



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Análise de inundações em bacias montanhosas no Sul do Brasil por meio de monitoramento e modelagem

Fernanda Dagostin Szymanski<sup>1</sup>, Sofia Melo Vasconcellos<sup>2</sup>, Masato Kobiyama<sup>3</sup>, Marcos Ricardo Giehl<sup>4</sup>, Cláudia Weber Corseuil<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Engenheira Ambiental. Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, Brasil, [fernandadagostin@gmail.com](mailto:fernandadagostin@gmail.com). <sup>2</sup> Doutoranda do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), [sofia.vasconcellos@ufrgs.br](mailto:sofia.vasconcellos@ufrgs.br). <sup>3</sup> Professor, Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil, [masato.kobiyama@ufrgs.br](mailto:masato.kobiyama@ufrgs.br). <sup>4</sup> Aluno, Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Araranguá, SC, Brasil, [mrhiehl@gmail.com](mailto:mrhiehl@gmail.com). <sup>5</sup> Professor. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Araranguá, SC, [claudia.weber@ufsc.br](mailto:claudia.weber@ufsc.br)

Artigo recebido em 03/08/2021 e aceito em 04/04/2022

### RESUMO

Bacias hidrográficas montanhosas são mais propensas aos perigos naturais, devido à ocorrência de eventos hidrológicos de alta intensidade e às características geomorfológicas destes locais, como o relevo declivoso e a presença de leques aluviais. O presente estudo teve como objetivo avaliar a inundação em bacias hidrográficas montanhosas no sul do Brasil, por meio de monitoramento e modelagem com HEC-HMS e HEC-RAS 2D, visando o mapeamento de perigo de inundação. Realizou-se um levantamento dos registros históricos de inundação, ocorridos em 2007 nas regiões de leque aluvial dos rios Molha Coco e Malacara. O HEC-HMS foi calibrado e validado com dados monitorados de vazão. Os hidrogramas com as vazões máximas simuladas pelo HEC-HMS foram propagados no modelo HEC-RAS 2D. Com essas vazões foram gerados mapas de profundidades, velocidades e índice de perigo de inundação para os períodos de retorno de 5, 100 e 200 anos. 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 de magnitude elevada.

Palavras-chave: Rio Montanhoso. Mapeamento de perigo. HEC-RAS 2D. Monitoramento.

## Flood analysis in mountain basins in southern Brazil through monitoring and modeling

### ABSTRACT

Mountain basins are more prone to natural hazards, due to occurrence of highly-intensive hydrological events, and local geomorphic characteristics, such as steep hillslopes and the alluvial fans. The present study aimed to assess the flood hazard degree in mountain basins in southern Brazil, through monitoring and modeling with HEC-HMS and HEC-RAS 2D. A survey of the historical flood records, which took place in 2007 in the alluvial fan regions of the Molha Coco and Malacara rivers, was carried out. The HEC-HMS was calibrated and validated with monitored flow data. The hydrographs with the maximum flow rates simulated by the HEC-HMS were propagated in the HEC-RAS 2D model. With these flows, maps of depth, velocity and flood hazard index were generated for the return periods of 5, 100 and 200 years. Potential hazard maps show that the highest value of the flood hazard index was found within river channels and at avulsion sites. In these places, there are inns, restaurants and residences, which can generate damage and expose people to the flood hazard with high magnitude.

Keywords: Mountain river. Hazard mapping. HEC-RAS 2D. Monitoring.

## Introdução

Os ambientes montanhosos são conhecidos como reservatórios naturais de água, pois uma quantidade substancial é transportada das áreas montanhosas para as planícies adjacentes, por meio de vastos sistemas fluviais (Viviroli et al., 2003). A resposta hidrológica dos rios montanhosos pode ser desencadeada por vários fatores, como: a temperatura, precipitação, solo, rochas, tipo de vegetação, declive, entre outros. Embora a água seja vital à vida, ela também traz perigos, atuando como um elemento destrutivo na forma de inundações. Nos rios montanhosos, as inundações podem ser decorrentes do gradiente tipicamente íngreme dos canais, tipo de precipitação, precipitação sobre neve, derretimento de neve ou falhas em barragens naturais ou artificiais (Weingartner et al. 2003; Stoffelet al. 2016).

As bacias montanhosas, conforme Kobiyama et al. (2018), podem ser caracterizadas qualitativamente por apresentarem grandes variações de altura entre o topo das montanhas e a planície, declividade acentuada das encostas e ocorrência predominante de precipitações orográficas. Esses ambientes são importantes para a manutenção dos ecossistemas com presença de nascentes, sendo, portanto, vital a sua proteção, para que todos os processos que ocorrem a jusante, possam acontecer de forma sustentável (Kobiyama et al., 2020).

Nessas bacias há formação de leques aluviais, que são características comuns nas bordas dos vales (geralmente vales de rios ou vales controlados por falhas) adjacentes às bacias declivosas. A morfometria do leque aluvial é o resultado direto do transporte de sedimentos da bacia para o vale (Scheineret al., 2012). Nesses locais, as inundações, geralmente, são muito perigosas, uma vez que, o fluxo surge do ápice do leque em alta velocidade, transportando uma grande quantidade de detritos (Garfiet al., 2007). Ainda, eventos dessa natureza podem desencadear fenômenos de avulsão, que são responsáveis pela formação de novos canais, durante a ocorrência de uma inundação, potencializando o perigo da ocupação humana nesses locais (Lancaster et al., 2012; Ventra e Clarke, 2018) e, conseqüentemente, causando desastres naturais.

Os rios montanhosos são muito procurados para diferentes atividades, como: recreação, práticas de esportes radicais, ecoturismo, fonte de água para abastecimento e geração de energia

elétrica (Paixão e Kobiyama, 2019). No Brasil, na região do extremo sul de Santa Catarina e Nordeste do Rio Grande do Sul, as áreas montanhosas são muito procuradas para turismo devido à presença dos Parques Nacionais de Aparados da Serra e Serra Geral. O turismo tem ajudado a desenvolver a região, melhorado as condições de vida da população local e gerado mais renda para os municípios do entorno desses dois parques. No entanto, esses ambientes, de acordo com Strieder et al. (2018), são propensos à ocorrência de deslizamentos de terra, fluxos de detritos e inundações bruscas. Além disso, na planície adjacente às montanhas, onde está localizado o município de Praia Grande (SC) há relatos históricos de desastres naturais. De acordo com Ronsani (1999), nos anos de 1903, 1911, 1974, 1995 e 2007 ocorreram vários eventos extremos de precipitação e de inundações bruscas, que causaram muitos danos à população, com perdas de vidas humanas. Ainda mais recente, esse município sofreu desastres hidrológicos duas vezes em julho de 2020, no meio de pandemia de COVID-19, o que caracterizou um tipo de multi-desastres (Paixão et al., 2021).

Nesse aspecto, para o gerenciamento dos perigos naturais relacionados às inundações bruscas, segundo Pelletier et al. (2005) é muito importante identificar bacias hidrográficas propensas às eventos torrenciais, a fim de fornecer maior proteção às comunidades ameaçadas (Pelletier et al., 2005). Assim, o mapeamento das áreas de perigo de inundação pode servir como medida de proteção, para a população que vive e explora locais para o turismo. Esse mapeamento pode auxiliar no gerenciamento de desastres naturais, uma vez que, permite identificar locais inadequados para determinados usos e ocupações (WMO, 2016).

Segundo Monteiro et al. (2021), um mapa de perigo de inundação representa a distribuição espacial das consequências potenciais das inundações, que podem ser quantificadas em função da intensidade e probabilidade de ocorrência de uma inundação. Sendo a intensidade da inundação caracterizada pela força da água que pode de desestabilizar pessoas, veículos e edificações. Existem diferentes métodos para elaborar mapas de perigo de inundações, os quais levam em consideração a profundidade da lâmina d'água e a velocidade de propagação do fluxo. Koks et al. (2015) e Bates et al. (2018) propuseram métodos para a elaboração de mapas de perigo, que

consideram somente a altura da lâmina d'água. Já Stephenson (2002) propôs um índice de perigo de inundação, obtido pelo produto da profundidade pela velocidade da água. Estudos tais como os de Stephenson (2002) e Martínez-Gomariz et al. (2016) consideram a velocidade e a profundidade da água, as variáveis mais importantes para quantificar os níveis de perigo na composição de um índice de perigo.

Em situações de ocorrência de inundações, Martínez-Gomariz et al. (2016) e Arrighi et al. (2017) destacam que, as fatalidades acontecem por causa do comportamento da população em relação a um evento de inundação, como por exemplo, atravessar rios com vazões muito altas, caminhar ou dirigir em ruas inundadas no momento de ocorrência do evento. Assim, o mapeamento de perigo de inundação, além auxiliar no planejamento de uso e ocupação do solo em regiões montanhosas, permite instruir as pessoas sobre os locais de perigo, servindo como uma ferramenta para gestão do turismo e recreação de forma segura (Mazzorana et al., 2013).

Um mapa de perigo pode ser elaborado com base em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, os quais permitem gerar e propagar hidrogramas de vazões máximas em bacias hidrográficas (Monteiro e Kobiyama, 2013). Um dos modelos hidrodinâmicos muito utilizado para simular a propagação do escoamento é o HEC-RAS (Hydrological Engineering Center - River Analysis System), desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE, 2016). Esse modelo tem sido amplamente utilizado para o mapeamento de inundação e de perigo de inundação em várias partes do mundo (Motevallie Vafakah, 2016; Kheradmand et al., 2018; Pasquier et al., 2018) e no Brasil (Tschiedel e Paiva, 2018; Monteiro et al., 2021). Em bacias montanhosas o HEC-RAS foi utilizado para o mapeamento de inundação Sattar et al., (2019), Syafri et al., (2020), Pinos e Timbe (2019) e Amora et al., (2016).

No entanto, estudos hidrológicos com enfoque em desastres naturais e mapeamento de perigo de inundação ainda são raros na região sul do Brasil, especialmente nas regiões caracterizadas com ambiente montanhoso. Portanto, é muito importante realizar 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. Dessa maneira, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a inundação em bacias montanhosas no sul do Brasil, por meio de monitoramento e modelagem com HEC-RAS 2D, visando o mapeamento de índice de perigo.

## Material e métodos

### Área de Estudo

A área de estudo compreende duas pequenas bacias hidrográficas montanhosas, chamadas de Molha Coco (20,0 km<sup>2</sup>) e Malacara (40,5 km<sup>2</sup>). Essas bacias fazem parte da bacia hidrográfica do rio Mampituba (1940,0 km<sup>2</sup>), que tem parte de sua área no extremo sul de Santa Catarina e outra no norte do Rio Grande do Sul, sendo o rio Mampituba o limite entre os dois estados (Figura 1). As cabeceiras dessas bacias estão localizadas no planalto da Serra Geral, em áreas de domínio de dois Parques Nacionais, denominados de Aparados da Serra - PNAS (102,50 km<sup>2</sup>) e Serra Geral - PNSG (173,00 km<sup>2</sup>).

As encostas dos morros na bacia do rio Mampituba são bastante íngremes, apresentando grande amplitude altimétrica (variação de 10 a 1000 m), com vales fortemente encaixados, que se abrem na planície formando depósitos de leques aluviais. Os vales são formados por rochas basálticas, onde predomina uma vegetação característica de Floresta Ombrófila Mista (Mata Atlântica), também conhecida como Floresta de Araucárias. Já as partes mais baixas, são formadas por sedimentos basálticos grosseiros (cascalhos, seixos e matacões), arenosos e argilosos (Scheibet et al., 2010).

Em relação aos solos, de maneira geral, a área de estudo é constituída por: Neossolos Quartzarênicos hidromórficos típicos (65%), Cambissolos Húmicos (30%) e Gleissolos Melânicos Eutróficos (5%) (EMBRAPA, 2004).

O clima nas partes mais altas das bacias (planalto da Serra Geral), segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb (temperado mesotérmico úmido) e, nas partes mais baixas, predomina o Cfa (subtropical mesotérmico úmido). Para as bacias da região sul de Santa Catarina, Back e Poletto (2018) encontraram valores de precipitação variando de 1500 mm.ano<sup>-1</sup> a 1800 mm.ano<sup>-1</sup>.

As regiões montanhosas no sul do Brasil são muito exploradas pelo ecoturismo, devido à presença dos PNAS e PNSG, com a presença de

vários cânions, que foram denominados de Itaimbezinho, Fortaleza, Índios Coroados e Malacara (Mazzalli et al., 2021). O ecoturismo ajuda a desenvolver a região, melhora as condições de vida da população local e gera mais renda para os municípios do entorno dos parques. No entanto, é necessário o mapeamento de perigo de inundação

da região para que as atividades turísticas possam ocorrer de maneira segura, sem expor os visitantes aos perigos em situações de eventos extremos de chuva.

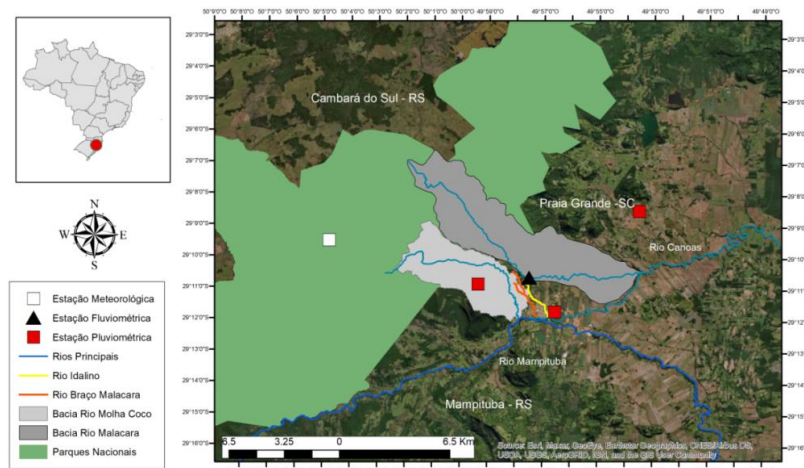


Figura 1. Localização das bacias dos rios Molha Coco, Malacara, Mampituba e do Parque Nacional de Aparados da Serra (PNAS) e Parque Nacional da Serra Geral (PNSG).

#### *Dados do evento de inundação de 2007*

Para o mapeamento de perigo de inundação nas bacias dos rios Molha Coco e Malacara selecionou-se o evento ocorrido em 2007. Esse evento 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. No dia anterior, a precipitação acumulada foi de 86 mm, que somada aos 211 mm, totalizou 297 mm em 24 horas. Assim, o evento foi escolhido devido à magnitude, por ser relativamente recente, estar ainda na memória da população e por ter registros históricos dos danos e prejuízos causados à população.

Os dados da inundação de 2007 foram extraídos a partir de várias fontes: dos relatórios de avaliação de danos (AVADANS) da prefeitura municipal de Praia Grande, acervo fotográfico, livros, trabalhos científicos, entre outros. Com base nessas informações realizou-se um levantamento em campo dos locais inundados (latitude, longitude e altitude), usando um GPS de navegação e uma trena para medir a altura da lâmina d'água desse

evento. Além disso, aplicou-se um questionário às pessoas da comunidade de Praia Grande que vivenciaram esse evento, a fim de complementar as informações levantadas. Os dados obtidos foram utilizados como referência para ajustar a mancha de inundação, simulada no modelo HEC-RAS 2D.

#### *Dados hidrológicos*

Foram utilizados dados de precipitação de 3 estações distribuídas na bacia do rio Mampituba, e dados de vazão medidos na estação fluviométrica instalada na porção mais baixa da bacia do rio Malacara (altitude de 74 m). Essas estações são monitoradas pelas instituições: (i) Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), (ii) Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), (iii) Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN) da Universidade Feral do Rio Grande do Sul (UFRGS); e (iv) Laboratório de Água e Energia (HidroEN) da Universidade Federal de Santa Catarina. A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam as características dessas estações e a distribuição espacial na área de estudo, respectivamente.

**Tabela 1.**Características das estações pluviométricas, fluviométrica e meteorológica.

| Responsável          | Tipo | Local | Lat.    | Long.   | Alt.<br>(m) | Intervalo | Período de dados |
|----------------------|------|-------|---------|---------|-------------|-----------|------------------|
| ANA (02949001)       | P    | PG    | -29,20° | -49,96° | 60          | 1 dia     | 1977 a presente  |
| GPDEN-UFRGS          | M    | Camb  | -29,16° | -50,08° | 917         | 10 min.   | 2017 a presente  |
| CEMADEN<br>(2949013) | P    | PG*   | -29,18° | -49,99° | 492         | 10 min.   | 2015 a presente  |
| CEMADEN<br>(2949014) | P    | PG*   | -29,14° | -49,89° | 38          | 10 min.   | 2014 a presente  |
| HidroEN-UFSC         | F    | PG*   | -29,18° | -49,96° | 74          | 10 min.   | 2019 a presente  |

P- Pluviômetro, M-Meteorológica, F-Fluviométrica, Camb. - Cambará do Sul (RS), PG-Praia Grande (SC). Fonte: dos autores.

#### *Levantamento topobatimétrico e correção do MDE*

Com objetivo de representar os rios Molha Coco e Malacara no MDE de 1m de resolução (SDS, 2010), foi realizado um levantamento topobatimétrico nos trechos dos rios inseridos nos leques aluviais. Nesse levantamento foram medidas 8 seções transversais no rio Molha Coco em um trecho de 7 km e 10 seções no rio Malacara num trecho de 13 km, com um GPS RTK, pelo método de posicionamento cinemático, com correção em tempo real. Essas seções foram determinadas levando em consideração vários aspectos, como: mudanças na declividade do canal principal, o fácil acesso ao local e os meandros acentuados, conforme recomendam Merwade et al. (2008).

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 para ser 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 2 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. A descrição mais detalhada desses locais encontra-se em Szymanski et al. (submetido).

#### *Medição de vazão no rio Malacara*

Na bacia do rio Malacara foi instalada uma estação hidrossedimentológica (réguas

linimétricas, sensor de nível e de turbidez) próximo à ponte na localidade de Alvorada para monitorar o nível do rio. As vazões mais baixas foram determinadas à Vau, usando um molinete hidrométrico. Já para as vazões mais altas foi necessário utilizar um objeto flutuante. Além disso, foi necessário realizar a extrapolação da curva-chave para o cálculo das vazões ainda maiores, devido ao período de medições de vazão com cotas mais elevadas. Para a extrapolação da curva-chave foi utilizado a equação de Manning. O coeficiente de Manning (n) adotado variou de 0,04 a 0,07, definido com base em Chow (1959), levando-se em consideração as características do leito e das margens do rio Malacara.

#### *Precipitação de projeto*

O cálculo da precipitação de projeto foi realizado por meio da equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) determinada por Back (2013) para a região de Praia Grande (SC).

$$i = \frac{974,22TR^{0,211}}{(t+8,92)^{0,699}} \quad (1)$$

onde i é a intensidade máxima da precipitação; TR é o tempo de retorno; e t é a duração.

Para o cálculo do valor de i, foi utilizada a estação da ANA (código 02949001), monitorada pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão de Santa Catarina (EPAGRI). Para determinação dos hietogramas foram utilizados os valores de TR de 5, 100 e 200 anos, com a finalidade de identificar as regiões atingidas pela ocorrência

dessas vazões máximas. Para determinar a distribuição temporal da intensidade da precipitação foi considerada a curva com 50% de frequência do 3º quartil de Huff (1967). Segundo Monteiro e Kobiyama (2014), essa determinação é muito importante no estudo de inundação.

#### *Determinação da vazão máxima para diferentes períodos de retorno com HEC-HMS*

Para determinar a vazão máxima ocorrida no evento de 2007 foi utilizado o modelo hidrológico HEC-HMS (USACE, 2018). Neste, o hidrograma é obtido, por meio de um método que determina a precipitação efetiva, juntamente com uma função de transferência, que realiza a distribuição temporal do volume total de precipitação efetiva (Cunha et al., 2015).

Para estimar a precipitação 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).

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 0,5 m da SDS (2010). 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 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 obtiveram-se diversos valores de CN, sendo adotado o valor de CN obtido pela média ponderada.

A retenção potencial de água no solo é determinada em função do CN, que foram determinados para uma condição média de umidade antecedente do solo (CN-II), que leva em consideração a altura pluviométrica acumulada em 5 dias antecedentes à precipitação máxima (USDA-SCS, 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 coeficiente de armazenamento eo tempo de concentração foram calculados pela equação de Dooge (1973). Para o escoamento de base utilizou-se a vazão mínima medida na estação fluviométrica do Malacara correspondente ao evento utilizado para a calibração.

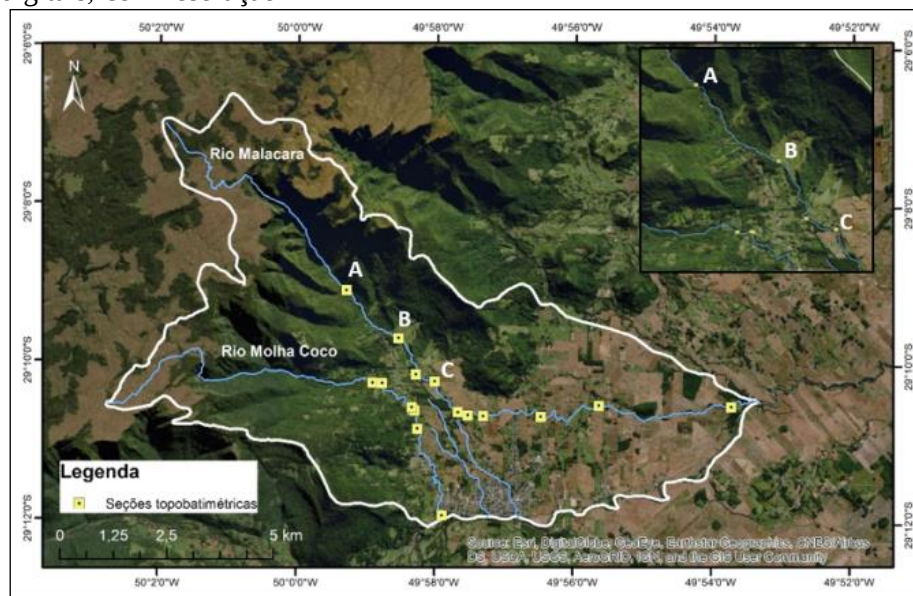


Figura 2. Locais de medições topobatimétricas ao longo dos rios Molha Coco e Malacara na região de Praia Grande, SC.

### Ajuste dos parâmetros de entrada do modelo HEC-HMS

Para a o ajuste do modelo HEC-HMS para a sub-bacia do rio Malacara foram utilizados os dados de vazão do período de 02/01/2020 a 06/01/2020.

A precipitação média da bacia do rio Malacara, utilizada no modelo HEC-HMS foi calculada da pelo método de Isoietas, usando as estações pluviométricas do GPDEN e CEMADEN (Tabela1). Além da precipitação, utilizaram-se os dados da estação fluviométrica do HidroEN-UFSC, também com intervalo de medição de 10 min. Na etapa de calibração automática foram ajustados os parâmetros de tempo de concentração (tc), coeficiente de armazenamento (k), CN e abstração inicial (Ia). Esse ajuste foi feito utilizando um intervalo de valores tomando como referência o tc, 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). Os valores de NSE variam de menos infinito a 1, sendo este último representativo de ajuste perfeito entre os hidrogramas simulados e observados. Além da função objetivo, o modelo permite utilizar indicadores para avaliar o desempenho das simulações, como: *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 ( $\sigma$ ) 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 (Moriassi et al., 2007).

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, e seu valor ideal é zero (Gupta et al., 1999).

Para a etapa de validação foi utilizado 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 se optou por ajustar o modelo com eventos de maior magnitude medidos na estação fluviométrica para tentar reproduzir melhor o hidrograma de 2007.

### Aplicação do 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.

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 m de resolução. 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 com resolução espacial de 10 m x 10 m na planície de inundação, e 5 m x 5 m na calha dos rios Molha Coco e Malacara dentro dos leques aluviais. O tamanho da malha correspondente a uma área de 32,00 km<sup>2</sup>. 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.

Esses hidrogramas foram propagados a partir dos locais identificados nas ortofotos, como o ápice dos leques aluviais dos rios Molha Coco e Malacara. Visando melhorar a propagação da vazão, também se utilizou 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 adicionou-se a jusante, nos exutórios dos rios Molha Coco, Malacara, Idalino e Braço do Malacara, uma profundidade normal (Tabela 2), que se trata de uma declividade utilizada pelo modelo para calcular a profundidade do fluxo utilizando a equação de Manning (USACE, 2016).

Os coeficientes de Manning (n) ajustados para as bacias dos rios Molha Coco e Malacara foram adotados com base em Chow (1959). Para a área urbana foi utilizado  $n=0,03$ ; para a planície de inundação  $n=0,04$ ; e para rios Molha Coco e Malacaran= $0,07$  e  $n=0,045$  para uma declividade  $> 0,026 \text{ m.m}^{-1}$  e para uma declividade  $< 0,026 \text{ m.m}^{-1}$ , respectivamente.

Os hidrogramas utilizados no HEC-RAS 2D foram gerados para TR = 5, 10, 50, 100 (evento de 2007) e 200 anos a partir dos parâmetros calibrados no HEC-HMS 4.3. Os hidrogramas obtidos com os dados medidos na estação fluviométrica do rio Malacara foram regionalizados 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. Para a saída do fluxo, foram utilizadas as profundidades normais citadas acima. Essas profundidades foram determinadas com base no MDE de 1 m de resolução 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 (Figura 1).

Para propagação da vazão (hidrogramas), utilizou-se o regime de escoamento não permanente, com intervalo de tempo computacional de 20 s.

Para verificar a precisão da extensão da área de inundação, gerada pelo HEC-RAS 2D foram utilizados os 27 pontos levantados em campo (conforme descrito anteriormente), comparando-se os pontos de borda com a distância até a área inundada e as profundidades da lâmina d'água no interior desses pontos. Desta forma, o ajuste da área de inundação simulada em relação aos pontos medidos em campo foi realizado alterando o valor de  $n$ .

**Tabela 2.** Condição de contorno na 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 afluente do Malacara    | 0,015                                                 |

#### *Mapeamento de perigo*

Para a determinação do perigo da inundação, para diferentes períodos de retorno (TR) foi utilizada a metodologia de Stephenson (2002), na qual em um determinado ponto da área inundada o Índice de Perigo (IP) é determinado:

$$IP = h \cdot v \quad (1)$$

onde  $h$  é a profundidade (m) e  $v$  é a velocidade ( $m.s^{-1}$ ). Desta maneira, o IP está diretamente relacionado à energia do escoamento, logo, ao seu potencial destrutivo (Monteiro et al., 2021).

Por fim, o mapa de perigo foi obtido multiplicando os mapas de velocidade e profundidade do fluxo obtidos no HEC-RAS 2D, utilizando a calculadora *raster* do ArcGIS 10.3.1, para os TR de 5, 100 e 200 anos. Esse mapa foi categorizado utilizando as classes de perigo propostas por Loat e Petrascheck (1997).

## **Resultados e discussão**

#### *Definição das áreas inundadas no evento de 2007 com base nos registros históricos*

No município de Praia Grande, 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. Essa precipitação corresponde a TR = 100 anos, definido pela Equação IDF de Praia Grande.

A Figura 3-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. Dos 27 pontos, 19 estão localizados na borda da área inundada e 8 estão situados no interior.



Figura 3. Pontos de alcance da inundação ocorrida em 2007. Fonte: A dos autores, e B a Gde Prefeitura Municipal de Praia Grande (2007).

As Figuras 3-B a 3-G mostram as fotografias dos locais atingidos nesse mesmo evento. As Figuras 3-B e 3-C mostram as casas invadidas pela água, durante o extravasamento no rio Molha Coco. A Figura 3-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 HidroEN-UFSC (Figura 1).

Na Figura 3-E encontra-se uma casa que foi arrastada e fica aproximadamente 120 m das margens do rio Malacara. A Figura 3-F mostra a casa arrastada no centro da cidade. Já na Figura 3-G 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.

#### Medição de vazão no rio Malacara

A série histórica da variação do nível do rio Malacara foi obtida da estação fluviométrica (sensor de nível) no período 05/09/2019 a 13/03/2020. Nesse período, 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. Nota-se que a vazão máxima obtida com molinete hidrométrico foi de  $6,73 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . A Figura

4 demonstra a curva-chave obtida na estação fluviométrica.

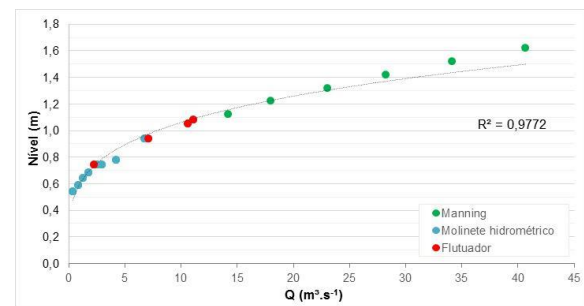


Figura 4. Curva-chave da estação fluviométrica do HidroEN UFSC.

A Figura 5 mostra as vazões calculadas com base na curva-chave para o período de monitoramento. A maior vazão obtida foi de  $27,61 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Houve apenas três eventos com vazão acima de  $15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , sendo que, a vazão média encontrada foi de  $0,9 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (linha verde) e a mediana (linha vermelha) foi de  $0,14 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . 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, isso é um regime fluviométrico bem típico da região de leques aluviais (Bowman, 2019; Vasconcellos et al., 2021; Blackburn et al. 2021; Leeman et al. 2022).

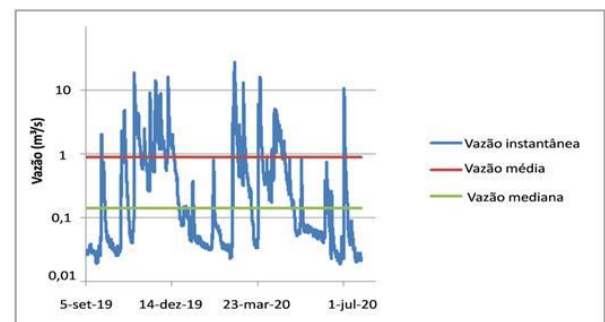


Figura 5. Série histórica de vazão da estação fluviométrica do rio Malacara. Vazão simulada com HEC-HMS

Na simulação das vazões usando o modelo 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 (35 m) onde está estação fluviométrica do HidroEN-UFSC. Assim, as características físicas utilizadas para o cálculo do CN e demais

parâmetros utilizaram a área da bacia do rio Malacara.

Com base nos dados de EMBRAPA (2004) e USDA-SCS (1985), a Figura 6 apresenta 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 precipitação de projeto (vazão máxima). Na Figura 6a 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. Já no grupo hidrológico C os solos apresentam uma permeabilidade de moderada a lenta.

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 6b. Já na Figura 6c 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 CN varia de 77 a 100. O valor médio de CN II obtido foi de 79,04, indicando que a bacia do rio Malacara apresenta uma maior

capacidade de escoamento superficial. O método SCS-CN estabelece que as perdas iniciais correspondam a 20% do valor de CN (USDA-SCS, 1985). Por outro lado, Walega et al. (2020) obtiveram bons resultados utilizando 5% de abstração inicial para 3 bacias florestais. 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.

A Tabela 3 mostra os parâmetros iniciais calculados para a bacia do rio Malacara, os quais foram utilizados na calibração do modelo HEC-HMS. 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 fluviométrica do HidroEN-UFSC, cuja 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 7a apresenta o hietograma e os hidrogramas observado e simulado após a calibração do modelo HEC-HMS, com dados discretizados em intervalos de 10 min para um período de 5 dias.

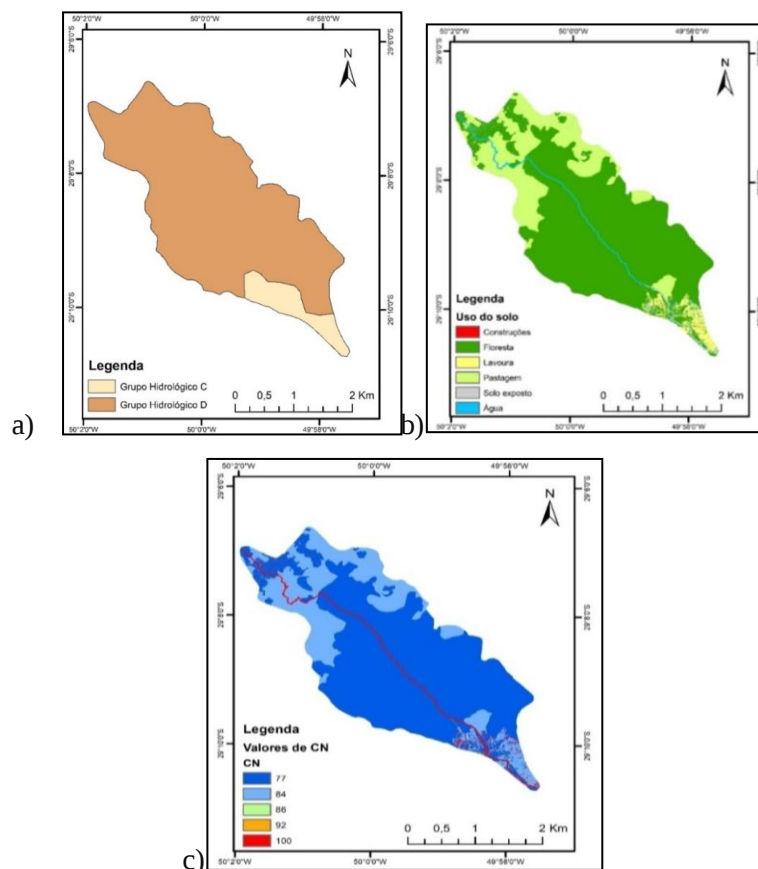


Figura 6. Caracterização da bacia do rio Malacara: (a) grupos hidrológicos; (b) uso e ocupação do solo; e (c) escoamento superficial (CN).

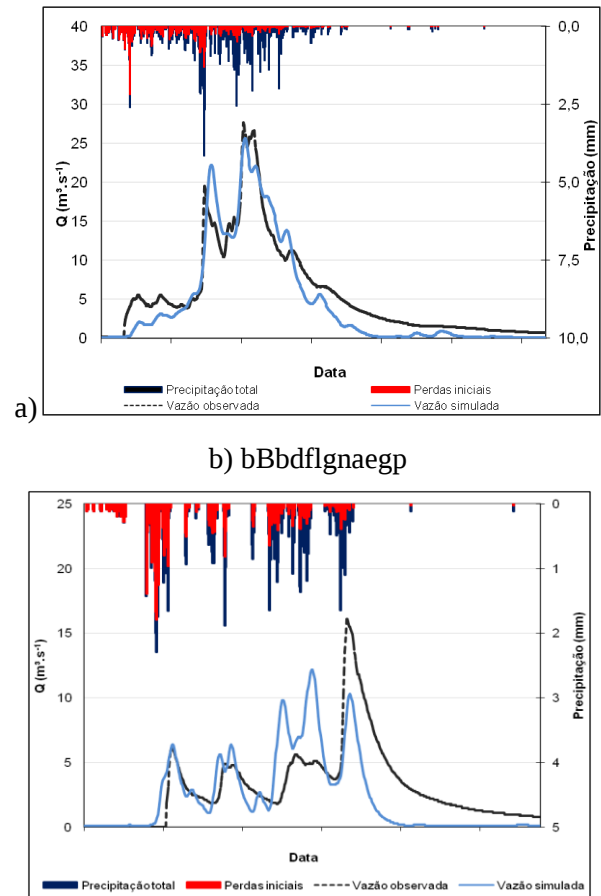
**Tabela 3.** Parâmetros iniciais para a etapa de calibração no modelo HEC-HMS.

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

No evento analisado (Figura 7a) o maior pico do hidrograma simulado (25,6 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) está subestimado em 7,25% em relação ao pico do hidrograma observado (27,6 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), mostrando que o modelo conseguiu ajustar bem a vazão máxima, sendo esta a vazão que determinará a extensão máxima da área de inundação. Já as vazões mínimas simuladas foram subestimadas durante todo tempo analisado em relação às vazões medidas.

A Tabela 4 mostra a diferença entre os parâmetros utilizados na calibração do modelo HEC-HMS. Verifica-se 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 precipitação-vazão no modelo HEC-HMS foram razoáveis para a região da bacia do Malacara. Isso implica que, caso não haja dados de precipitação e vazão para calibração, os valores dos

parâmetros obtidos apenas com os dados do solo podem ser utilizados na simulação.

**Figura 7.** Hietogramas e hidrogramas observados e simulados: (a) calibração; e (b) validação**Tabela 4.** 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          |

A Tabela 5 mostra os indicadores estatísticos utilizados para avaliar o desempenho

do modelo HEC-HMS nas etapas de calibração e validação. Verifica-se que, no geral o modelo apresentou um bom desempenho na simulação das vazões na etapa de calibração.

**Tabela 5.** Indicadores estatísticos da calibração do modelo HEC-HMS.

| Indicador | Calibração     |                                        | Validação      |                                        |
|-----------|----------------|----------------------------------------|----------------|----------------------------------------|
|           | Valor          | Classificação de Moriasi et al. (2007) | Valor          | Classificação de Moriasi et al. (2007) |
| NSE       | 0,87           | Muito bom                              | 0,36           | Não satisfatório                       |
| RSR       | 0,4            | Muito bom                              | 0,8            | Não satisfatório                       |
| PBIAS (%) | -<br>17,2<br>7 | Satisfatório                           | -<br>24,8<br>7 | Satisfatório                           |

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 7b 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  $16,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e a simulada foi de  $10,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 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, de apenas 3 eventos.

Os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 5 indicam que a validação do modelo HEC-HMS não foi bem-sucedida para a bacia do rio Malacara. Neste caso, vários fatores que influenciaram o baixo desempenho do modelo pode estar associados à vários fatores, como (i) é muito difícil reconhecer a precipitação real na área montanhosa; e (ii) a diferença na magnitude dos eventos utilizados na calibração e validação do modelo. Apesar de terem durações parecidas, as

vazões 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 possibilitassem gerar uma nova série de dados para serem utilizados na validação do modelo.

#### *Cálculo da vazão máxima*

A precipitação acumulada durante o evento de inundação de 2007 foi de 297mm. Essa precipitação foi utilizada para estimar a vazão máxima desse evento catastrófico. Para tal, foram utilizados os dados da estação pluviométrica de Praia Grande (ANA/código 02949001). Como ela vem sendo operada diariamente, estimou-se o evento com uma duração total de 24 h, o qual foi discretizado em intervalos de 20 min, utilizando o 3º quartil de Huff (1967), ou seja, o maior volume de precipitação ocorre a 75% da duração da precipitação e, essas precipitações são mais intensas e tem duração moderada (12-24 horas).

O evento de 2007 calculado com a Equação IDF de Praia Grande, corresponde ao TR de 100 anos. Essa equação também foi utilizada para calcular as intensidades e posteriormente a precipitação de TR = 5, e 200 anos. Com as intensidades foi calculada a precipitação total com duração de 24 h para TR = 5 e 200 anos, obtendo-se desta forma valores de 171,01 mm (TR=5), e 372,43 mm (TR=200).

A partir dos hietogramas e dos parâmetros calibrados no HEC-HMS foram regionalizados os hidrogramas, considerando como áreas de contribuição 13,08 km<sup>2</sup> e 7,98 km<sup>2</sup> para os rios Malacara e Molha Coco, respectivamente. A Figura 8 mostra os hidrogramas de projeto do evento de 2007, onde verifica-se que as vazões de pico dos rios Malacara e Molha Coco foram de  $92,39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $56,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

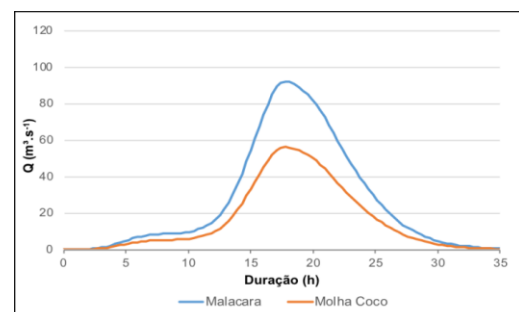


Figura 8. Hidrogramas de projeto para o evento de 2007 para as bacias hidrográficas Malacara e Molha Coco.

### *Estimativa da área inundada com o modelo HEC-RAS 2D*

De acordo com a Equação IDF de Praia Grande, o evento ocorrido em 2007 corresponde a um período de retorno de 100 anos. A mancha de inundação determinada no presente trabalho para esse período de retorno apresentou uma área de 5,53 km<sup>2</sup>. Essa área abrange o ápice dos leques aluviais e a região mais urbanizada do município de Praia Grande. 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.

A Figura 9 mostra a profundidade da área de inundação simulada para o evento de 2007. A profundidade máxima da lâmina d'água simulada no HEC-RAS 2D para o TR de 100 anos foi de 11,52 m, na região do ápice dos leques aluviais (Figura 9). 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 9-B) e dois no Malacara (Figura 9-C e 9-D).

De acordo com as informações levantadas pela prefeitura de Praia Grande, quando ocorre o extravasamento dos rios Molha Coco e Malacara, devido às fortes precipitações, 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.

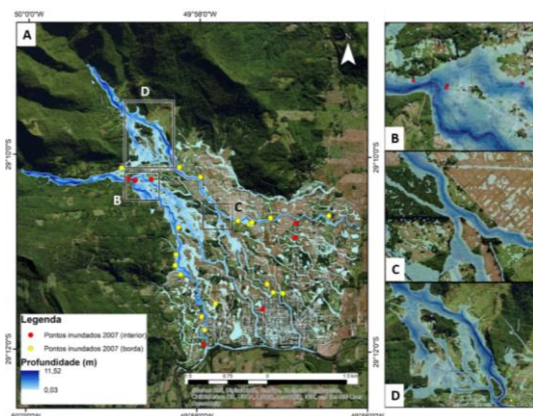


Figura 9. Profundidade de inundação para o evento de 2007 simulada com o HEC-RAS 2D

No presente trabalho adotou-se um limiar de 20 m.s<sup>-1</sup> 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 10 observa-se locais que apresentaram velocidades superiores a 20 m.s<sup>-1</sup>. Esses valores excessivamente altos foram produzidos na região onde facilmente ocorrem erros numéricos devido à proximidade da condição de contorno e da condição inicial.

Os erros associados à área de inundação podem estar relacionados a vários fatores, entre os quais se destacam: (a) o ajuste da equação da curva-chave; (b) número e magnitude de eventos utilizados para calibração e validação do modelo HEC-HMS; e (c) precisão do MDE.

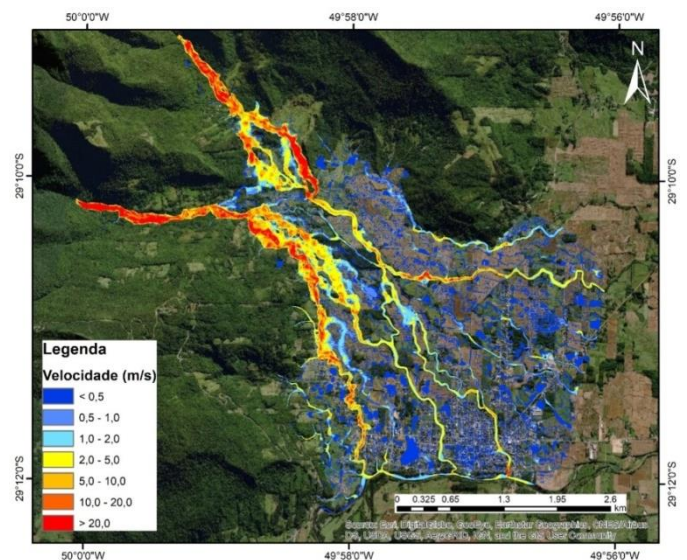


Figura 10. Velocidade da água na área de inundação simulada para o evento de 2007

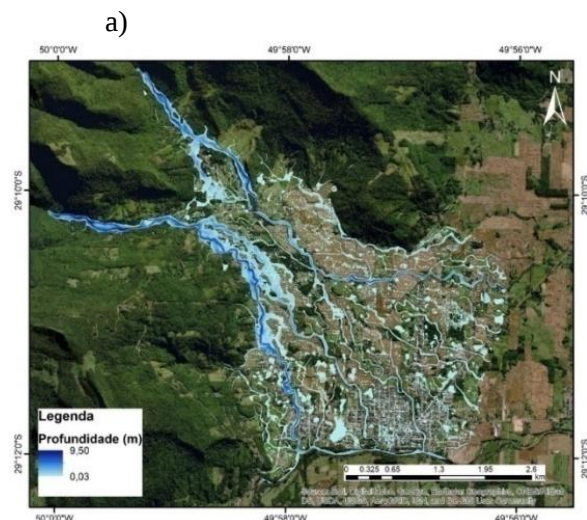
Apesar da complexidade de trabalhar com modelagem hidrodinâmica em bacias montanhosas, devido à heterogeneidade da paisagem e escassez de dados de vazão medidos, a área de inundação simulada pelo modelo HEC-RAS 2D sobrepôs 70% dos pontos inundados no evento de 2007.

*Mapas de perigo para a região de estudo, associados a precipitações com 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. 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 valor de IP associado a vazões geradas por precipitações com TR de 5, 100 e 200 anos. A Figura 11 mostra os mapas das profundidades da lâmina de água da inundação determinadas pelo HEC-RAS 2D, para TR de 5 e 200 anos. A Figura 12 mostra as velocidades calculadas para TR 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.

Como resultado da multiplicação do mapa de profundidade pelo da velocidade, obteve-se um mapa onde cada pixel representa um índice de perigo. A Figura 13 mostra os mapas de perigo de inundação para TR = 5, TR=100e TR=200 anos. Analisando os mapas é possível visualizar que o fluxo da inundação apresentou maior grau de perigo ( $< 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ) 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.



b)

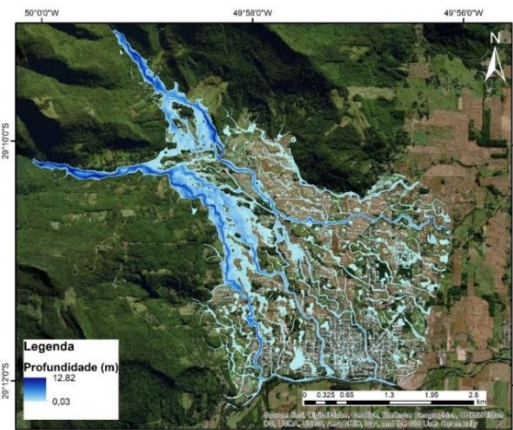
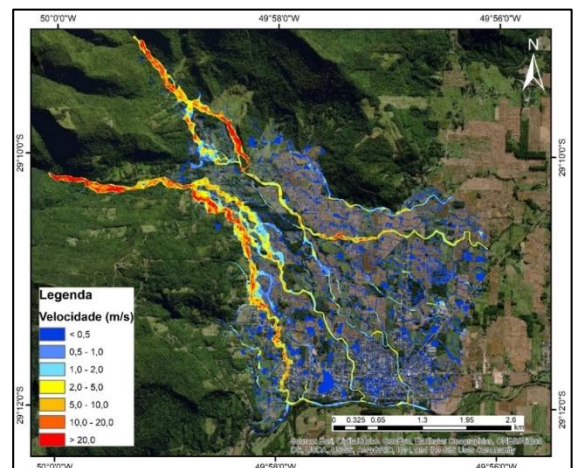


Figura 11. Profundidades da lâmina de água da inundação para diferentes tempos de retorno: (a) TR = 5 anos; e (b) TR = 200 anos.

a)



b)

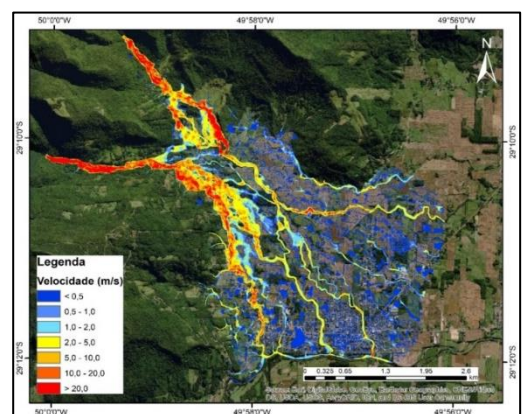


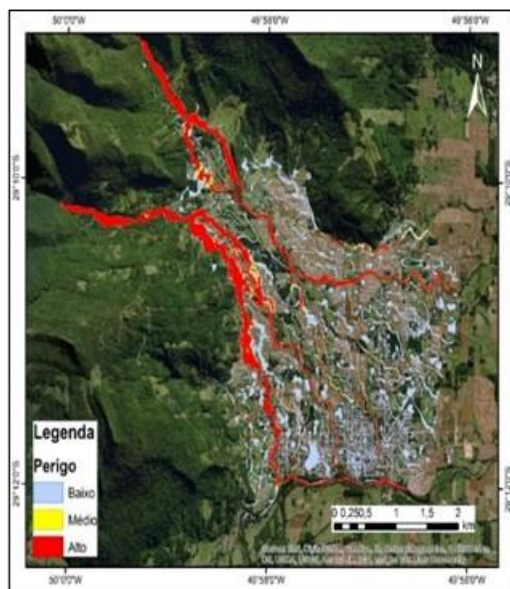
Figura 12. Velocidades da lâmina de água: (a) TR = 5 anos; e (b) TR = 200 anos.

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 se considerou a contribuição dos rios Mampituba e Canoas na simulação do evento de 2007, que também podem ter contribuído para a inundação nestes locais. Além disso, não foram simulados o transporte de sedimentos, deslizamentos e rompimento de barragens naturais. Esses processos também foram relatados pela comunidade.

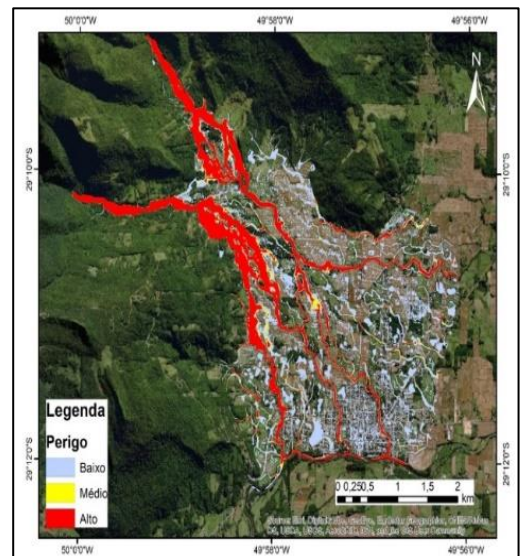
Com base nesses aspectos, os mapas de perigo gerados no presente trabalho deverão ser melhorados. Isso reforça a necessidade de melhorar o monitoramento dos processos precipitação e vazão e de realizar um novo levantamento topobatimétrico para obter MDEs com maior precisão.

Contudo, o mapa de índice 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 para os turistas.

a)



b)



c)

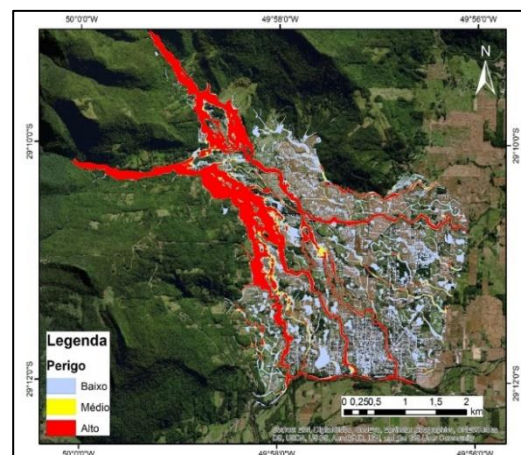


Figura 13. Mapa de perigo de inundação para os tempos de retorno: (a) TR = 5 anos; (b) TR = 100 anos; e c) TR=200 anos.

### Considerações Finais

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.

Os mapas de perigo indicam que o maior grau de perigo ( $< 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ) 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 e hidrodinâmicos para reconhecer e compreender os fenômenos que causam desastres hidrológicos 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, os mapas construídos no presente trabalho poderão ser utilizados a fim de auxiliar os gestores de riscos e de desastres naturais hidrológicos e no planejamento territorial, como forma de prevenção para a ocupação de áreas de perigo de inundação.

Para estudos futuros, recomenda-se aumentar o número das estações de monitoramento de vazão e precipitação e melhorar as informações topobatemétricas, para calibrar e validar os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos e, consequentemente, aumentar a qualidade do mapa de perigo.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi parcialmente financiado pela agência brasileira CAPES-ANA (Programa Pró-Recursos Hídricos, no16/2017, código financeiro 001).

### Referências

Amora, A. M.; Santillan, J. R.; Makinano-Santillan, M.; Marqueso, J. T.; Gingo, A. L. 2016. Characterizing flood hazards in an alluvial fan during extremerainfall events using Lidar and numerical modeling. Anais 37° Asian Conference on Remote Sensing. Sri Lanka.

Arrighi, C.; Oumeraci, H.; Castelli, F. 2017. Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 515-531, 2017. doi: 10.5194/hess-21-515.

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

Back, A.J.; Poletto, C. 2018. 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.

Bates, P. D.; Neal, J.; Sampson, C.; Smith, A.; Trigg, M. 2018.Chapter 9 - Progress Toward Hyperresolution Models of Global Flood Hazard. In: *Risk Modeling for Hazards and Disasters*. Elsevier, p. 211-232.doi: 10.1016/B978-0-12-804071-3.00009-4

Blackburn, J.; Comte, J-C.; Foster, G.; Gibbins, C. 2021. Hydrogeological controls on the flow regime of an ephemeral temperate stream flowing across an alluvial fan. *Journal of Hydrology*, Volume 595.

Bowman, 2019. D. Bowman. *Principles of alluvial fan morphology*, Springer, London, United Kingdom .

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

Cunha, S.F.; Silva, F.E.O.; Mota, T.U.; Pinheiro, M. C. 2015. 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.

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

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

Garfi, G.; Bruno, D. E.; Calcaterra, D.; Parise, M. 2007.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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.06.003>

Gupta, H.V.S.; Sorooshian, S.; Yapo, P.O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic Engineering*, v.4, n.2, p.135-143.

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

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

Kobiyama, M.; Campagnolo, K.; Menezes, D.; Paixão, M.A. Manejo da zona ripária para redução de risco de desastres no ambiente

- montanhoso. In: Magnoni Jr, L.; Freitas, C.M.; Lopes, E.S.S.; Castro, G.R.B.; Barbosa, H.A.; Londe, L.R.; Magnoni, M.G.M.; Silva, R.S.; Teixeira, T.; Figueiredo, W.S. (orgs.). 2020. Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano. 2. ed. São Paulo: CPS. p.764-794.
- Kobiyama, M.; Goerl, R.F.; Fan, F.M.; Corseuil, C.W.; Michel, G.P.; Dulac, V.F. 2018. Abordagem integrada para gerenciamento de desastre em região montanhosa com ênfase no fluxo de detritos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* 7, p.31-65. doi: 10.19177/rgsa.v7e0201831-65
- Koks, E. E.; Jongman, B.; Husby, T. G.; Botzen, W. J. W. 2015. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental Science & Policy*, vol. 47, p. 42-52. doi: 10.1016/j.envsci.2014.10.013
- Lancaster, J. T.; Spittler, T. E.; Short, W. R. 2012. 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, 2012. 170 p.
- Yucel, I.; Keskin, F. 2011. Assessment of flash flood events using remote sensing and atmospheric model-derived precipitation in a hydrological model. In: *HydroClimatology: Variability and Change*, Melbourne. Anais. p. 245–251.
- Leeman, A.S.; Eaton, B.C.; MacKenzie, L.G. 2022. Floods on alluvial fans: implications for reworking rates, morphology and fan hazards. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127, e2021JF006367.
- Loat, R. and Petrascheck, A. 1997. Berücksichtigung der Hochwassergefahrenbeirraumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen, BWW, BRP, BUWAL, <http://www.planat.ch/ressources/planatproductde1031.pdf> (German); <http://www.planat.ch/ressources/planatproductfr1031.pdf> (French).
- Martínez-Gomariz, E.; Gómez, M.; Russo, B. 2016. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Natural Hazards*, vol. 82, p. 1259-1278. doi: 10.1007/s11069-016-2242-z
- Mazzalli, L.H., Diaz, L.R., Kobiyama, M., Campagnolo, K. 2021. Análise dos Trechos da Trilha do Rio do Boi no Parque Nacional de Aparados da Serra. *Biodiversidade Brasileira*, (no prelo)
- Mazzorana, B.; Comiti, F.; Fuchs, S. 2013. A structured approach to enhance flood hazard assessment in mountain streams. *Natural Hazards*, v. 67, p. 991-1009. doi: 10.1007/s11069-011-9811-y
- Merwade, V.; Cook A.; Coonrod, J. 2008. GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping, *Environmental Modelling & Software*, v. 23, p. 1300-1311, doi: 10.1016/j.envsoft.2008.03.005
- Mishra, S. K.; Singh, V. P. 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology* 'Kluwer' Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. ISBN 1-4020- 1132-6.
- Monteiro, L. R.; Kobiyama, M. 2014. 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.
- Monteiro, L. R.; Kobiyama, M. 2013. 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.
- Monteiro, L.R.; Santos, C.I.; Kobiyama, M.; Corseuil, C.W. Chaffe, P.L.B. 2021. Effects of return periods on flood hazard mapping: An analysis of the UFSC campus basin, Florianópolis city, Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, B v.26, Epub, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.262120200161>
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, p. 885-900, doi: <https://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeval.pdf>
- Motevalli, A.; Vafakhah, M. 2016. Flood hazard mapping using synthesis hydraulic and geomorphic properties at watershed scale. *Stochastic Environmental Research and Risk*. v. 30 p. 1889-1900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1305-8>
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282-290. doi:

- [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Paixão, M. A.; Kobiyama, 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>
- Paixão, M.A., Corseuil, C.W., Kobiyama, M., Gonzalez Avila, I., Vanelli, F.M., Oliveira, H.U., Vasconcellos, S.M., Campagnolo, K., Fagundes, M.R. 2021. Occurrence of Multi-Disasters in the Mampituba River Basin, Southern Brazil, During the COVID-19 Pandemic. *International Journal of Erosion Control Engineering*, vol. 13, p. 84–92, doi: 10.13101/ijece.13.84
- Pasquier, U.; He, Y.; Hooton, S.; Goulden, M.; Hiscock, K. M. 2018. 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. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3462-1>
- Pelletier, J.D.; Mayer, L.; Pearthtree, P.A.; House P.K.; Demsey, K.A.; Klawan, J.E.; Vincent, K. R. 2005. 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.
- Pinos, J.; Timbe, L. 2019. 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>
- Revellino, P.; Hungr, O.; Guadagno, F. M.; Evans, S. G. 2004. Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy. *Environmental Geology*, v. 45, p. 295-311, doi: 10.1007/s00254-003-0885-z
- Ronsani, G. 1999. Praia Grande, Cidade dos Canyons-180 anos de história. Praia Grande: Do autor, 171p.
- Santos, I. et al. 2001. Hidrometria Aplicada. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 372p.
- Sartori, A.; Genovez, A. M.; Lombardi Neto, F. 2005. 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, doi: 10.21168/rbrh.v10n4.p19-29.
- Sattar, A.; Goswami, A.; Kulkarni, A. V. 2019. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.388>
- Scheibe, F. et al. 2010. Atlas ambiental da Bacia do rio Araranguá: Santa Catarina – Brasil – Florianópolis: UFSC: Cidade Futura, 2010. 64p.
- Scheiner, C.; Wasklewicz, T.; Staley, D. 2012. Alluvial Fan Dynamics – Revisiting the Field. *Geography Compass*, v. 6/12, 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.
- Stephenson, D. 2002. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. *Urban Water*, vol. 4, p. 423-428, 2002, doi: 10.1016/S1462-0758(02)00032-8
- Strieder, A. J.; Buffon, S. A.; Quadros, T. F. P.; Oliveira, H. R. 2008. 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, doi: 10.2495/DEB080101
- Syafri, R. R.; Hadi, M. P.; Suprayogi, S. 2020. Hydrodynamic Modelling of Juwana River Flooding Using HEC-RAS 2D. *Anais 2º International Conference on Geography and Education*, disponível em: < <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/412/1/012028>>
- Szymansky, F.D.; Kobiyama, M.; Duarte, M.F.; Giehl, M.R.; Corseuil, C.W. 2021. Avaliação de velocidade de rios em bacias montanhosas, região sul de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia Física* (submetido).
- Tschiedel, A. F.; Paiva, R. C. D. 2018. Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. RBRH. v. 23. p. 1-17 doi: 10.1590/2318-0331.231820170074
- USACE – US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 5.0. 2016. 960 p.
- USACE – US Army Corps of Engineers. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Version 4.3, 2018. 640 p.
- USDA-SCS. National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology. Washington, D.C, 1985.

- Vasconcellos, S.M.; Kobiyama, M.; Dagostin, F.S.; Corseuil, C.W.; Castiglio, V.S. 2021. Flood hazard mapping in alluvial fans with computational modeling. *Water Resources Management*, v.35, p.1463–1478, <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02794-7>.
- Ventra, D., Clarke, L.E. 2018. Geology and geomorphology of alluvial and fluvial fans: Current progress and research perspectives. Geological Society, London, Special Publications, v. 440, p. 1-21. doi: <https://doi.org/10.1144/SP440.16>.
- Viviroli, D.; Weingartner, R.; Messerli, B.2003. Assessing the Hydrological Significance of the World's Mountains. *Mountain Research and Development*, v. 23(1), p. 32-40,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)
- 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](https://www.floodmanagement.info/publications/tools/APFM_Tool_07.pdf). Acesso em: 20 maio 2019.
- Yucel, I.; Keskin, F. 2011. Assessment of flash flood events using remote sensing and atmospheric model-derived precipitation in a hydrological model. In: *HydroClimatology: Variability and Change*, Melbourne. Anais. p. 245–251.