4.1), sendo que, 19 estão localizados no limite da área inundada e 8 no interior. A Tabela 13 mostra a comparação da profundidade do fluxo da água medidas em campo com as simulada pelo HEC-RAS 2D.

Na Tabela 13 verifica-se que, metade dos pontos apresentaram uma diferença de até 20% e a outra não foi representada corretamente pelo HEC-RAS 2D. Dos pontos que o HEC-RAS 2D subestimou, 2 estão localizados no centro de Praia Grande, 1 no exutório do rio Molha Coco e 1 no local de avulsão do rio Molha Coco, conforme Figura 33-A.

Tabela 13 - Diferença relativa entre as profundidades da lâmina d'água e medidas em campo e obtidas com o modelo HEC-RAS 2D.

| Profundidade medida em campo (m) | Profundidade HEC-RAS 2D (m) | Diferença relativa (%) |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 2,80 | 3,33 | 18,93 |
| 2,40 | 2,74 | 14,17 |
| 1,30 | 1,15 | 11,54 |
| 0,30 | 0,26 | 13,33 |
| 1,00 | 0,10 | 90,00 |
| 1,00 | 0,10 | 90,00 |
| 1,20 | 0,00 | 100,00 |
| 0,70 | 2,21 | 215,71 |

Fonte: do autor.

Durante o evento de 2007, foram relatados a ocorrência de 3 de ondas inundação no rio Molha Coco (TENFEN, 2008). Estas ondas podem ter sido geradas a partir do rompimento de piscinas naturais que se formaram no rio (STYAWAN, 2018). Assim, com o rompimento deste reservatório natural, os picos de vazão podem ter sido superiores ao propagado pelo HEC-RAS 2D, provocando uma subestimação da área inundada pelo modelo.

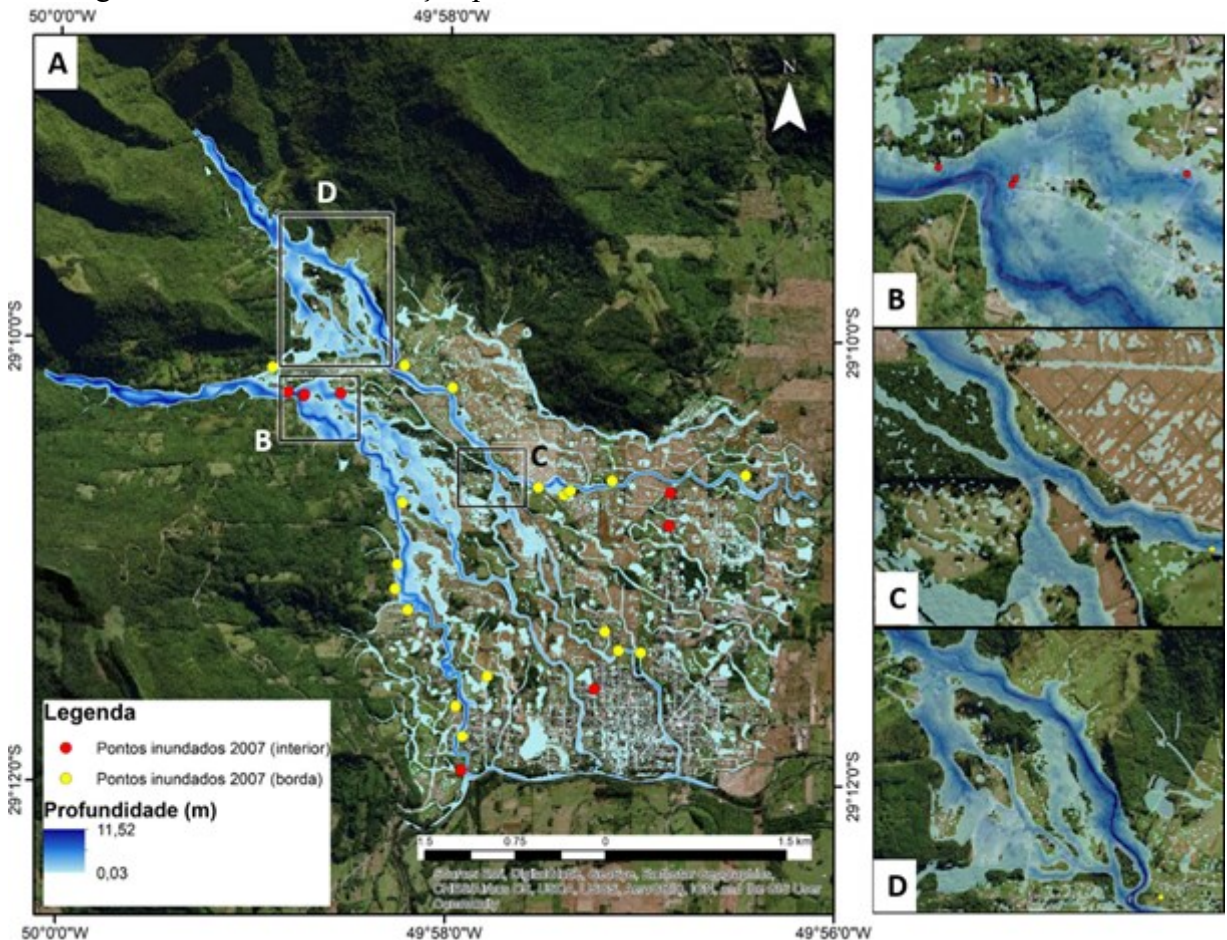
O evento de 2007, possui uma área de abrangência maior do que as áreas de contribuição dos rios Molha Coco e Malacara. O rio Mampituba e seus afluentes também tiveram o aumento do nível, contribuindo para o aumento da área de inundação no município de Praia Grande (TENFEN, 2008). Porém, essa contribuição não foi considerada no presente

trabalho, podendo ser este um dos motivos pelos quais o local inundado na confluência entre o rio Molha Coco com o rio Mampituba (Figura 16-G) não foi inundado na simulação do HEC-RAS 2D.

No local em que o HEC-RAS 2D superestimou a profundidade da lâmina de água, apontando uma altura máxima de 2,21 m, os moradores informaram uma profundidade de 0,7 m. No entanto, conforme mostra a Figura 16-C, neste local havia uma casa e a mesma ficou destruída com a força das águas.

A profundidade máxima da área de inundação simulada no HEC-RAS 2D para o TR de 100 anos foi de 11,52 m, e localizada na região do ápice dos leques aluviais. A Figura 33-A mostra a área inundada simulada no HEC-RAS 2D para o evento de 2007.

Figura 33 – Área de inundação para o evento de 2007 simulada com o HEC-RAS 2D



A área de estudo é característica de leques aluviais, sendo portanto, sujeita à ocorrência de fenômenos de avulsão dos canais, ou seja, mudanças na direção dos canais. Esse fenômeno

foi identificado pelo modelo HEC-RAS 2D em um trecho do rio Molha Coco (Figura 33-B) e dois no Malacara (Figura 33-C e 33-D).

De acordo com as informações levantadas na prefeitura de Praia Grande, quando ocorre o extravasamento dos rios Molha Coco e Malacara, devido à fortes chuvas, essas águas alimentam outros dois rios menores, denominados de Idalino e Braço do Malacara que deságuam no rio Canoas, que é limite da área urbana do município de Praia Grande, causando inundação no centro da cidade. Essa área foi representada satisfatoriamente pelo modelo HEC-RAS 2D.

No exutório do rio Molha Coco, a profundidade máxima da lâmina de água calculada pelo modelo HEC-RAS 2D atingiu 3,27 m. No evento de 2007, duas pontes foram danificadas, uma no rio Molha Coco e outra no Malacara (Figuras 34-A e 34-B), devido à alta velocidade e profundidade da água. Nesses locais, as velocidades calculadas pelo HEC-RAS 2D foram de $7,57 \text{ m.s}^{-1}$ e $8,45 \text{ m.s}^{-1}$ e profundidades de 5,56 m e 5,37 m, nos rios Molha Coco e Malacara, respectivamente. Observa-se que, os dois rios apresentaram velocidades e profundidades muito semelhantes quando comparados pontualmente nestes locais.

Figura 34 - Pontes danificadas no evento de 2007 (a) no rio Molha Coco e (b) no rio Malacara.



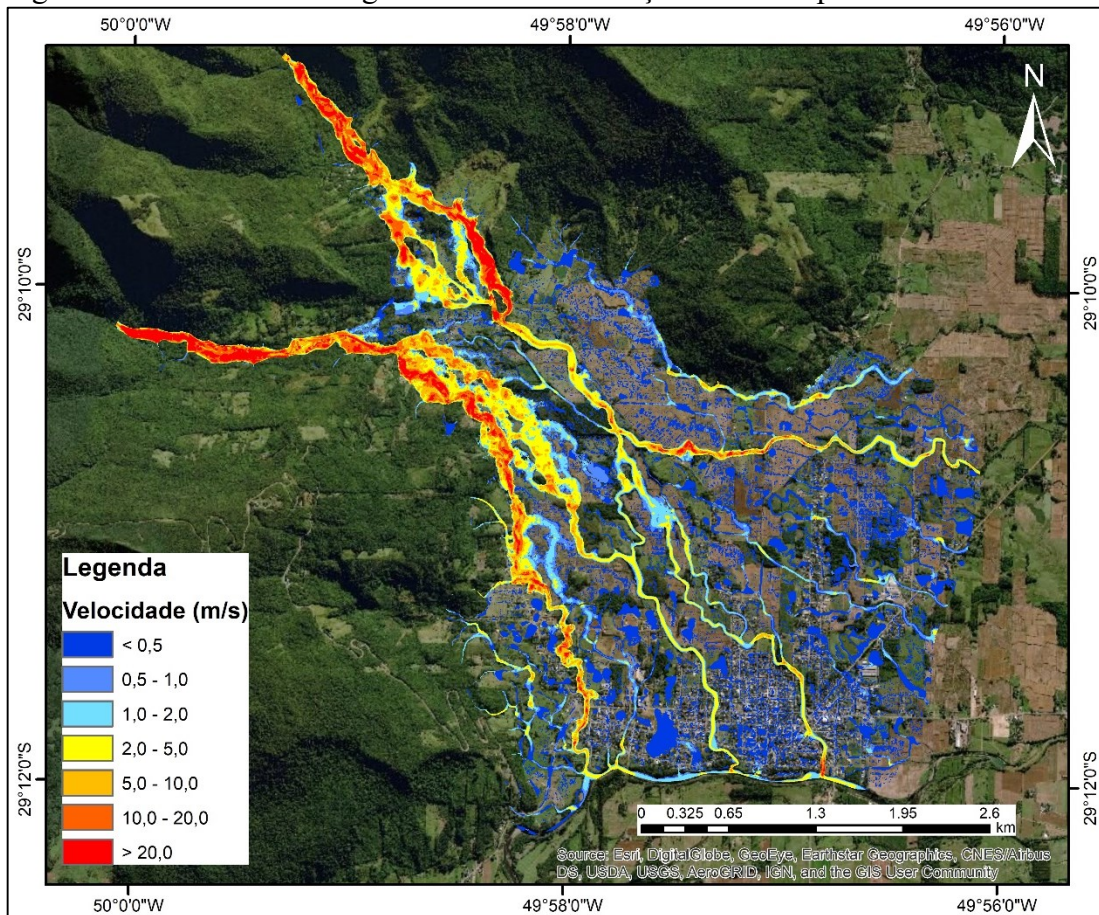
Fonte: (a) Prefeitura de Praia Grande, 2007 e (b) do autor, 2018.

No presente trabalho adotou-se um limiar de 20 m.s^{-1} (ou 72 km.h^{-1}) para as classes de velocidade. Esse limiar foi definido com base em Revellino et al. (2004), que adotou este valor de velocidade conforme observações em campo para situações de inundações bruscas associadas à fluxos de detritos. Na Figura 35 observa-se que, teve locais que apresentaram velocidades superiores a 20 m.s^{-1} , sendo, portanto, desconsideradas por não serem reais.

Tschiedel e Paiva (2018) analisaram as incertezas do modelo HEC-RAS 2D considerando o rompimento de barragem e verificaram que a resolução do MDE, coeficiente de Manning e a equação utilizada alteram significativamente os resultados do modelo.

Os erros encontrados na simulação com o HEC-RAS 2D podem estar associadas à equação da Onda Difusa (Equação 25), utilizada para a propagação dos hidrogramas nas bacias Molha Coco e Malacara. Apesar da equação da Onda Difusa ser utilizada para propagar fluxos não permanentes (USACE, 2016), ela não é indicada para regiões com declividade acentuada, onde há um aumento brusco de velocidade (VIANINI NETO, 2016).

Figura 35 - Velocidade da água na área de inundação simulada para o evento de 2007.



Fonte: do autor.

No presente trabalho, os erros associados à área de inundação podem estar relacionados à vários fatores, entre os quais destacam-se: (a) o ajuste da equação da curva-chave; (b) número e magnitude de eventos utilizados para calibração e validação do modelo hidrológico HEC-HMS; (c) precisão do MDE.

Com relação à curva-chave determinada para a seção do rio Malacara ressalta-se que, devido ao curto período de tempo para as medições, não foi possível medir vazões em eventos de maior magnitude, e por isso, a curva-chave não foi calculada para níveis de água semelhantes ao ocorrido em 2007.

A falta do levantamento topobatimétrico detalhado nos rios Molha Coco e Malacara e à falta de um MDE de alta resolução gerado anterior à data do evento, são considerados fonte de incertezas, dada as mudanças da paisagem com o impacto dos eventos. Brown e Pasternack (2014) explicam que, em regiões montanhosas, o aumento das vazões, associado ao transporte de sedimentos, provoca a alteração de percurso dos rios. Reisenbüchler et al. (2019) verificaram alterações no terreno a partir da comparação entre um MDE antes e depois de uma inundação.

Apesar da complexidade de trabalhar com modelagem hidrodinâmica em bacias montanhosas, devido à heterogeneidade da paisagem, e escassez de dados de vazão medidos, a área de inundação simulada pelo modelo HEC-RAS 2D sobrepôs 70% dos pontos inundados coletados em campo para o evento de 2007.

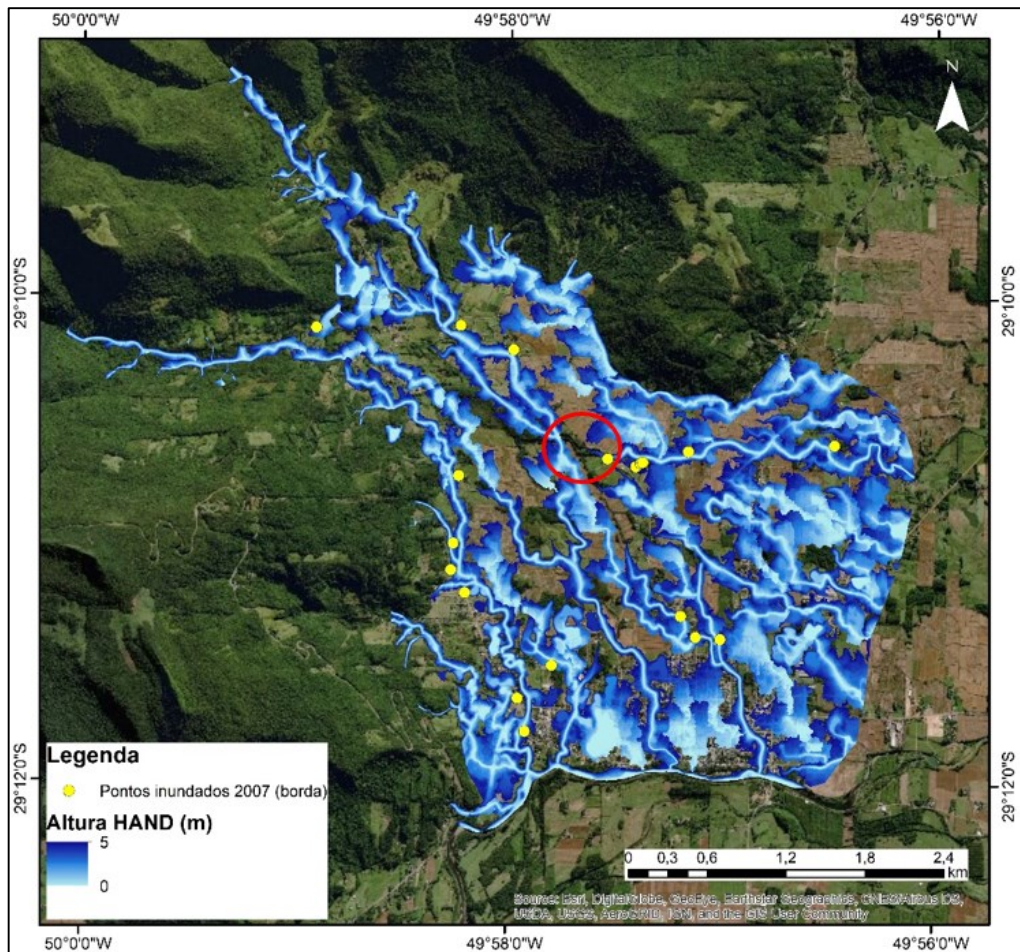
4.6 ÁREA INUNDADA COM O MODELO HAND

A topologia HAND foi gerada a partir do MDE com 1 m de resolução da SDS (2010), sem a correção dos rios com a batimetria de campo, afim de verificar se o MDE de resolução de 1 m conseguiria gerar corretamente a rede de drenagem.

No presente trabalho, a altura máxima adotada para a normalização do modelo HAND foi de 5 m em relação à drenagem mais próxima, pois foi o valor que se ajustou melhor às áreas inundadas no evento de 2007, resultando em uma área de inundação de 8,71 km².

Apesar do HAND não representar adequadamente todo o percurso do rio Malacara, havendo uma descontinuidade (círculo vermelho indicado na Figura 37), o modelo conseguiu representar a direção de fluxo. Além disso, o modelo representou o percurso do rio Molha Coco com precisão. A área de inundação gerada pelo HAND abrangeu 17 dos 27 pontos de inundação (63%) medidos com GPS, sendo 16 localizados no limite da área inundada e 1 no interior. A Figura 36 mostra que a altura HAND (alcance da área de inundação) ficou ajustada aos 17 pontos localizados no limite da área inundada do evento de 2007.

Figura 36 - Área de inundação simulada pelo modelo HAND

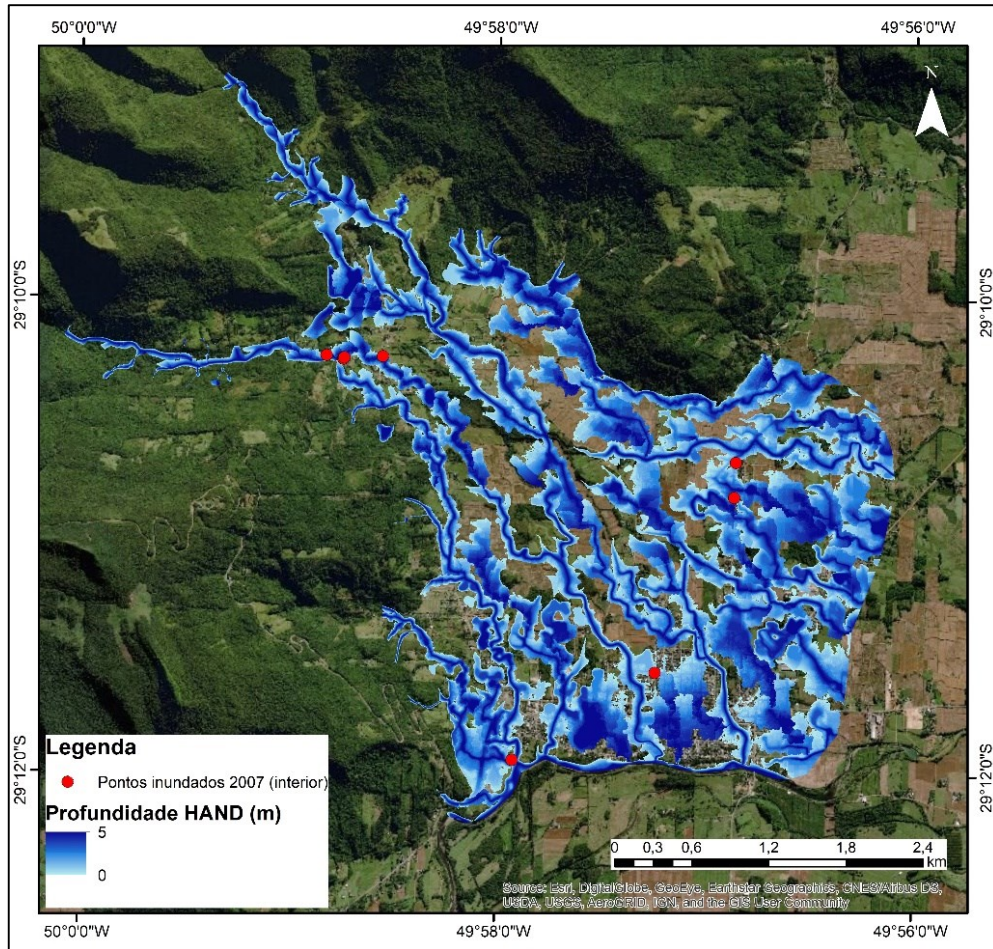


Fonte: do autor.

Na Figura 37 verifica-se a profundidade do fluxo calculada pela Equação 27 com base na mancha de inundação gerada pelo HAND

Apesar do HAND obter um bom ajuste aos pontos de campo localizados no limite da área inundada, o mesmo não determinou as profundidades da lâmina d'água com precisão. Na Tabela 14, verifica-se que 75% das profundidades foram superestimadas em relação às medidas em campo. Momo et al. (2016) e Monte et al. (2019) também verificaram que o HAND superestimou as profundidades.

Figura 37 - Profundidade da área inundada pelo modelo HAND



Fonte: do autor.

Tabela 14 - Diferença relativa entre as profundidades da lâmina d'água e medidas em campo e obtidas com o modelo HAND.

| Profundidade medida em campo (m) | Profundidade HAND (m) | Diferença relativa (%) |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 2,80 | 3,98 | 42,14 |
| 2,40 | 4,01 | 67,83 |
| 1,30 | 1,31 | 0,77 |
| 0,30 | 1,63 | 443,33 |
| 1,00 | 0,40 | 60,00 |
| 1,00 | 3,34 | 234,00 |
| 1,20 | 0,00 | 100,00 |
| 0,70 | 2,59 | 270,00 |

Fonte: do autor.

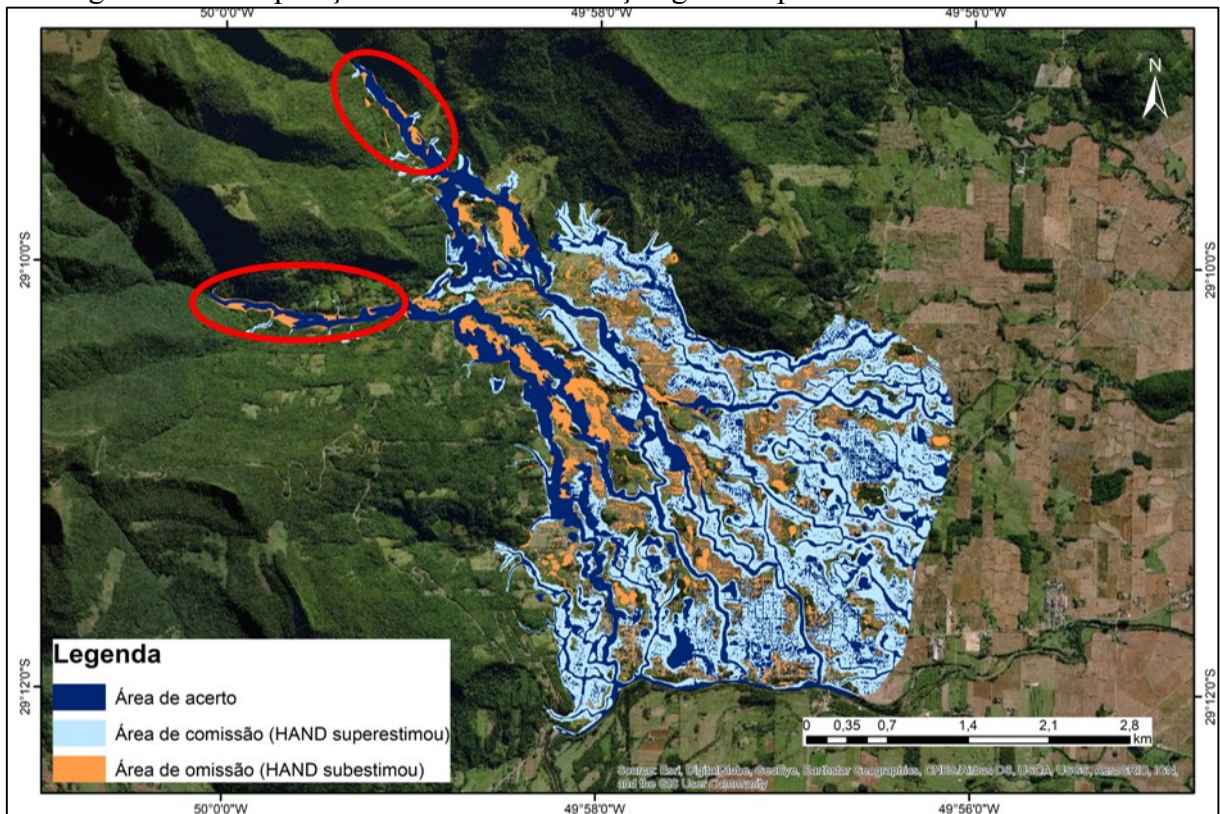
4.7 COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS INUNDADAS PELO HEC-RAS 2D E HAND

O modelo HAND foi comparado com o HEC-RAS 2D com objetivo de verificar a capacidade do primeiro em representar a área de inundação em região montanhosa com a presença de leques aluviais, uma vez que, este modelo foi desenvolvido para representar planícies de inundação. Monte et al. (2019) ressaltam que, os dois modelos apresentam limitações, porém modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS 2D que, além do MDE utilizam dados hidrológicos (chuva e vazão), fornecem resultados com maior precisão, desde que estes sejam confiáveis. Também o HEC-RAS 2D foi desenvolvido para propagar a onda de cheia, tanto em regiões de relevo acentuado, como em planície de inundação (USACE, 2016).

A Figura 38 mostra as áreas de inundação sobrepostas, geradas pelo HAND e HEC-RAS 2D (área de controle). Na avaliação foram consideradas: (a) áreas de acerto (100% de sobreposição); (b) áreas de omissão (áreas que o HAND não inundou) e (c) áreas de comissão (áreas inundadas pelo HAND e não pelo HEC-RAS 2D). Observa-se que as áreas de acerto predominam em relação às de omissão e comissão, principalmente na região dos ápices dos leques aluviais (círculos vermelhos), onde os vales são encaixados. Isto ocorre porque nessas regiões há o confinamento do fluxo de água, conseqüentemente, a extensão da inundação será semelhante de ambos os modelos. Também essas áreas foram bem representadas nos canais por ambos os modelos. Já a Tabela 15 apresenta as métricas de comparação entre os dois modelos.

Afshari et al. (2018) também compararam o HAND com HEC-RAS 2D e observaram que, nas cabeceiras das bacias montanhosas, onde os rios são mais retilíneos ocorre sobreposição das manchas de inundação entre o HAND e HEC-RAS, obtendo melhores resultados em relação às áreas de planície com presença de meandros.

Figura 38 - Comparação de áreas de inundação geradas pelo HEC-RAS 2D e HAND.



Fonte: do autor.

Tabela 15 - Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar acurácia do modelo HAND com relação ao HEC-RAS.

| Parâmetros Estatísticos | Valores |
|-----------------------------------|---------|
| Área de acerto (km ²) | 3,88 |
| Omissão (%) | 21,93 |
| Comissão (%) | 97,18 |
| <i>F</i> estatístico (%) | 39,59 |
| Acurácia Geral % | 78,07 |
| TAF (%) | 55,45 |
| Kappa (K) | 0,35 |

Fonte: do autor.

A área simulada pelo HAND (8,71 km²) foi maior do que a do HEC-RAS 2D (5,53 km²), respectivamente, resultando numa acurácia geral de 78,07%. No entanto, este parâmetro não considera as áreas inundadas pelo HAND, que o HEC-RAS 2D não inundou (erro de comissão). Entretanto, o parâmetro *F* mostrou que a área de acerto foi de 39,6%.

O parâmetro TAF permitiu verificar que, o modelo HAND superestimou 55,45% da área de controle.

O índice Kappa de 0,35 mostra que o desempenho do HAND em relação ao HEC-RAS 2D foi razoável.

Monte et al. (2019) compararam o modelo HAND com o HEC-RAS 2D em uma região totalmente plana e verificaram que, o modelo teve um bom desempenho com o índice Kappa de 0,86, porém o HAND superestimou a profundidade da lâmina d'água.

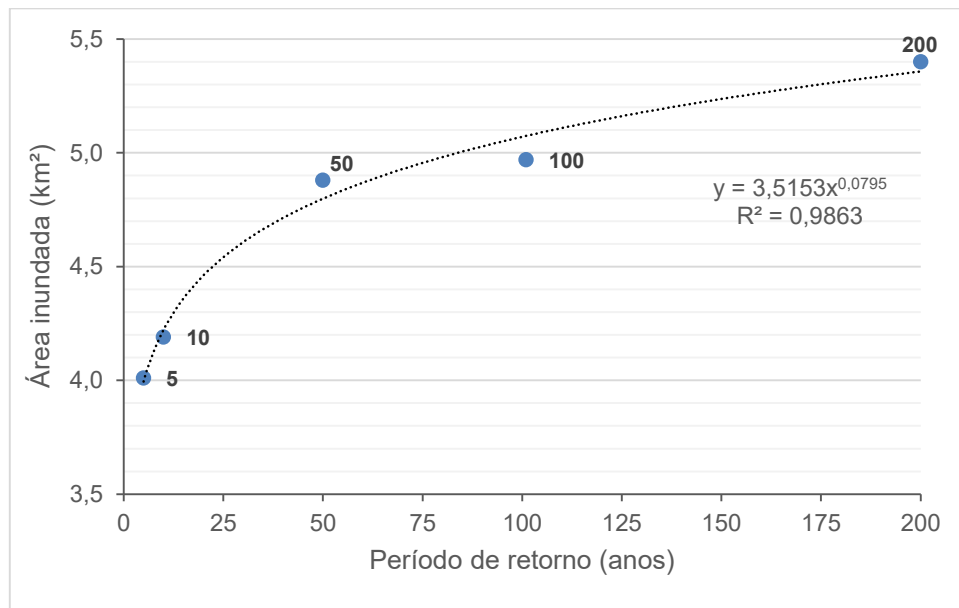
O desempenho do HAND pode ser influenciado pelas variações hidrodinâmicas que ocorrem nos canais e que, o modelo não calcula, pois considera o fluido estático (MOMO et al., 2016). Teng et al. (2017) explicaram que, o modelo HAND não permite identificar se a inundação é brusca, uma vez que, não computa a dinâmica e a velocidade do fluxo. Assim, em regiões com escassez de dados hidrológicos, esse modelo pode ser uma alternativa para indicar as áreas propensas à inundação (JAFARZADEGAN et al., 2018).

4.8 MAPA DE PERIGO DE INUNDAÇÃO PARA A REGIÃO DAS BACIAS DE ESTUDO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

O mapa de perigo de inundação representa a distribuição espacial do dano potencial de uma inundação que pode ser determinado em função da intensidade e da probabilidade de ocorrência do evento. A intensidade da inundação está relacionada com a força do água, que pode desestabilizar veículos, estruturas construídas e pessoas, entre outros. Para mapear as áreas com determinado potencial de perigo de inundação para a região das bacias dos rios Molha Coco e Malacara. No presente trabalho, calculou-se o Índice de Perigo (IP) proposto por Stephenson (2002), usando a Equação 33 e as profundidades e a velocidades d'água simuladas pelo HEC-RAS 2D para os períodos de retorno de 5, 10, 50, 100 e 200 anos.

A Figura 39 mostra a relação da área de inundação com o período de retorno.

Figura 39 - Área de inundação das bacias Molha Coco e Malacara para os diferentes períodos de retorno



Fonte: do autor.

Na Figura 39 verifica-se que, a extensão da área inundada aumenta com o período do retorno, porque a magnitude do evento é maior.

A Tabela 16 e a Figura 40 apresentam as frequências da profundidade da água em relação aos períodos de retorno.

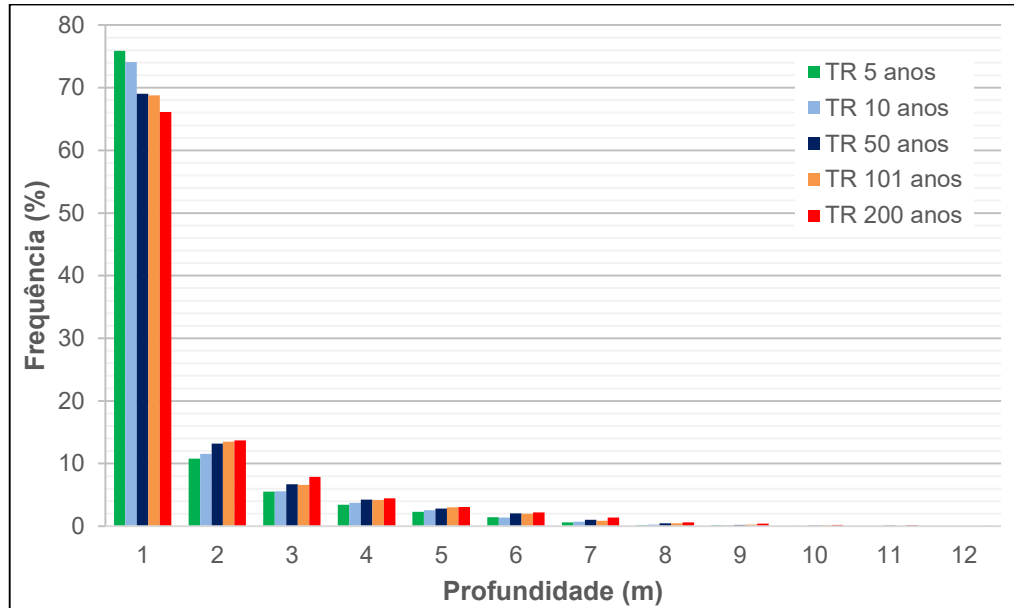
Tabela 16 – Distribuição da frequência das profundidades da lâmina d'água para os períodos de retorno

| Profundidade (m) | Frequência (%) | | | | |
|---------------------|----------------|-------|-------|--------|--------|
| | TR 5 | TR 10 | TR 50 | TR 100 | TR 200 |
| 1 | 75,91 | 74,07 | 69,05 | 68,81 | 66,14 |
| 2 | 10,78 | 11,58 | 13,21 | 13,47 | 13,69 |
| 3 | 5,55 | 5,59 | 6,70 | 6,62 | 7,88 |
| 4 | 3,42 | 3,74 | 4,24 | 4,20 | 4,45 |
| 5 | 2,32 | 2,56 | 2,79 | 3,02 | 3,05 |
| 6 | 1,43 | 1,38 | 2,06 | 1,98 | 2,20 |
| 7 | 0,59 | 0,72 | 1,04 | 0,88 | 1,37 |
| 8 | 0,18 | 0,25 | 0,48 | 0,48 | 0,62 |
| 9 | 0,15 | 0,16 | 0,19 | 0,27 | 0,41 |
| 10 | 0,01 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,19 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,05 | 0,14 |
| 12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |

Fonte: do autor.

Na Tabela 16 e na Figura 40 verifica-se que, a profundidade da lâmina d'água predominante é de até 1 m. Com o aumento do período de retorno a diferença das profundidades é mais significativa entre os TR=5 (9,50 m) e TR=200 (12,82 m). As profundidades maiores foram encontradas no ápice do leques aluviais e no percurso dos rios Molha Coco e Malacara.

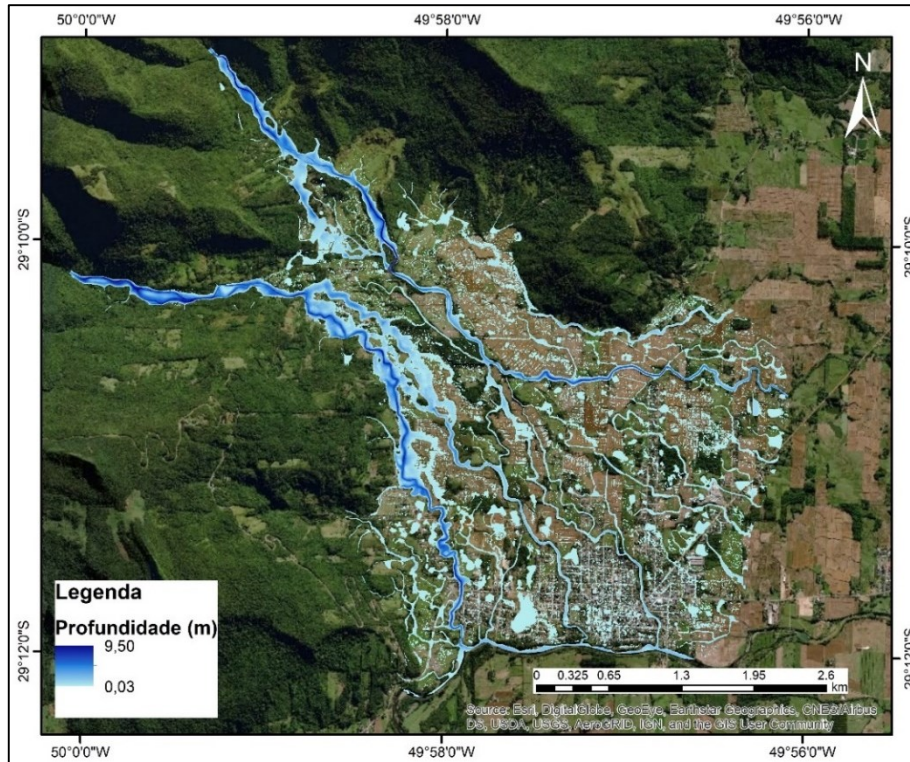
Figura 40 - Distribuição da frequência das profundidades da lâmina d'água para os períodos de retorno



Fonte: do autor.

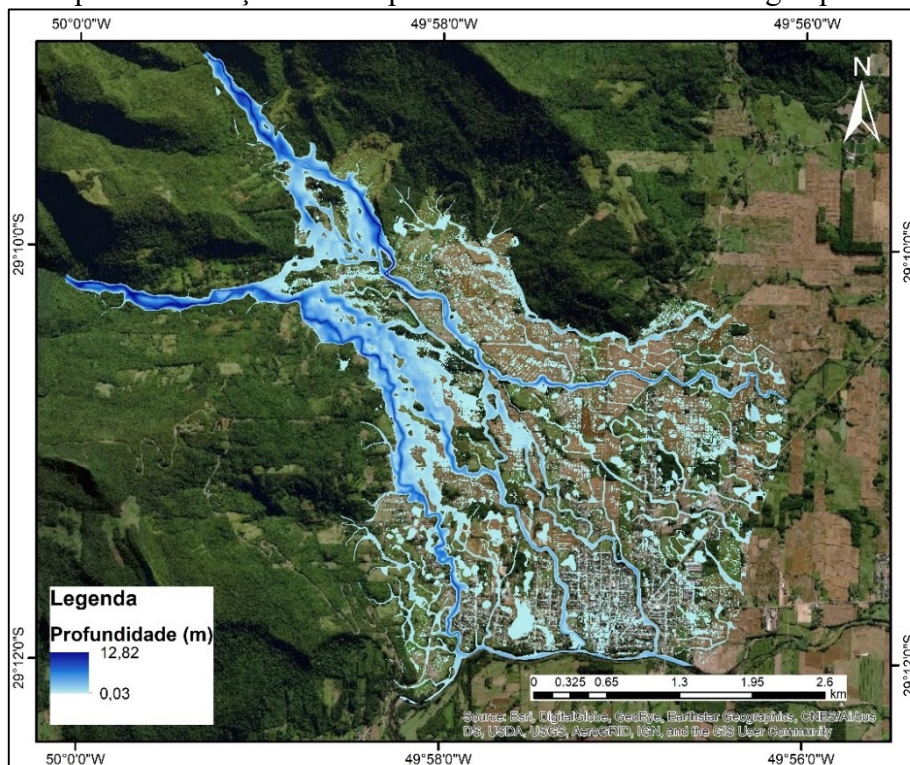
As Figuras 41 e 42 mostram os mapas de inundação com as profundidades da lâmina de água e as velocidades determinadas pelo HEC-RAS 2D para os períodos de retorno de 5 e 200 anos.

Figura 41 - Mapa de inundação com as profundidades da lâmina de água para o TR 5 anos



Fonte: do autor.

Figura 42 - Mapa de inundação com as profundidades da lâmina de água para TR 200 anos



Fonte: do autor.

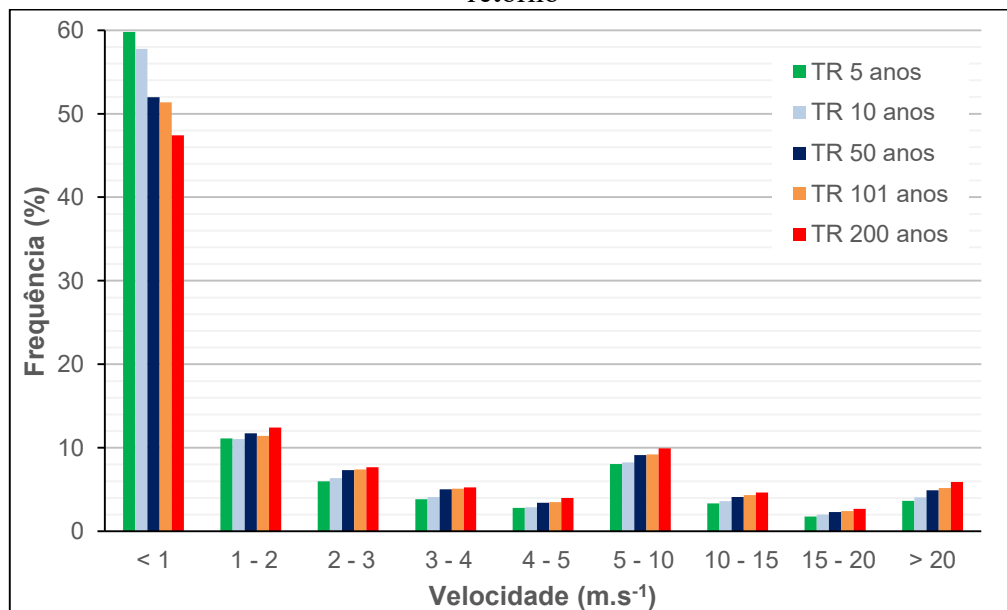
Devido às incertezas no cálculo de velocidades pelo modelo HEC-RAS 2D, considerou-se que as velocidades mais coerentes com a realidade das bacias de estudo variam até 20 m.s^{-1} , como mencionado no item 4.5, acima deste valor, considera-se um erro do modelo devido às instabilidades numéricas. Observa-se na Tabela 17 e na Figura 43 que as velocidades mais baixas ($< 1 \text{ m.s}^{-1}$) são as mais frequentes, apresentando um comportamento semelhante à profundidade.

Tabela 17 - Distribuição de frequência de velocidades do fluxo de inundação para os diferentes períodos de retorno

| Velocidade (m.s^{-1}) | Frequência (%) | | | | |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|--------|--------|
| | TR 5 | TR 10 | TR 50 | TR 100 | TR 200 |
| < 1 | 59,79 | 57,75 | 51,99 | 51,37 | 47,42 |
| 1 - 2 | 11,10 | 11,03 | 11,74 | 11,43 | 12,44 |
| 2 - 3 | 5,97 | 6,35 | 7,34 | 7,42 | 7,67 |
| 3 - 4 | 3,82 | 4,11 | 5,04 | 5,09 | 5,26 |
| 4 - 5 | 2,82 | 2,89 | 3,41 | 3,48 | 3,99 |
| 5 - 10 | 8,06 | 8,27 | 9,12 | 9,20 | 9,95 |
| 10 - 15 | 3,35 | 3,61 | 4,09 | 4,33 | 4,65 |
| 15 - 20 | 1,78 | 2,00 | 2,31 | 2,42 | 2,68 |
| > 20 | 3,63 | 4,09 | 4,93 | 5,18 | 5,91 |

Fonte: do autor.

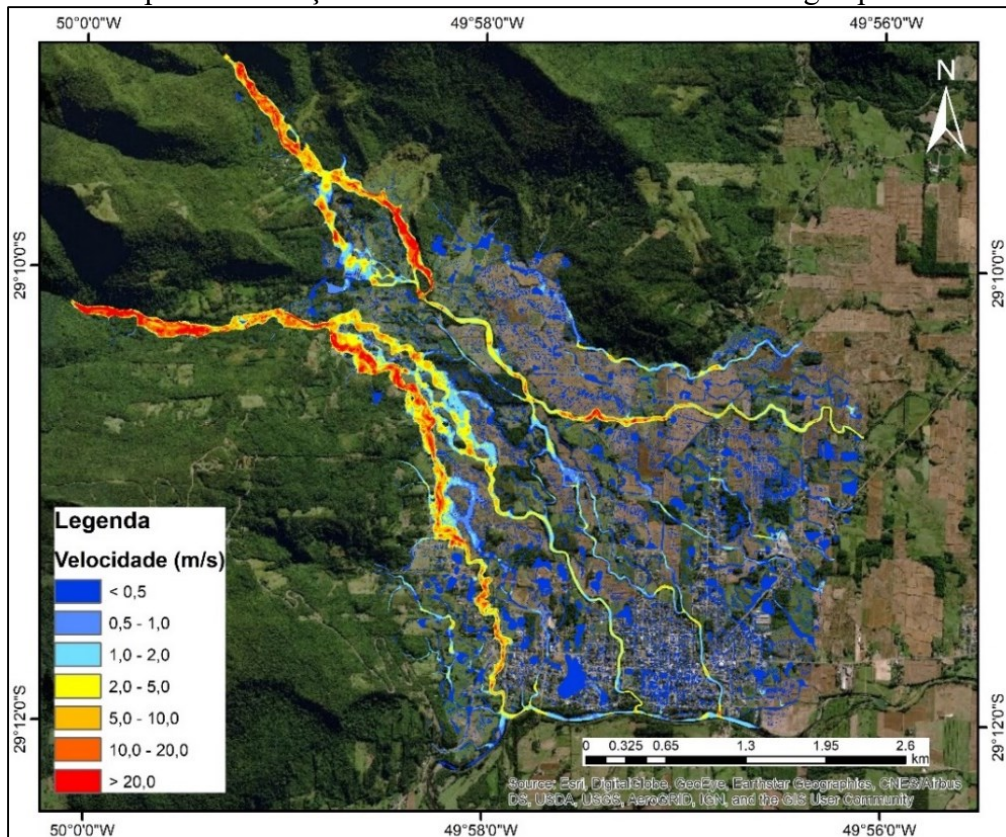
Figura 43 - Distribuição de frequência de velocidades da água para os diferentes períodos de retorno



Fonte: do autor.

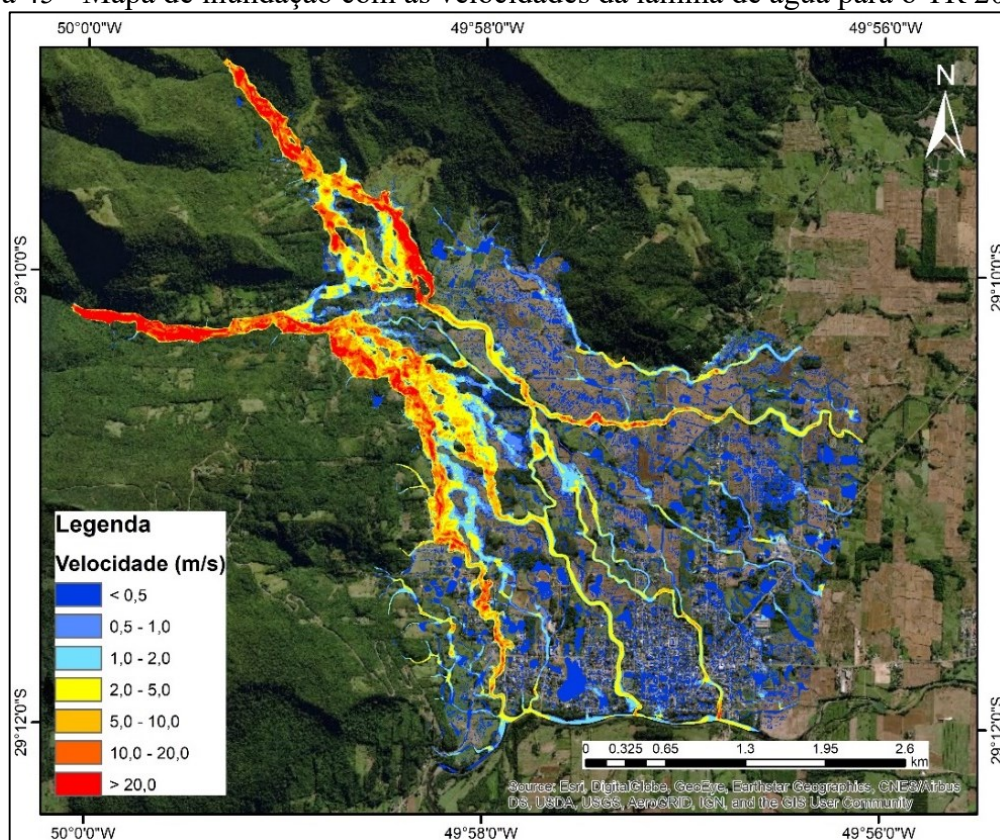
As Figuras 44 e 45 mostram as velocidades calculadas para os períodos de retorno de 5 e 200 anos. Verifica-se que, as maiores velocidades estão nos locais onde os rios Molha Coco e Malacara são mais declivosos. Já as menores velocidades estão distribuídas na planície de inundação. Isso mostra que, apesar das instabilidades numéricas que o modelo HEC-RAS 2D apresentou na propagação dos hidrogramas do presente estudo, a velocidade está coerente com o tipo de terreno das bacias Molha Coco e Malacara. Essas instabilidades podem estar relacionadas com a precisão do MDE da SDS (2010), com a sensibilidade do coeficiente de Manning, número reduzido de dados de vazão utilizados (4 eventos) e com a equação utilizada (Equação da Onda Difusa) para a propagação do fluxo de água. Apesar da equação da Onda Difusa não ser a mais indicada para regiões declivosas, foi a que representou melhor a extensão da área inundada em relação à equação do Momento. Esses resultados mostram que para melhorar a resposta do modelo HEC-RAS 2D é necessário monitorar a vazão para um período de tempo maior, a fim de obter mais eventos de vazão, bem como utilizar MDE de melhor precisão, uma vez que, a área de estudo é heterogênea e está em constante modificação.

Figura 44 – Mapa de inundação com as velocidades da lâmina de água para o TR 5 anos



Fonte: do autor.

Figura 45 - Mapa de inundação com as velocidades da lâmina de água para o TR 200 anos



Fonte: do autor.

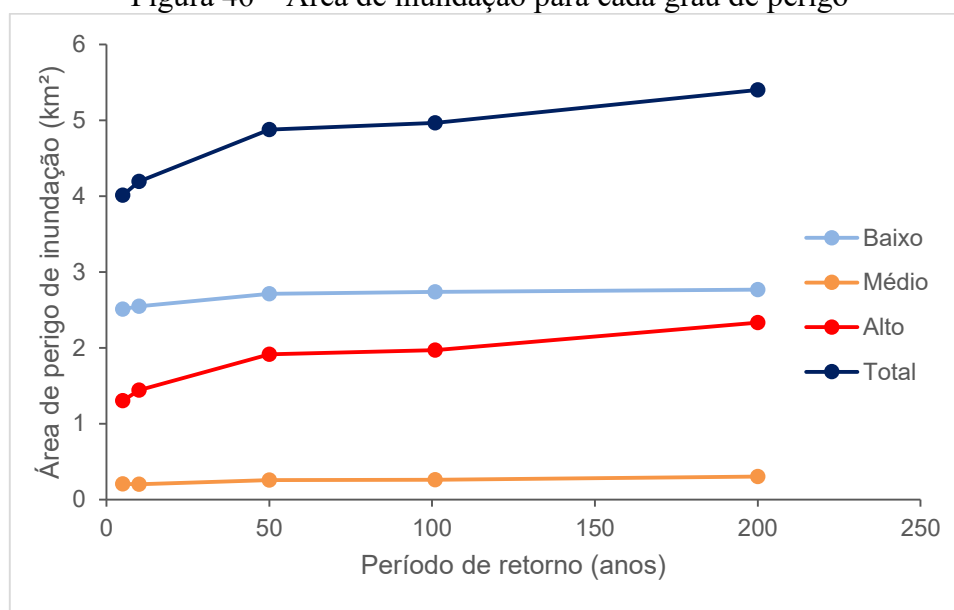
Como resultado da multiplicação do mapa de profundidade pelo da velocidade, obteve-se um mapa onde cada pixel representa um índice de perigo. Para o melhor entendimento deste mapa os pixels foram classificados em três categorias (STEPHENSON, 2002), conforme mostra a Tabela 18 e a Figura 46. Observa-se que as áreas com baixo grau de perigo aumentaram 9% em relação aos TR de 5 e 200 anos, já, para o grau de perigo alto, a diferença foi de 78%.

Tabela 18 - Classificação das áreas de inundação em km² para cada grau de perigo.

| Grau de perigo | Área inundada (km ²) | | | | |
|----------------|----------------------------------|------|------|------|------|
| | TR | | | | |
| | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 |
| Baixo | 2,51 | 2,55 | 2,71 | 2,74 | 2,77 |
| Médio | 0,2 | 0,2 | 0,25 | 0,26 | 0,3 |
| Alto | 1,3 | 1,44 | 1,91 | 1,97 | 2,33 |

Fonte: do autor.

Figura 46 – Área de inundação para cada grau de perigo



Fonte: do autor.

As Figuras 47, 48 e 49 mostram os mapas de perigo de inundação para períodos de retorno (5, 100 e 200 anos) que tiveram maior diferença em relação ao grau de perigo. Analisando os três mapas é possível visualizar que o fluxo da inundação apresentou maior grau de perigo ($< 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) dentro da calha dos rios e nos locais de extravasamento. Nesses locais existem várias pousadas, restaurantes e residências, que podem sofrer danos com a ocorrência de um evento dessa magnitude, e ainda, as pessoas que vivem nesses locais não estão seguras, mesmo dentro de suas casas.

Já no centro da cidade de Praia Grande o grau de perigo foi classificado como baixo. Este resultado não corrobora com os dados históricos do evento de 2007, onde a comunidade entrevistada relatou que a inundação foi brusca e violenta. Ressalta-se que, no presente trabalho não considerou-se a contribuição dos rios Mampituba e Canoas na simulação do evento de 2007, que também podem ter contribuído para a inundação nesses locais. Além disso, não foram simulados o transporte de sedimentos, deslizamentos e rompimento de barragens/piscinas naturais. Esses processos também foram relatados pela comunidade.

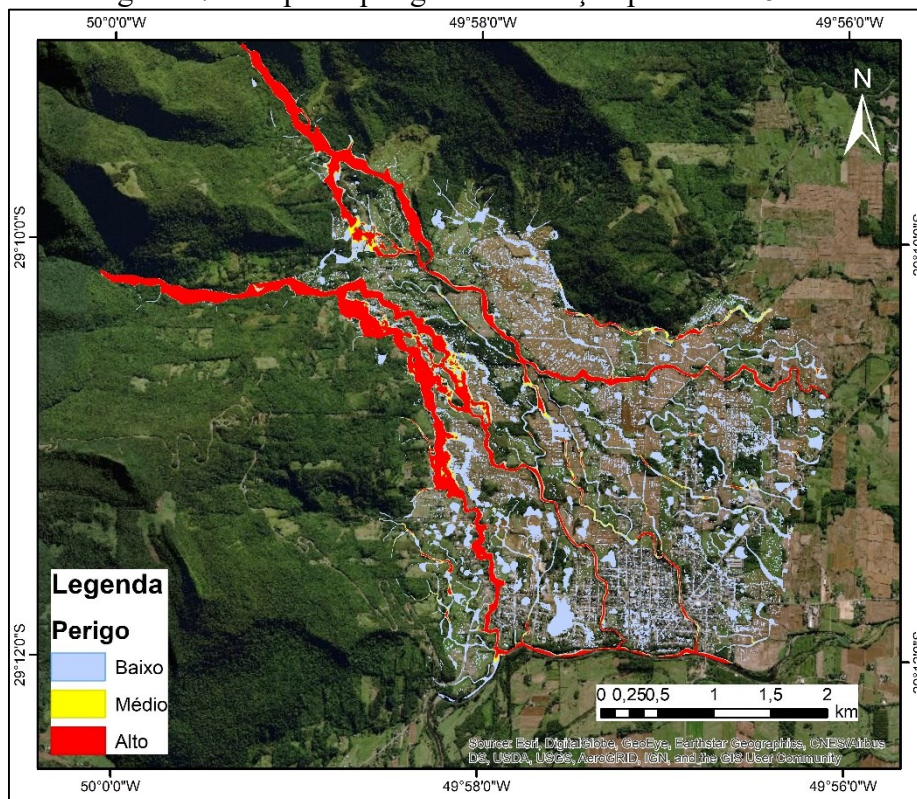
Strieder et al. (2008) explicam que, a precipitação intensa nessa região aliada a baixa capacidade de retenção de água no solo pode desencadear esses processos, aumentando o grau de perigo de inundação.

Com base nesses aspectos, os mapas de perigo gerados no presente trabalho ainda são preliminares. Isso reforça a necessidade de melhorar o monitoramento dos processos de chuva

e vazão e de realizar um novo levantamento topobatimétrico para obter MDEs com maior precisão.

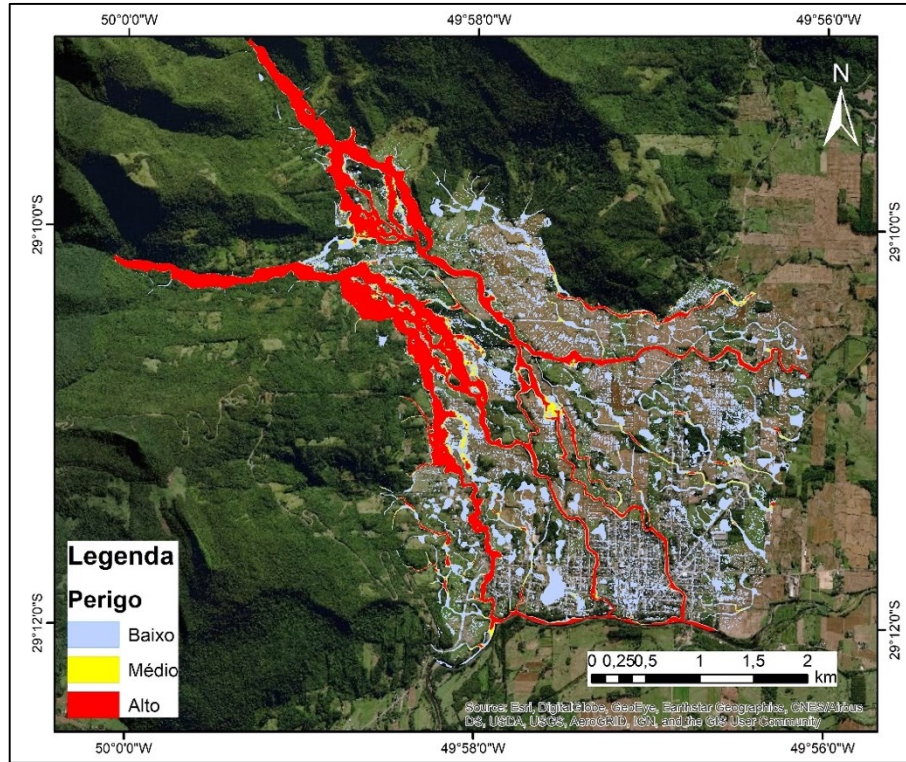
Contudo, o mapa de perigo obtido neste estudo, pode ser útil para os gestores da região no planejamento territorial, bem como, para as atividades de turismo, garantindo maior segurança para a população local e também para os turistas.

Figura 47 - Mapa de perigo de inundação para o TR 5 anos



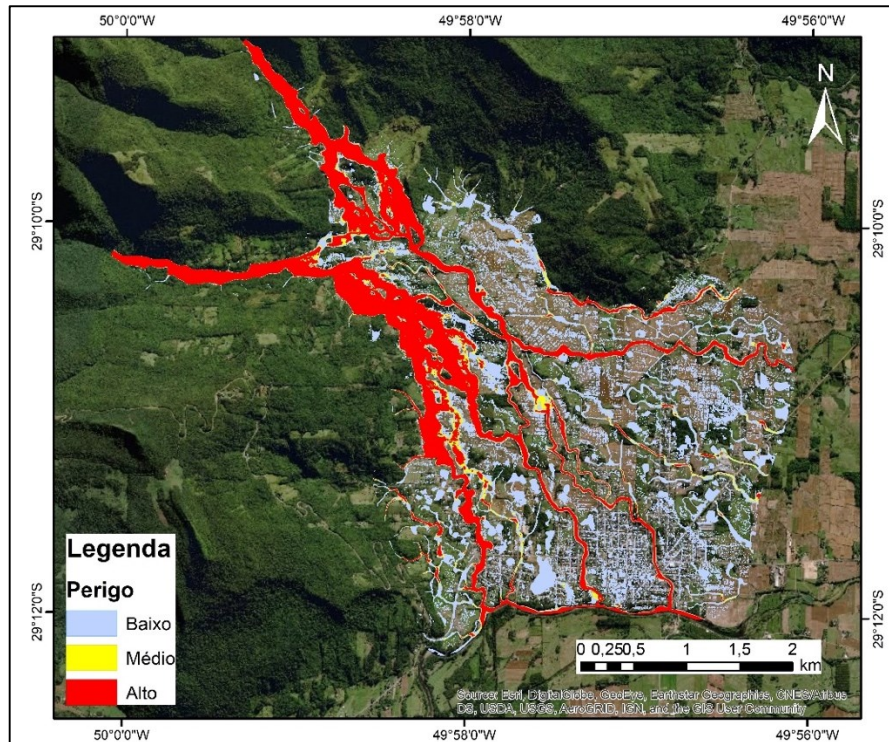
Fonte: do autor.

Figura 48 - Mapa de perigo de inundação para o TR 100 anos



Fonte: do autor.

Figura 49 - Mapa de perigo de inundação para o TR 200 anos



Fonte: do autor.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o grau de perigo de inundação nas bacias dos rios Molha Coco e Malacara, características de regiões montanhosas do sul do Brasil. O modelo HEC-RAS 2D foi utilizado para simular eventos de inundação nessas bacias, com base em dados monitorados em campo e em registros históricos das inundações ocorridas em 2007. Também as áreas de inundação simuladas pelo modelo HEC-RAS 2D foram comparadas com HAND, afim de verificar a aplicabilidade deste último para bacias montanhosas.

- Com base nos registros históricos de 2007, verificou-se que a área de inundação atingiu a zona urbana do município de Praia Grande, SC. A profundidade máxima da lâmina d'água desse evento medida em campo foi de 2,80 m, no local de avulsão do leque aluvial do rio Molha Coco. Já próximo ao exutório do rio Molha Coco, a profundidade atingiu 1,20 m.
- Na calibração o modelo HEC-HMS apresentou um NSE de 0,87, mostrando que o desempenho foi “muito bom”. Já na validação, esse o NSE foi de 0,36, sendo considerado “insatisfatório”. A vazão simulada pelo HEC-HMS na calibração foi de $25,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a qual foi subestimada em 7,25% em relação à vazão medida ($27,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Na validação a vazão máxima observada ($16,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) foi superestimada em 36,6% em relação a simulada ($10,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), mostrando que o modelo não foi validado.
- Na reconstituição do evento de 2007 foram utilizadas as vazões máximas de $56,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $92,39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para os rios Molha Coco e Malacara, respectivamente. Essas vazões foram obtidas com os parâmetros calibrados no HEC-HMS e correspondem ao período de retorno de 100 anos.
- As vazões máximas obtidas para o evento de 2007, propagadas no HEC-RAS 2D, resultaram em uma profundidade máxima de 11,52 m e uma área de inundação de 5,53 km^2 . A área de inundação simulada abrangeu 70% dos pontos de inundação, coletados em campo, mostrando que o modelo teve uma boa representação.
- A área simulada pelo HAND foi maior do que a do HEC-RAS 2D, resultando numa acurácia geral de 78,1%. Entretanto, o parâmetro F mostrou que, a área de acerto entre os dois modelos foi de 39,6%. Já o índice Kappa de 0,35, mostrou que o desempenho do HAND foi razoável.
- As maiores profundidades e velocidades foram encontrados nas partes mais declivosas, nos locais de avulsão e dentro dos canais.

- Os mapas de perigo indicam que o maior grau de perigo ($< 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) está dentro da calha dos rios e nos locais de extravasamento. Nessa região, existem pousadas, restaurantes e residências, que podem sofrer danos estruturais e expor as pessoas ao perigo de um evento de inundação dessa magnitude.

O presente estudo, demonstrou a importância do monitoramento e modelagem dos processos hidrológicos para conhecer e compreender os fenômenos que causam inundações em bacias montanhosas com a presença de leques aluviais. Adicionalmente, possibilitou realizar o mapeamento de perigo de inundação nas bacias dos rios Molha Coco e Malacara, as quais possuem histórico de ocorrência de eventos extremos. Desta forma, este mapeamento poderá auxiliar os gestores no gerenciamento de desastres naturais hidrológicos e no planejamento territorial, como forma de prevenção para a ocupação de áreas de perigo de inundação.

5.1 RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros em bacias montanhosas no sul de Santa Catarina, recomenda-se:

- Aumentar o monitoramento para a obtenção de dados hidrológicos suficientes para validar modelos hidrológicos, afim de melhorar a precisão do modelo hidrodinâmico e, conseqüentemente, do mapa de perigo.
- Nas simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, considerar as piscinas naturais para avaliar de forma mais precisa a onda de inundação.
- Realizar um levantamento topobatimétrico mais detalhado dos canais, com objetivo de melhorar os resultados das simulações dos modelos hidrodinâmicos e também, acompanhar a alteração das regiões de leques aluviais.
- Avaliar a influência da contribuição da vazão do rio Mampituba nas inundações em Praia Grande, para representar e classificar adequadamente o grau de perigo de inundação, na área urbana do município.
- Utilizar modelos combinados para avaliar de forma conjunta os eventos de fluxo de detritos, transporte de sedimentos e inundações, para avaliar o impacto da ocorrência desses processos na região de estudo.
- Identificar o grau de perigo no rio Malacara, no trecho onde são realizadas trilhas, em eventos de menor magnitude.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**, p. 12, 2016. doi: 10.1590/S1413-41522016146750
- ABUSHANDI, E.; MERKEL, B. Modelling Rainfall Runoff Relations Using HEC-HMS and IHACRES for a Single Rain Event in an Arid Region of Jordan. **Water Resources Management**, v. 27, n. 7, p. 2391-2409, 5 fev. 2013.
- AFSHARI, S., TAVAKOLY, A. A., RAJIB, M. A., ZHENG, X., FOLLUM, M. L., OMRANIAN E., FEKETE, B. M. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. **Journal of Hydrology**. 556, 539-556, 2018. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.036.
- AJMAL, M.; WASEEM, M.; AHN, J.; KIM, T. Runoff Estimation Using the NRCS Slope-Adjusted Curve Number in Mountainous Watersheds. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, v. 142, n. 4, p. 04016002, abr. 2016.
- ALTAF, F.; MERAJ, G.; ROMSHOO, S. A. Morphometric Analysis to Infer Hydrological Behaviour of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. **Geography Journal**, vol. 2013, p. 1-14, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/178021>
- AMORA, A. M.; SANTILLAN, J. R.; MAKINANO-SANTILLAN, M.; MARQUESO, J. T.; GINGO, A. L. Characterizing flood hazards in an alluvial fan during extreme rainfall events using Lidar and numerical modeling. Anais 37º Asian Conference on Remote Sensing. Sri Lanka, 2016. Disponível em: <
https://www.researchgate.net/publication/312043968_CHARACTERIZING_FLOOD_HAZARDS_IN_AN_ALLUVIAL_FAN_DURING_EXTREME_RAINFALL_EVENTS_USING_LIDAR_AND_NUMERICAL_MODELING>
- AMPONSAH, W. et al. Hydrometeorological Characterization of a Flash Flood Associated with Major Geomorphic Effects: assessment of peak discharge uncertainties and analysis of the runoff response. : Assessment of Peak Discharge Uncertainties and Analysis of the Runoff Response. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 12, p. 3063-3077, dez. 2016.
- ARRIGHI, C.; OUMERACI, H.; CASTELLI, F. Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 515-531, 2017. doi: 10.5194/hess-21-515-2017
- ASANO, Y.; UCHIDA, T. Detailed documentation of dynamic changes in flow depth and surface velocity during a large flood in a steep mountain stream, **Jornal of Hydrology**, v. 541 p. 127-135, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.033>
- ASSINE, M. L.; PADOVANI, C. R.; ZACHARIAS, A. A.; ANGULO, R. J.; SOUZA, M. C. **Compartimentação geomorfológica, processos de avulsão fluvial e mudanças de curso do Rio Taquari, Pantanal Mato-Grossense**. Revista Brasileira de Geomorfologia, n. 1, p. 97-108, 2005.

AZMAT, M.; QAMAR, M. U.; HUGGEL, C.; HUSSAIN, E. Future climate and cryosphere impacts on the hydrology of a scarcely gauged catchment on the Jhelum river basin, Northern Pakistan. **Science of The Total Environment**. v. 639, p. 961-976, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.206

BACK, A. J. **Chuvas intensas e chuva para dimensionamento de estruturas de drenagem para o estado de Santa Catarina**. EPAGRI, 193 p., 2013.

BACK, A.J.; POLETO, C. Distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 14, p. 1-23, jan. 2018.

BATES, P. D.; NEAL, J.; SAMPSON, C.; SMITH, A.; TRIGG, M. Chapter 9 - Progress Toward Hyperresolution Models of Global Flood Hazard. In: Risk Modeling for Hazards and Disasters. Elsevier, p. 211-232, 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-804071-3.00009-4

BETSHOLTZ, A.; NORDLÖF, B. **Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS: a case study on Høje river**. Dissertação (Master Thesis of Water Resources Engineering), Lund University, Lund, 2017.

BORGA, M.; STOFFEL, M.; MARCHI, L.; MARRA, F.; JAKOB, M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. **Journal of Hydrology**, vol. 518, p. 194-205, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>

BRASIL. Decreto nº 7257, de 04 de agosto de 2010. Regulamenta a Medida Provisória no 494 de 2 de julho de 2010. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Defesa Civil - SINDEC, sobre o reconhecimento de situação de emergência e estado de calamidade pública, sobre as transferências de recursos para ações de socorro, assistência às vítimas, restabelecimento de serviços essenciais e reconstrução nas áreas atingidas por desastre, e dá outras providências. **Presidência da República Casa Civil Subchefia Para Assuntos Jurídicos**. Brasília, DF, 04 ago. 2010

BROWN, R. A.; PASTERNAK, G. B. Hydrologic and topographic variability modulate channel change in mountain rivers. **Journal Of Hydrology**, v. 510, p. 551-564, mar. 2014.

BRYNDAL, T.; FRAN CZAK, P.; KROCZAK, R.; CABAJ, W.; KOŁODZIEJ, A. The impact of extreme rainfall and flash floods on the flood risk management process and geomorphological changes in small Carpathian catchments: a case study of the Kasiniczanka river (Outer Carpathians, Poland). **Natural Hazards**, v. 88, p. 95-120, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2858-7>

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014, 372 p.

CARON, B.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Determination of the hazard index from the mapping of susceptible areas to flood with the hand model. **Anais...** I Encontro Nacional de Desastres, Porto Alegre, Brasil, 2018.

CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial. v.1. O canal fluvial.** São Paulo: Ed. Edgar Blucher, 1988. 313p.

CHU, X.; STEINMAN, A. Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering.** v. 135, p. 119-124, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(119)

CLARK, C. O. Storage and the unit hydrograph. Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 110, p. 1419-1488, 1945.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336p.

COLLISCHONN, W; KOBAYAMA, M. A hidrologia da cabeça d'água (1): ocorrências e observações no Brasil. Anais XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABHR, 2019. Disponível em: < <http://anais.abrh.org.br/events/107> >. Acesso em: 28 de nov. 2019.

COOK, A.; MERWADE, V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v.377, n.1, p.131-142, 2009. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.015.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massas e enchentes.** Praia Grande, SC, 2017. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres-Naturais/Setorizacao-de-Riscos-Geologicos---Santa-Catarina-4866.html> Acesso em: 20 maio 2019.

CUARTAS, L. A., TOMASELLA, J., NOBRE, A. D., NOBRE, C. A., HODNETT, M. G., WATERLOO, M. J., OLIVEIRA, S. M., RANDOW, R. C. V., TRANCOSO, R., FERREIRA, M. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology.** 462-463, 15-27, 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.12.047

CUNHA, S.F.; SILVA, F.E.O.; MOTA, T.U.; PINHEIRO, M. C. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.20, n.4, p.837-848, 2015.

CUPAK, A.; WAŁĘGA, A.; MICHAŁEC, B. Cluster analysis in determination of hydrologically homogeneous regions with low flow. **Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus**, v. 1, p. 53-63, 2017.

DESTRO, E.; AMPONSAH, W.; NIKOLOPOULOS, E. I.; MARCHI, L.; MARRA, F.; ZOCCATELLI, D.; BORGA, M. Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: Application on an alpine extreme flood event. **Journal of Hydrology**, v. 558, p. 225-237, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.021>

DEPERT, M., JOHNSON, E.D., WEITBRECHT, V. Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. **International Journal of Remote Sensing.** v. 38, p. 2780-2807, 2017. DOI: 10.1080/01431161.2017.1294782.

DOOGE, J. C. I. Linear theory of hydrological systems. Technical Bulletin. United States Department of Agriculture. N° 1468, Washington. 1973.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Solos do estado de Santa Catarina. Arquivo em formato .shp original, 2004.

EMBRAPA. **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 67 p. ((Embrapa Solos. Documentos, 130.)). 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/920267/o-novo-mapa-de-solos-do-brasil-legenda-atualizada>. Acesso em: 10 jan. 2019.

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de SC, 2014. Disponível em: < <http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/> > Acesso em: 20 abr 2019.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 19, p. 243-254, 2014. DOI: 10.21168/rbrh.v19n1.p243-254

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. 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, p. 137-147, 2014. DOI: 10.21168/rbrh.v19n4.p137-147

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. 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, 2014, doi: 10.21168/rbrh.v19n4.p137-147

GARFI, G.; BRUNO, D. E.; CALCATERRA, D.; PARISE, M. Fan morpho-dynamics and slope instability in the Mucone River basin (Sila Massif, southern Italy): significance of weathering and role of land use changes. **Catena**. v. 69, p. 181–196, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.06.003>

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, K. Redução dos desastres naturais: desafio dos geógrafos. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 9, n. 1, 203. doi: 10.5777/ambiencia.2013.01.10

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, p. 61-69, jan. 2017.

GREGORETTI, C. et al. Runoff of small rocky headwater catchments: field observations and hydrological modeling.: Field observations and hydrological modeling. **Water Resources Research**, v. 52, n. 10, p. 8138-8158, out. 2016.

GRIBBIN, J. E. **Introdução à Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2009, 494 p.

GUINDOGA, W.; RWASOKA, D. T.; NHAPI, I.; DUBE, T. Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. **Physics and**

Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. v. 100, p. 371-382, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.05.002>

GUPTA, H.V.S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of hydrologic engineering**, v.4, n.2, p.135-143, 1999.

HDEIB, R. et al. Constraining coupled hydrological-hydraulic flood model by past storm events and post-event measurements in data-sparse regions. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 160-176, out. 2018.

HE, H.; ZHOU, J.; PEART, M. R.; CHEN, J.; ZHANG, Q. Sensitivity of hydrogeomorphological hazards in the Qinling Mountains, China. **Quaternary International**. v. 282, p. 37-47, 2012. DOI: 10.1016/j.quaint.2012.06.002

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, 1007–1019. doi:10.1029/wr003i004p01007, 1967.

IBGE. **Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente**. 2 ed. Brasília: IBGE, 2004. 332f.

IVES J. D.; MESSERLI, B. The Himalayan Dilemma: Reconciling Development and conservation. Routledge, London and New York, 1989, 324 p.

JAFARZADEGAN, K.; MERWADE, V.; SAKSENA, S. A geomorphic approach to 100-year floodplain mapping for the Conterminous United States. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 43-58, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.061>

KAIN, C. L.; RIGBY, E. H.; MAZENGARB, C. A combined morphometric, sedimentary, GIS and modelling analysis of flooding and debris flow hazard on a composite alluvial fan, Caveside, Tasmania. **Sedimentary Geology**, v. 364, p. 286-301, fev. 2018.

KARAGÜL, R.; ÇITGEZ, T. Estimation of peak runoff and frequency in an ungauged stream of a forested watershed for flood hazard mapping. **Journal of Forestry Research**, v. 30, p. 555-564, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0650-5>

KEILER, M.; KNIGHT, J.; HARRISON S. Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v.368, p. 2461–2479, 2010, doi: 10.1098/rsta.2010.0047

KHERADMAND, S.; SEIDOU, O.; KONTE, D.; BATOURE, M. B. B. Evaluation of adaptation options to flood risk in a probabilistic framework. **Journal of Hydrology: Regional Studies** v. 19 p 1-16 out/2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.07.001>

KNEBL, M.R.; YANG, Z.L.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D.R. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**. v. 75, p. 325-336, 2005. DOI: 10.1016/j.jenvman.2004.11.024

KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B.; ROCHA, H.L.; CORSEUIL, C.W.; MALUTTA, S.; GIGLIO, J.N.; MOTA, A.A.; SANTOS, I.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R. Implementation of school catchments network for water resources management of the Upper Negro River region, southern Brazil. In: TANIGUCHI, M.; BURNETT, W.C.; FUKUSHIMA, Y. HAIGH, M.; UMEZAWA, Y. (eds.) *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*. London: Taylor & Francis Group, 2009. p.151-157

KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P. L.; MOTA, A. A. Hidrologia. In: KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; MOTA, A. A (org). **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais, LabHidro**. 3ª ed. Florianópolis: 2011, 242 p.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; FAN, F.M.; CORSEUIL, C.W.; MICHEL, G.P.; DULAC, V.F. Abordagem integrada para gerenciamento de desastre em região montanhosa com ênfase no fluxo de detritos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental** 7, p.31-65, 2018. doi: 10.19177/rgsa.v7e0201831-65

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P.; GOERL, R. F. Relação entre desastres naturais e floresta, **Geonorte**, v. 1, n. 6, p. 17-48, 2012, doi: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1128>

KOKS, E. E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T. G.; BOTZEN, W. J. W. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. **Environmental Science & Policy**, vol. 47, p. 42-52, 2015. doi: 10.1016/j.envsci.2014.10.013

KUKSINA, L. V.; GOLOSOV, V. N.; KUZNETSOVA, Y. S. Cloudburst Floods in Mountains: State of Knowledge, Occurrence, Factors of Formation. **Geography and Natural Resources**, vol. 38, p. 20-29, 2017, doi: <https://doi.org/10.1134/S1875372817010036>

LANCASTER, J. T.; SPITTLER, T. E.; SHORT, W. R. Using Digital Geologic Maps to Assess Alluvial-Fan Flood Hazards. SOLLER, D. R. (eds) *Digital Mapping Techniques '10—Workshop Proceedings*. California: U.S. Geological Survey Open-File Report 2012–1171, 170 p., 2012. YUCEL, I.; KESKIN, F. Assessment of flash flood events using remote sensing and atmospheric model-derived precipitation in a hydrological model. In: *HydroClimatology: Variability and Change*, 2011, Melbourne. **Anais...** p. 245–251.

LIZ, M. S. M. **Influência do rio caveiras nas inundações dos rios Carahá e Ponte Grande**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, 2018.

MALUTTA, S. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do rio Negrinho -SC com o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MANFREDA, S.; NARDI, F.; SAMELA, C.; GRIMALDI, S.; TARAMASSO, A. C.; ROTH, G.; SOLE, A. Investigation on the use of geomorphic approaches for the delineation of flood prone areas. **Journal of Hydrology**. v. 517, p. 863-876, 2014. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.009

MANFREDA, S; PIZARRO, A; MORAMARCO, T; CIMORELLI, Li; PIANESE, D; BARBETTA, S. Potential advantages of flow-area rating curves compared to classic stage-discharge-relations. **Journal of Hydrology**. v. 585, p. 124752, jun. 2020.

MARTÍNEZ-GOMARIZ, E.; GÓMEZ, M.; RUSSO, B. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. **Natural Hazards**, vol. 82, p. 1259-1278, 2016, doi: 10.1007/s11069-016-2242-z

MASCARO, G.; PIRAS, M.; DEIDDA, R.; VIVONI, E. R. Distributed hydrologic modeling of a sparsely monitored basin in Sardinia, Italy, through hydrometeorological downscaling, **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 4143–4158, 2013, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-17-4143-2013>

MATA, W. J. M. Análisis cuantitativo del relieve en cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo “El Ávila” (estado Vargas, Venezuela) y su significado hidrogeomorfológico. **Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía**, v. 2016, p. 25-42, 2016, doi: <https://doi.org/10.14350/rig.47722>

MAZZORANA, B.; COMITI, F.; FUCHS, S. A structured approach to enhance flood hazard assessment in mountain streams. **Natural Hazards**, v. 67, p. 991-1009, 2013, doi: 10.1007/s11069-011-9811-y

MCGRATH, H., BOURGON, J.-F., PROULX-BOURQUE, J.-S., NASTEV, M., & ABO EL EZZ, A. A comparison of simplified conceptual models for rapid web-based flood inundation mapping. **Natural Hazards**, v. 93(2), p. 905–920, 2018, doi: 10.1007/s11069-018-3331-y

MERWADE, V.; COOK A.; COONROD, J. GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping, **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 1300-1311, 2008, doi: 10.1016/j.envsoft.2008.03.005

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology ‘Kluwer’ Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. ISBN 1-4020-1132-6, 2003.

MOLLAEI, Z., MADANI, H., MOGHIMZADEH, H., DAVARY, K., AND FARIDANI, F. (2016). Predicting Avulsion Potential On Alluvial Fans Using FLO-2D Model – A Case Study, in: 9th World Congress of EWRA Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities, EWRA, Istanbul, Turkey, p. 12.

MOLLAEI, Z.; DAVARY, K.; HASHEMINIA, S. M.; FARIDHOSSEINI, A.; POURMOHAMAD, Y. Enhancing flood hazard estimation methods on alluvial fans using an integrated hydraulic, geological and geomorphological approach. **Natural Hazards Earth System Sciences**. v. 18, p. 1159-1171, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1159-2018>

MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; SEVERO, L. D.; CUARTAS, L. A.; NOBRE, A. D. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 200-208, 2016, doi: <https://www.scielo.br/pdf/rbrh/v21n1/2318-0331-rbrh-21-1-200.pdf>

MONTE, B. E. O.; ZANANDREA, F.; ABATTI, B. H.; TAVARES, B. H.; SILVEIRA, A. L. L. Capacidade do modelo HAND na representação de uma mancha de inundação comparado ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D. Anais XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABHR, 2019. Disponível em: < <http://anais.abrh.org.br/events/107>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

MONTEIRO, L. R.; KOBİYAMA, M. Influências da distribuição temporal de precipitação no mapeamento de inundação. **Revista REGA – Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 11, n. 2, p. 25-35, 2014.

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

MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2011. 422 p.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, p. 885-900, 2007, doi: <https://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeleval.pdf>

MOTA, A. A.; GRISON, F.; GIGLIO, J. N.; KOBİYAMA, M. Instalação de uma pequena bacia experimental florestal: estudo de caso da bacia do Rio Araponga. **Eng Sanit Ambient**, v. 22, p. 73-80, 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522016154610

MOTEVALLI, A.; VAFAKHAH, M. Flood hazard mapping using synthesis hydraulic and geomorphic properties at watershed scale. **Stochastic Environmental Research and Risk**, v. 30 p. 1889-1900. out/2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1305-8>

MOYA QUIROGA, V.; KURE, S.; UDO, K.; MANO, A. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. **Revista Iberoamericana del Agua**, V. 3 P. 25-33. Jun/2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>

MULUNGO, H.E. **Estudo de inundação na bacia do campus da UFSC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

NIKOLOPOULOS, E. I. et al. Sensitivity of a mountain basin flash flood to initial wetness condition and rainfall variability. **Journal Of Hydrology**, v. 402, n. 3-4, p. 165-178, maio 2011.

NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., MOMO, M. R., SEVERO, D. L., PINHEIRO, A., NOBRE, C. A. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 320-333, 2015, doi: 10.1002/hyp.10581

NOBRE, A.D., CUARTAS, L.A., HODNETT, M., RENNÓ, C.D., RODRIGUES, G., SILVEIRA, A., WATERLOO, M., SALESKA, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**. 404, 13–29, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051

NORTESUL. **RESGATE DE TRILHEIROS EM CÂNIONS EM PRAIA GRANDE**. 2019. Disponível em: <http://www.jornalnortesul.com.br/seguran%C3%A7a/resgate-de-trilheiros-em-c%C3%A2nions-de-praia-grande-1.2117341>. Acesso em: 13 jan. 2019.

O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing** 28 (3): 323 – 44, 1984, [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0).

PAIXÃO, M. A.; KOBİYAMA, M. Relevant parameters for characterizing mountain rivers: a review. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 24, p. 1-13, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.241920180115>

PALHARES, J. C. P.; RAMOS, C.; KLEIN, J. B.; LIMA, J. M. M.; MULLER, S.; CESTONARO, T. Medição da Vazão em Rios pelo Método do Flutuador. 2007. Acesso em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58075/1/CUsersPiazzonDocuments455.pdf>

PANDOLFO, C.; et al. Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-ROM. Disponível em: <http://www.ciram.epagri.sc.gov.br>

PASQUIER, U.; HE, Y.; HOOTON, S.; GOULDEN, M.; HISCOCK, K. M. An integrated 1D–2D hydraulic modelling approach to assess the sensitivity of a coastal region to compound flooding hazard under climate change. **Natural Hazards**. p. 1-23. Ago/2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3462-1>

PELLETIER J.D.; MAYER L.; PEARTHTREE P.A.; HOUSE P.K.; DEMSEY K.A.; KLAN AN J.E.; VINCENT K.R. An integrated approach to flood hazard assessment on alluvial fans using numerical modeling, field mapping and remote sensing. **GSA Bulletin**, v. 117, p. 1167–1180, 2005.

PINOS, J.; TIMBE, L. Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. **Water Science and Engineering**, v. 12, p. 11-18, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>

PREFEITURA MUNICIPAL DE PRAIA GRANDE. **Avaliação de danos - AVADAN**. Praia Grande, SC, 2007.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PRAIA GRANDE. **Avaliação de danos - AVADAN**. Praia Grande, SC, 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PRAIA GRANDE. **Avaliação de danos - AVADAN**. Praia Grande, SC, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PRAIA GRANDE. **Avaliação de danos - AVADAN**. Praia Grande, SC, 2011.

PRENNER, D.; HRACHOWITZ, M.; KAITNA, R. Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. **Science of The Total Environment**, v. 658, p. 958-972, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.206>

QUIROGA, D. R. A.; GIL, V.; CORONATO, A. Quantitative geomorphology applied to fluvial dynamic in Aviles and Moneta basins, Tierra Del Fuego, Southern Argentina. **Environmental Earth Sciences**, v. 188, p. 1-10, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6494-z>

RAHMATI, O., KORNEJADY, A., SAMADI, M., NOBRE, A. D., MELESSE, A. M. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. **Environmental Modelling & Software**. v. 52, p. 1-12, 2018, doi: [10.1016/j.envsoft.2018.01.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.004)

REISENBÜCHLER, M. et al. An integrated approach for investigating the correlation between floods and river morphology: a case study of the Saalach river, Germany. : A case study of the Saalach River, Germany. **Science Of The Total Environment**, v. 647, p. 814-826, jan. 2019.

RENNÓ, C. D., NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J., WATERLOO, M. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sens. Environ.**, v. 112, p. 3469–3481, 2008, doi: [10.1016/j.rse.2008.03.018](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018).

REVELLINO, P.; HUNGR, O.; GUADAGNO, F. M.; EVANS, S. G. Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy. **Environmental Geology**, v. 45, p. 295-311, 2004, doi: [10.1007/s00254-003-0885-z](https://doi.org/10.1007/s00254-003-0885-z)

RONSANI, G. **Praia Grande, Cidade dos Canyons-180 anos de história**. Praia Grande: Do autor, 1999, 171p.

SANTOS, I. Hidrometria Aplicada. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 2001. 372p.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19-29, 2005, doi: [10.21168/rbrh.v10n4.p19-29](https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p19-29)

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005, doi: [10.21168/rbrh.v10n4.p5-18](https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18)

SATTAR, A.; GOSWAMI, A.; KULKARNI, A. V. Hydrodynamic moraine-breach modeling and outburst flood routing – A hazard assessment of the South Lhonak lake, Sikkim. **Science of the Total Environment**, v. 668, p. 362-378, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.388>

SCHEIBE, F. et al. **Atlas ambiental da Bacia do rio Araranguá: Santa Catarina – Brasil** – Florianópolis: UFSC: Cidade Futura, 2010. 64 p.

SCHEINERT, C.; WASKLEWICZ T.; STALEY, D. Alluvial Fan Dynamics – Revisiting the Field, **Geography Compass**, v. 6, p. 752–775, 2012, doi: 10.1111/gec3.12004

SDS – Secretaria de Desenvolvimento Sustentável. Aerofotogrametria 2010. Disponível em: <http://sigsc.sds.sc.gov.br/download/index.jsp> Acesso em: 20 jan. 2019.

SEHNEM, G.; RODRIGUES, G. P.; CAMARGO, G. I. L.; CORSEUIL, C.; A´QUINO, C. A. (2015). Análise da morfometria de bacias hidrográficas sujeitas a inundações na região sul de Santa Catarina – Brasil. **Anais... XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**.

SLAYMAKER, O.; EMBLETON-HAMANN, C. Advances in global mountain geomorphology. **Geomorphology**, v. 308, p. 230-264, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.016>

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, vol. 4, p. 423-428, 2002, doi: 10.1016/S1462-0758(02)00032-8

STEPHENSON, D. B. Use of the “odds ratio” for diagnosing forecast skill. **Weather and Forecasting**, v.15, n.2, p.221-232, 2000. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)0152.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(2000)0152.0.CO;2).

STOCK, J.; DIETRICH, W. E. Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature, **Water Resources Research**, v. 9, n. 4, p. 1-25, 2003, doi: 10.1029/2001WR001057

STOFFEL, M.; WYŻGA, B.; MARSTON, R. A. Floods in mountain environments: A synthesis. **Geomorphology**, v. 272. p. 1-9, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.008>

STRIEDER, A. J.; BUFFON, S. A.; QUADROS, T. F. P.; OLIVEIRA, H. R. Predicting debris flow susceptible areas through GIS modelling in Aparados da Serra (Brazil). **Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II**, v. 60, p. 89-97, 2008, doi: 10.2495/DEB080101

STYAWAN, A. P.; RAHARDJO, A. P.; SUJONO, J. Warning Time Analysis of Nasiri River Flash Flood due to Several Possible Natural Dam Break Events. **Journal of the Civil Engineering Forum**, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2018, doi: <https://doi.org/10.22146/jcef.27241>

SYAFRI, R. R.; HADI, M. P.; SUPRAYOGI, S. Hydrodynamic Modelling of Juwana River Flooding Using HEC-RAS 2D. Anais 2º International Conference on Geography and Education, 2020, disponível em: < <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/412/1/012028>>

TAO, J.; BARROS, A. P. Coupled prediction of flood response and debris flow initiation during warm- and cold-season events in the Southern Appalachians, USA. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 367-388, 2014, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-18-367-2014>

- TARBOTON, D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water resources research**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997, doi: 10.1029/96WR03137
- TARBOTON, D.G. Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM). Utah Water Research Laboratory, Utah State University. <http://hydrology.usu.edu/taudem>, 2016.
- TAURO F., SELKER, J.; VAN DE GIESEN, N.; ABRATE, T.; UIJLENHOET, R.; PORFIRI, M.; MANFREDA, S.; CAYLOR, K. K.; MORAMARCO, T.; BENVENISTE, J.; CIRAOLO, G.; ESTES, L.; DOMENEGHETTI, A.; PERKS, M. T.; CORBARI, C.; RABIEL, E.; RAVAZZANI, G.; BOGENA, H.; HARFOUCHE, A.; BROCCAI, L.; MALTESE, A.; WICKERT, A.; TARPANELLI, A.; GOOD, S.; LOPEZ ALCALA, J. M.; PETROSELLI, A.; CUDENNEC, C.; BLUME, T.; HUT, R.; GRIMALDIA, S. Measurements and observations in the XXI century (MOXXI): Innovation and multi-disciplinarity to sense the hydrological cycle. **Hydrological Sciences Journal**. v. 63, p. 169-196, 2018. DOI: 10.1080/02626667.2017.1420191
- TAZIOLI, A. Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter. **Hydrological Sciences Journal**. v. 56, p. 1314-1324, 2011. DOI: 10.1080/02626667.2011.607822
- TENFEN, M. A. M. **Áreas de risco geoambiental em Praia Grande/SC: análise do evento catastrófico de março de 2007**. Monografia (Especialização em Geografia com ênfase em Estudos Regionais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2008.
- TENG, J., JAKEMAN, A. J., VAZE, J., CROKE, B. F. W., DUTTA, D., KIM, S. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**. v. 90, p. 201-216, 2017, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.01.006
- TRIGILA, A.; IADANZA, C.; MUNAFÒ, M.; MARINOSCI I. Population Exposed to Landslide and Flood Risk in Italy. **Engineering Geology for Society and Territory**, vol. 5, p. 843-848, 2015, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_163
- TSCHIEDEL, A. F.; PAIVA, R. C. D. Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. **RBRH**. v. 23. p. 1-17 jul/2018. DOI: 10.1590/2318-0331.231820170074
- TU, H.; WANG, X.; ZHANG, W.; PENG, H.; KE, Q.; CHEN, X. Flash Flood Early Warning Coupled with Hydrological Simulation and the Rising Rate of the Flood Stage in a Mountainous Small Watershed in Sichuan Province, China. **Water**. v. 12, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12010255>
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2005, 680 p.
- TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre, RS: ABRH/ RHAMA, 2007, 389 p.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

USACE – US Army Corps of Engineers Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Version 4.3, 2018. 640 p.

USACE – US Army Corps of Engineers. **Combined 1D and 2D modeling with HEC-RAS**. 2014. 130 p.

USACE – US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River Analysis System, **2D Modeling User's Manual**, Version 5.0. 2016. 960 p.

USDA-SCS. **National Engineering Handbook**, Section 4 - Hydrology. Washington, D.C, 1985.

VENTRA, D., CLARKE, L.E. Geology and geomorphology of alluvial and fluvial fans: Current progress and research perspectives. **Geological Society**, London, Special Publications, v. 440, p. 1-21, 2018, doi: <https://doi.org/10.1144/SP440.16>.

VIANINI NETO, L. **Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

VIVIROLI, D.; WEINGARTNER, R.; MESSERLI, B. Assessing the Hydrological Significance of the World's Mountains. **Mountain Research and Development**, v. 23(1), p. 32-40, 2003, doi: [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2003\)023\[0032:ATHSOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023[0032:ATHSOT]2.0.CO;2)

WALEGA, A.; AMATYA, D. M.; CALDWELL, P; MARION, D.; PANDA, S. Assessment of storm direct runoff and peak flow rates using improved SCS-CN models for selected forested watersheds in the Southeastern United States. **Journal Of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, p. 100645, fev. 2020.

WEINGARTNER, R.; BARBEN, M.; SPREAFICO, M. Floods in mountain areas — an overview based on examples from Switzerland. **Journal of Hydrology**, v. 282, p. 10-24, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00249-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00249-X)

WMO - World Meteorological Organization. **The Role of Land-Use Planning in Flood Management**, 2016, 80 p. Disponível em: https://www.floodmanagement.info/publications/tools/APFM_Tool_07.pdf. Acesso em: 20 maio 2019.

WOHL, E. **Mountain rivers revisited**. Washington: American Geophysical Union, 2010, vol. 19, p. 576, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/WM019>

YU, D.; LANE, S. N. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects. **Hydrological Processes**, v.20, n.7, p.1541–1565, 2006. doi:10.1002/hyp.5935.

YUAN, W.; LIU, M.; WAN, F. Calculation of Critical Rainfall for Small-Watershed Flash Floods Based on the HEC-HMS Hydrological Model. **Water Resources Management**. v. 33, p. 2555–2575, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02257-0>

ZHENG, X., D.G. TARBOTON, D.R. MAIDMENT, Y.Y. LIU, AND P. PASSALACQUA. River Channel Geometry and Rating Curve Estimation Using Height above the Nearest Drainage. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 54, p. 785-806, 2018, doi: 10.1111/1752-1688.12661.

APÊNDICE A – Levantamento topobatimétrico realizado nos rios Molha Coco e Malacara

As figuras abaixo mostram o levantamento da topobatimetria de 18 seções, localizadas nos rios Malacara e Molha Coco.

