

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MAPEAMENTO E ANÁLISE DOS DESASTRES DE DEZEMBRO DE 2020 NOS MUNICÍPIOS DE PRESIDENTE GETÚLIO, IBIRAMA E RIO DO SUL-SC POR MEIO DE MODELAGEM MATEMÁTICA

*Leonardo Rodolfo Paul¹; Bruno Henrique Abatti²; Heron Schwarz²; Clarissa Guerra Salvador²;
Gean Paulo Michel²; Masato Kobiyama²; Guilherme Censi²; Matheos Abner Silva³; Franciele
Zanandrea², Anne Biehl², Cássio Martinez Machado⁴*

Palavras-Chave – Desastres naturais; Modelagem matemática;

INTRODUÇÃO

Os desastres naturais ocorrem quando um fenômeno natural deflagra danos a uma comunidade, seja econômico, social ou ambiental, que impossibilite sua recuperação por meio dos próprios recursos. Nas últimas décadas houve um aumento significativo das condições de risco associado a esses eventos extremos (Kobiyama et al., 2010). A falta de controle de uso e ocupação do solo pelos gestores, associada a uma baixa percepção de perigo natural pela população, resulta em aumento da suscetibilidade e, conseqüentemente, do risco a desastres naturais (Macdonald, 2003).

Sob tal perspectiva, existem metodologias voltadas à prevenção de desastres, divididas entre medidas estruturais e não-estruturais (Baas et al., 2008). As medidas não-estruturais são compostas por ações como mapeamento de perigo, o qual é obtido a partir da modelagem dos fenômenos. A modelagem matemática de processos que desencadeiam desastres naturais indica as áreas mais propensas a sua ocorrência, permitindo mapeá-las (Mohit e Sellu, 2013). Dessa maneira, é possível que, a priori de um desastre, seja possível criar políticas públicas ou implementar sistemas de alerta voltados a tais áreas.

Entre os dias 16 e 17 de dezembro de 2020, a população dos municípios de Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio, na região do Alto Vale do Itajaí no estado de Santa Catarina, foi surpreendida por um evento de precipitação extrema. O evento resultou na deflagração de diversos movimentos de massa, como escorregamentos translacionais rasos e fluxos de detritos, e conseqüentes inundações bruscas (enxurradas) de detritos. Dentre os impactos do evento, constam 21 óbitos e a destruição de pelo menos 80 residências, deixando 100 pessoas desalojadas e 172 desabrigados, além de danos em infraestrutura pública.

Com intuito de fornecer um diagnóstico e gerar subprodutos que possam ser utilizados para a prevenção de desastres desencadeados por eventos extremos similares, foi realizado o mapeamento e análise desse desastre. Para isso, foram aplicadas algumas ferramentas: (i) a região afetada foi mapeada por sensoriamento remoto partir de algoritmos semi-automáticos baseados na mudança de índices de vegetação, proposto por Shwarz (2019); (ii) a propensão à ocorrência de escorregamentos

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS; leonardopaul@ufrgs.br

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

³ Prefeitura municipal de Ibirama/SC

⁴ Faculdade de Agronomia - UFRGS

translacionais rasos foi avaliada com o modelo SHALSTAB (Montgomery e Dietrich, 1994), adaptado para o software QGis por Godoy et al. (2018); (iii) o alcance dos fluxos de detritos e as alturas de deposição foram avaliados com um modelo proposto por Paul (2020); (iv) as manchas de inundação foram obtidas por meio do HAND (Rennó et al., 2008), indicando a susceptibilidade topográfica à inundação.

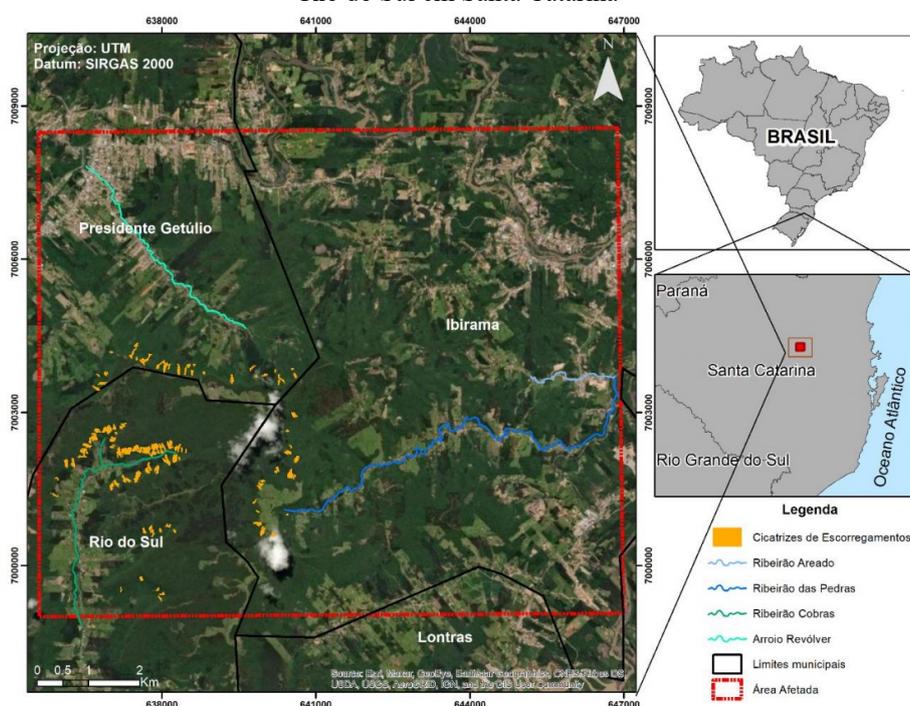
METODOLOGIA

Mapeamento da região afetada e delimitação da área de estudo

O evento extremo ocorreu em uma formação que faz divisa entre três municípios de Santa Catarina: Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul. Tal formação, responsável pela divisa, é uma área montanhosa denominada de Serra do Mirador. Estão localizados na mesorregião do Vale do Itajaí, região afetada por precipitações intensas com recorrência e, conseqüentemente, por desastres hidrológicos e geológicos, conforme classificação da COBRADE.

A primeira etapa realizada buscou representar e delimitar a região afetada, permitindo o desenvolvimento das modelagens referentes aos escorregamentos, fluxos de detritos e inundações. A área mapeada neste estudo consiste nas encostas onde ocorreram os movimentos de massa e nos rios onde ocorreram as inundações, conforme Figura 1. O retângulo destacado em vermelho mostra a região onde ocorreu a maioria dos movimentos de massa e das inundações bruscas. As cicatrizes de escorregamentos foram mapeadas utilizando o método de detecção de mudança por índices de vegetação, conforme metodologia de Schwarz (2019), e utilizando por base produtos dos sensores multiespectrais Sentinel-2 A e B, disponíveis pré e pós-deflagração. O mesmo método foi empregado no mapeamento de áreas de deposição dissociadas do canal de drenagem.

Figura 1 – Localização da área afetada pelo desastre ocorrido em 2020 nos municípios de Ibirama, Presidente Getúlio e Rio do Sul em Santa Catarina



Percebe-se que os escorregamentos se concentraram nas cabeceiras da Serra Mirador que divide os três municípios, sendo as regiões a jusante dos escorregamentos afetadas pelos fluxos de detritos e pelas inundações dos rios Ribeirão Cobras (Rio do Sul), Arroio Revólver (Presidente Getúlio) e Ribeirão das Pedras e Ribeirão Areado (Ibirama). Grande parte dos escorregamentos de terra

tornaram-se fluxos de detritos que alcançaram o canal principal, ocasionando diversas áreas de acúmulo de detritos ao longo de seu curso. Esse fato também resultou em uma inundação brusca com grande quantidade de sedimentos, detritos rochosos e lenhosos, também chamada de inundação de detritos, o que aumentou o poder destrutivo do fenômeno.

Modelagem de estabilidade de encosta

Para realizar a avaliação da estabilidade das encostas da região, foi aplicado o modelo Shallow Landslide Stability (SHALSTAB), proposto por Montgomery e Dietrich (1994), em sua versão onde os parâmetros são espacialmente distribuídos, desenvolvido por Michel (2013), e implementado no software QGis por Godoy et al. (2018). O modelo SHALSTAB utiliza a combinação de uma teoria geomecânica, a teoria de encostas infinitas (SELBY, 1993), e uma teoria hidrológica de estado estacionário (O'LOUGHLIN, 1986). A partir desta combinação são definidas as condições hidrológicas necessárias para que determinada área se torne instável.

A aplicação do modelo requer a utilização de dados topográficos (declividade e área de contribuição) os quais foram extraídos do Modelo Digital do Terreno (MDT). Além disso, é necessário que se tenha conhecimento de valores de parâmetros do solo, ângulo de atrito interno (ϕ), coesão (c), massa específica (ρ_s) e profundidade (z). O valor de ρ_s foi obtido com base na literatura e os valores de z foram definidos com base no mapa de solos para a região. Para aplicação do modelo de maneira distribuída, os valores dos parâmetros foram especializados com base em unidades geotécnicas (UG), geradas pelo cruzamento de dados de solo, rochas e topografia. Como resultado, foram definidas duas UG (Figura 2) e os valores dos parâmetros utilizados em cada uma delas foram uniformes e iguais à média dos valores encontrados com os ensaios de campo. Os valores utilizados estão descritos na Tabela 1.

Figura 2 – Unidades geotécnicas da área de estudo

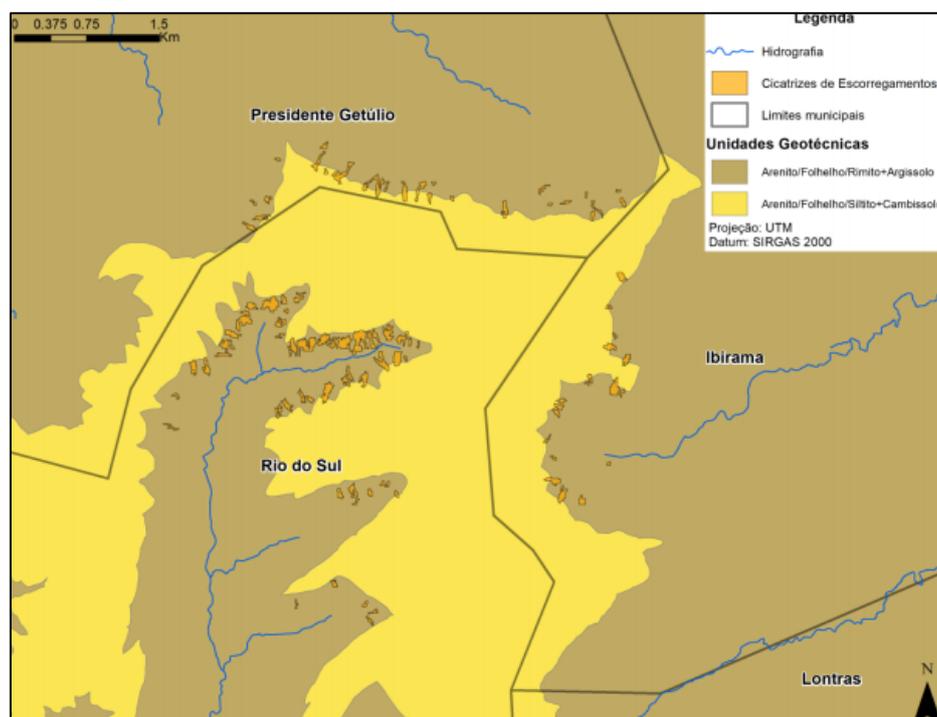


Tabela 1 – Parâmetros de entrada para o modelo de estabilidade de escosta

Unidade Geotécnica	ϕ (°)	c (kPa)	ρ_s (kg/m ³)	z (m)
Arenito/Folhelho/Rimito+Argissolo	36,3	1,1	1800,0	1,0
Arenito/Folhelho/Siltito+Cambissolo	33,8	4,0	1800,0	1,0

Para a avaliação das simulações foram utilizados os índices de acerto (*IA*) e de erro (*IE*) propostos por Sorbino et al. (2010). Além disso foram construídas as curvas ROC (Receiving Operating Characteristic) adaptadas para as cicatrizes de escorregamento e para a área total analisada.

Modelagem dos fluxos de detritos

A modelagem do fluxo de detritos foi realizada pela aplicação do modelo de fluxo de detritos proposto por Paul (2020), desenvolvido para simular o escoamento do fluxo de detritos ao longo da encosta e que utiliza como base de cálculo um MDT. A operação do modelo se baseia na interação entre um módulo de determinação do direcionamento do fluxo e de soluções para o escoamento com base em diferentes reologias. O modelo permite utilizar diferentes métodos de direcionamento de fluxo e soluções reológicas, sendo selecionado o *multiple flow direction* e reologia de fluido dilatante. Foi simulado o fluxo de detritos responsável por 9 óbitos, em Presidente Getúlio, no bairro Revólver. O intuito dessa simulação foi determinar a capacidade dos modelos de fluxos de detritos em descrever o percurso e as áreas atingidas por fluxos de detritos. Em caso de possibilidade de utilização dos modelos de fluxos de detritos, estes podem ser combinados com modelos de estabilidade de encostas para identificação prévia de áreas propensas a fluxos de detritos.

Os dados de entrada são: (i) MDT para cálculo da direção do fluxo e declividades; (ii) raster indicando as áreas de iniciação do fluxo de detritos com suas respectivas profundidades; e (iii) a viscosidade cinemática do fluido (ν). O modelo encerra sua simulação de acordo com o critério de parada, foi utilizada a máxima diferença de altura entre duas iterações. A Tabela 2 apresenta os parâmetros necessários e os valores utilizados:

Tabela 2 – Parâmetros de entrada para o modelo de fluxo de detritos

Parâmetro	Entrada	Parâmetro	Entrada
Y	0,01 m ² /s	Tipo de fluido	Dilatante
Δt (passo de tempo entre iterações)	1 s	n_d (coef. comportamental do fluido)	1,5
Critério de parada	0,1 m	Profundidade inicial do fluxo	1,0 m

A avaliação do desempenho considera índice de acerto (*IA*), índice de erro (*IE*) e índice de comissão, o qual indica a porcentagem de área simulada fora das cicatrizes, representando a área superestimada.

Modelagem da susceptibilidade topográfica à inundação

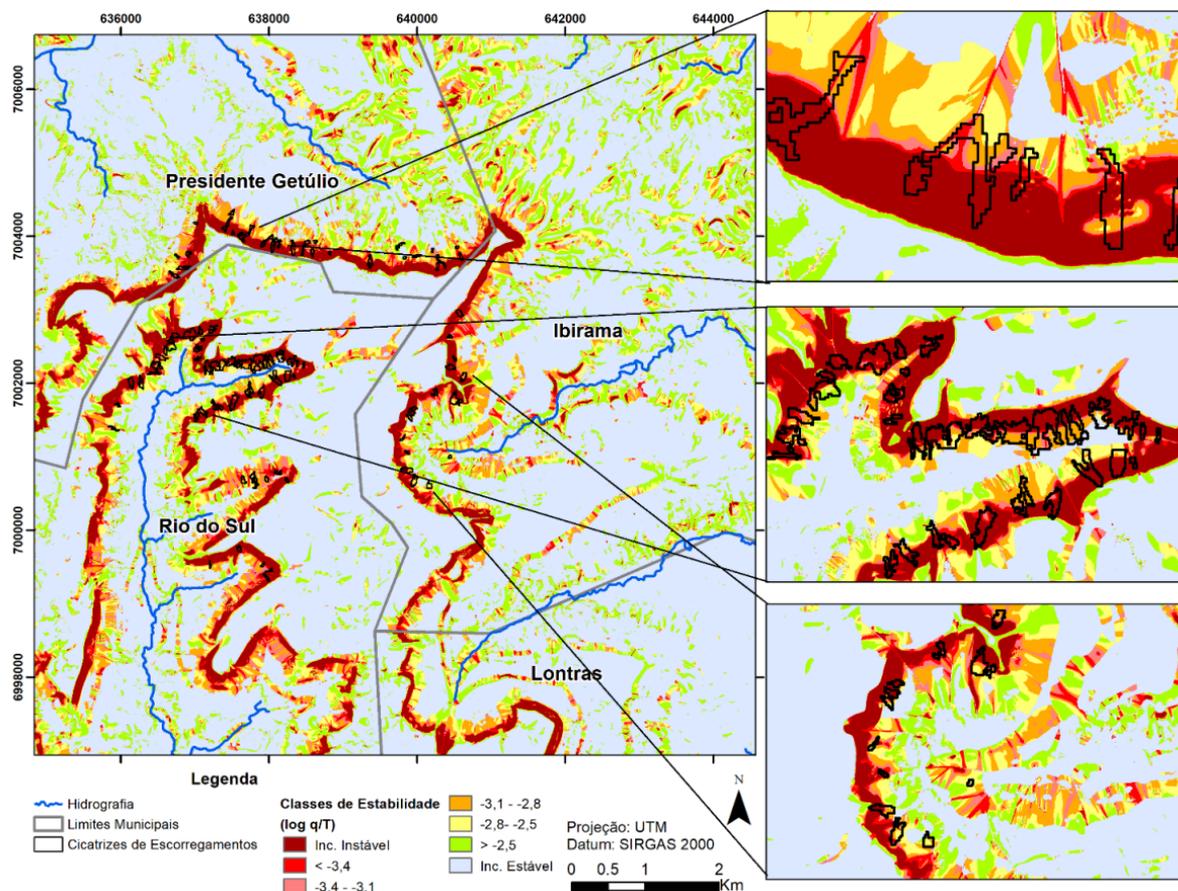
A delimitação da mancha de inundação nos três municípios foi obtida com a aplicação do descritor do terreno HAND (Height Above Nearest Drainage) (Rennó et al., 2008) considerando a drenagem dos rios Ribeirão Cobras (Rio do Sul), Arroio Revólver (Presidente Getúlio) e Ribeirão das Pedras e Ribeirão Areado (Ibirama), e utilizando o MDT com resolução espacial de 1 metro da SDS/SC. A área inundada a partir do método HAND foi classificada com o levantamento em campo das áreas afetadas pela inundação, considerando esses pontos como limiares. Como não existem dados de monitoramento hidrológico na região atingida, não foi possível calcular as vazões alcançadas durante o evento, e conseqüentemente o tempo de recorrência das vazões do evento. Assim, foi realizada a delimitação da mancha de inundação de forma preliminar, objetivando o rápido diagnóstico, a partir da avaliação da susceptibilidade topográfica da região à inundação, confrontada com os pontos dos limites da inundação levantados em campo com GPS-RTK a partir dos relatos dos moradores e marcas da água.

RESULTADOS

Modelagem de estabilidade de encostas

A Figura 3 mostra o resultado do SHALSTAB classificado em faixas de valores do parâmetro q/T (taxa de recarga $[q]$ sobre transmissividade $[T]$ do solo).

Figura 3 – Mapa de estabilidade de encosta pelo SHALSTAB para a área de estudo

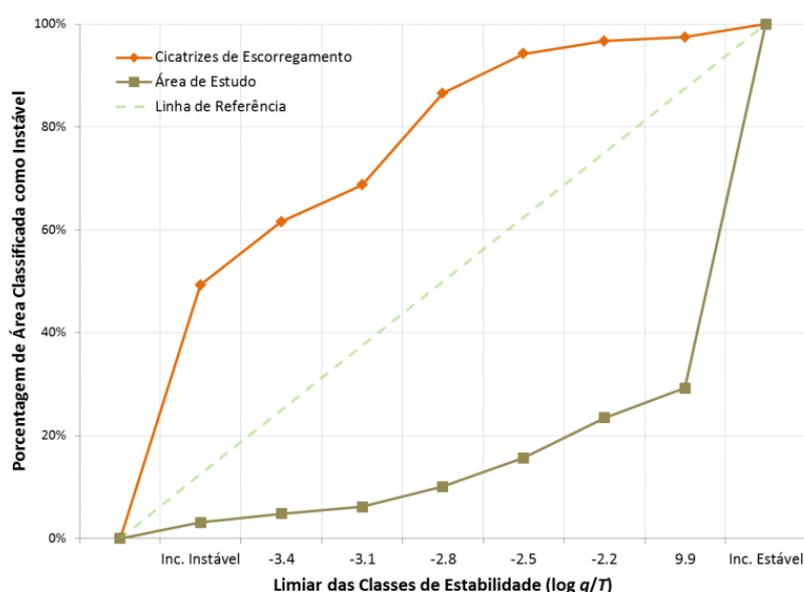


Nesta classificação, quanto menores os valores de $\log q/T$ mais instável é a área. Observa-se que existe uma faixa de áreas incondicionalmente instáveis ao longo de toda a transição entre as regiões altas (comumente chamadas de planalto pelos moradores da região) e as regiões mais baixas. Esta área foi reconhecida através das atividades de campo como uma região de altíssima declividade associada a baixas profundidades do solo, inclusive demonstrando afloramento do manto rochoso em determinados locais.

A jusante e, em alguns casos, a montante da faixa incondicionalmente instável, ocorrem classes de alta instabilidade, relacionadas a zonas de convergência de escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo. Essa constatação pode ser observada no detalhe apresentado na Figura 3. A convergência do escoamento gera a elevação das poro-pressões no solo e facilita a ocorrência dos escorregamentos. Após a ruptura da massa de solo, as zonas de convergência também facilitam o transporte do material escorregado devido à ação da água, sendo este o principal mecanismo de deflagração dos fluxos de detritos que se sucederam a partir dos escorregamentos. Nas partes mais baixas aparecem áreas de maior estabilidade em relação aos escorregamentos. Entretanto, muitas destas áreas apresentam-se ao longo das linhas de fluxo que tem início nas encostas propensas a escorregamentos e, portanto, são claramente áreas propensas a serem atingidas por fluxos de detritos.

A Figura 4 apresenta as curvas ROC (FAWCETT, 2006) adaptadas para a simulação realizada. A curva foi construída considerando todos os pixels situados dentro das cicatrizes e todos os pixels dentro da área de estudo. Observa-se um bom desempenho do modelo, principalmente quando observada a distância entre a curva que representa os escorregamentos e a distribuição da área de estudo em geral. Com base nas curvas ROC adaptadas, é possível inferir um valor limiar condizente para distinção da área de estudo em regiões estáveis e instáveis. Utilizando o valor de $\log q/T$ igual a -3,1, o modelo apresenta um bom desempenho alcançando um índice de acerto (IA) de 68,7% e um índice de erro (IE) de 6,0%. Ao analisar as cicatrizes separadamente, percebe-se que todas as cicatrizes (100%) apresentaram ao menos um pixel classificado como instável em seu interior, sendo a área total classificada como instável na área de estudo da ordem de 6,1%.

Figura 4 – Curvas ROC adaptadas para a simulação de estabilidade de encostas



Considerando o mapa apresentado, conclui-se que as regiões de ocorrência de escorregamentos no evento de 16 de dezembro de 2020 foram detectadas pelo modelo de estabilidade de encostas. Desta maneira, tais regiões poderiam ter sido previamente identificadas como áreas de perigo a escorregamentos translacionais rasos e tal ação poderia embasar a adoção de medidas preventivas, possivelmente reduzindo os impactos do evento.

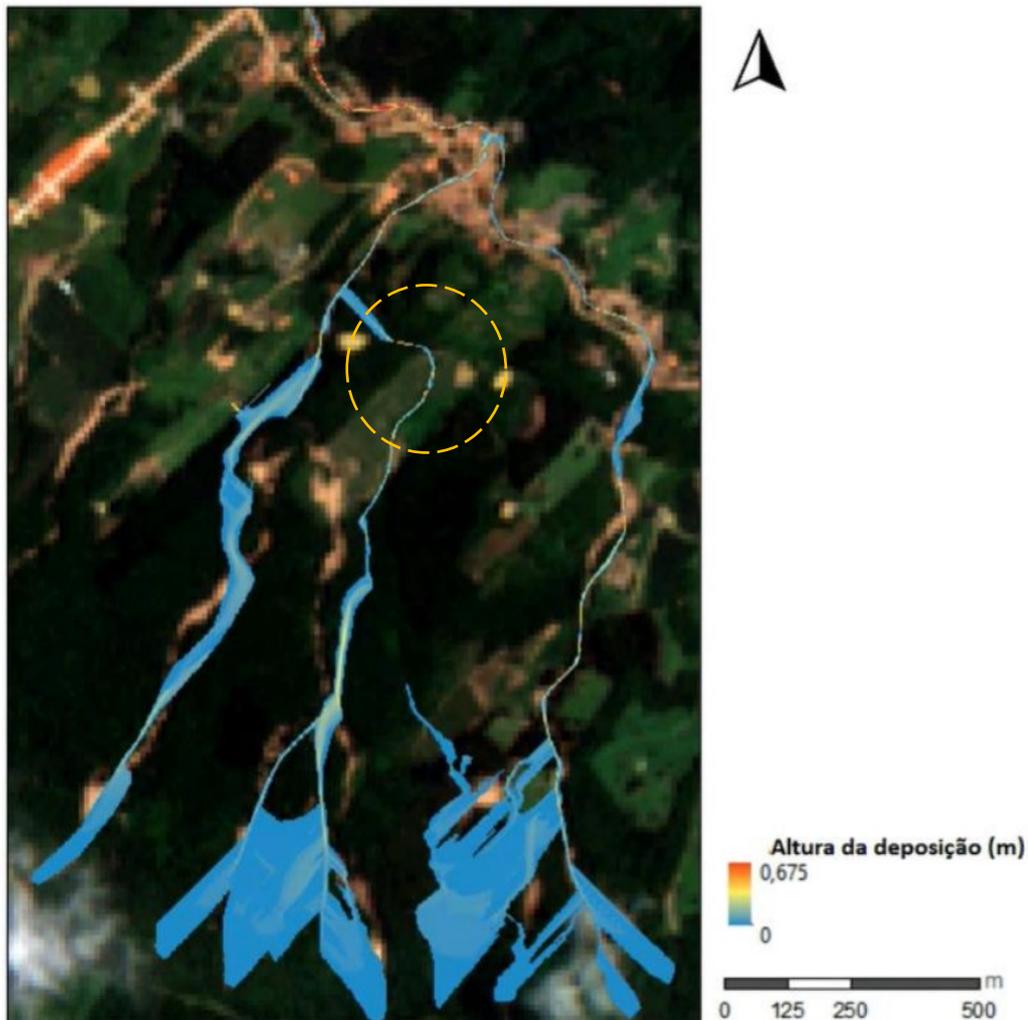
Modelagem de fluxo de detritos

A simulação de fluxo de detritos é apresentada na Figura 5. O IA desconsiderando as áreas de iniciação foi de 43%, enquanto o IE foi de 14% e a comissão de 62%. Como o MDT utilizado foi elaborado previamente ao fluxo de detritos, a feição oriunda do desprendimento dos solos e rochas da encosta não é considerada na simulação. Dessa maneira, inicialmente há uma dispersão grande do fluxo, porém, como pode ser observado na Figura 4, eles confluem para um caminho preferencial e a maior parte das áreas de dispersão possui menos que 1 cm de deposição, ou seja, representa o escoamento de uma lâmina menor de fluxo. Além do mais, todos os pontos de iniciação demonstram caminho preferencial em direção ao arroio Revólver, permeando a área urbana.

Outra diferença observada reside nas iniciações centrais, onde o fluxo simulado teve um desvio para a direita (circulado em amarelo) se comparado com o caminho observado. Entretanto, após confluência dos fluxos, eles seguem um caminho preferencial que mostra que o fluxo passa próximo às residências, indicando que a área residencial se desenvolveu em uma região perigosa.

Dessa maneira, é possível observar que a determinação de áreas propensas a serem atingidas pelo fluxo de detritos a priori do evento é de extrema importância, considerando seu potencial destrutivo e a velocidade com a qual se desenvolve. O modelo mostrou-se suficientemente capaz de indicar áreas propensas a fluxos de detritos e poderia ser utilizado em estudos prévios de mapeamento de áreas propensas a estes processos. Ressalta-se uma das principais habilidades deste modelo que é a simulação de inúmeros fluxos de detritos de maneira concomitante e consideração da interação entre eles. Tal habilidade possibilita uma análise mais realista destes processos.

Figura 5 – Simulação do fluxo de detritos do bairro Revólver em Presidente Getúlio



Modelagem de suscetibilidade topográfica à inundação

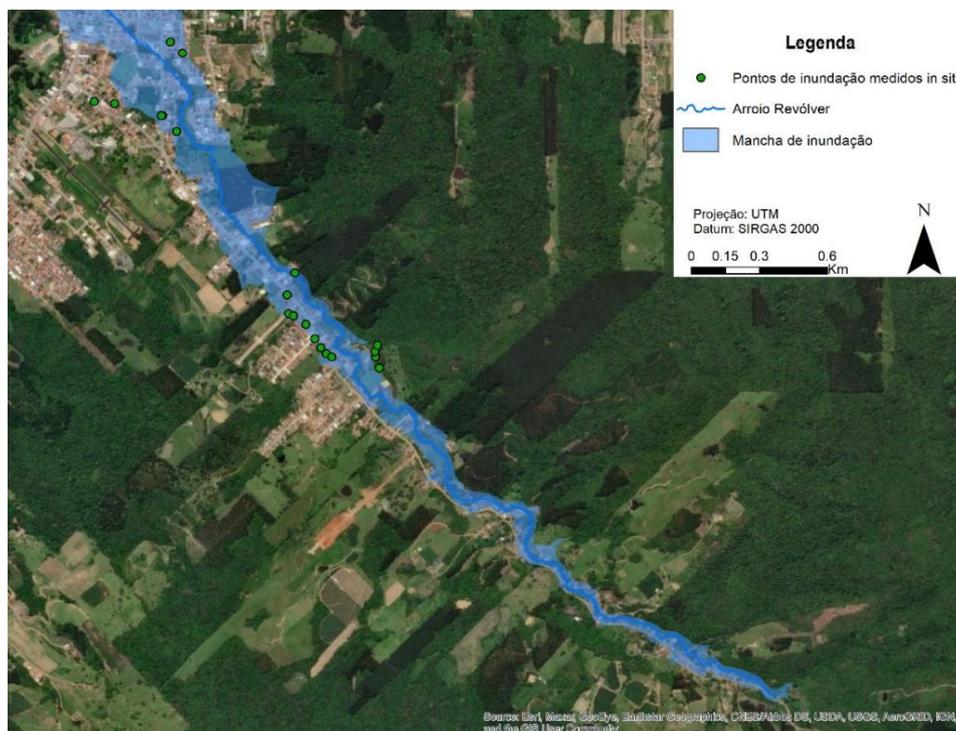
No município de Rio do Sul a mancha de inundação preliminarmente estimada abrangeu uma área de aproximadamente 2,2 km² causada pelo transbordamento do Ribeirão das Cobras conforme a Figura 6.

Figura 6 – Mapa de inundação estimada com HAND para o Ribeirão Cobras em Rio do Sul.



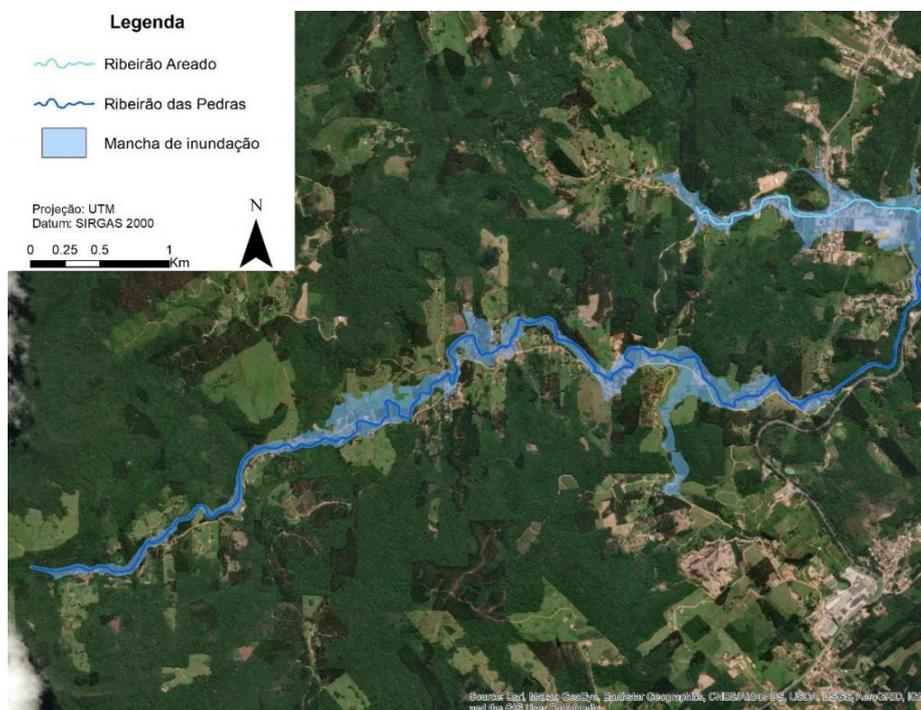
Na Figura 7 segue apresentado o mapa preliminar de inundação para o Arroio Revólver no município de Presidente Getúlio, abrangendo uma área de aproximadamente 0,73 km². Observa-se um maior espriamento da mancha na região urbanizada localizada em uma área com baixas declividades.

Figura 7 – Mapa de inundação estimada com HAND para o Arroio Revólver em Presidente Getúlio.



Na Figura 8 está apresentada a mancha de inundação preliminar para os Ribeirões das Pedras e Areado localizados no município de Ibirama. A mancha para o Ribeirão Areado alcançou uma área de aproximadamente 0,50 km² e para o Ribeirão das Pedras de 0,95 km², totalizando uma área de aproximadamente 1,45 km² no município de Ibirama.

Figura 8 – Mapa de inundação estimada com HAND para o Ribeirão Areado e Ribeirão das Pedras em Ibirama.



A inundação gerada por esse evento apresentou elevada competência e capacidade de transporte de sedimentos e material grosseiro, resultando em alta concentração de sedimentos e detritos, sendo classificada como uma inundação de detritos. A principal fonte dos sedimentos e detritos foram os escorregamentos e fluxos de detritos ocorridos nas encostas a montante, o que fez com que a inundação adquirisse alta capacidade para deslocar grandes volumes de água, detritos e sedimentos ao longo do seu trajeto. Grande parte deste material foi depositada nas áreas de menor declividade, atingidas pela inundação, incluindo regiões com maior grau de urbanização. Os processos de transporte e deposição dos sedimentos e detritos ao longo do leito dos rios afetados causaram degradação das margens dos rios alterando as suas características geomorfológicas. De forma que as concentrações de sedimento e turbidez possam ser influenciadas por esse desastre em eventos subsequentes de precipitação.

CONCLUSÕES

O estudo buscou analisar os processos resultantes do evento de precipitação extrema ocorrido em dezembro de 2020 no Alto Vale do Itajaí, através da simulação do desastre por modelagem matemática. Os modelos foram capazes de representar de maneira satisfatória os fenômenos ocorridos nas sub-bacias do Ribeirão das Pedras, Arroio Revólver e Ribeirão Cobras.

Afirma-se, portanto, que a implementação de modelagem matemática de movimentos de massa e inundações apresenta potencial preditivo e pode ser aplicada como auxiliar na tomada de decisões de gestão territorial municipal e em gestão de risco. Ainda, considerando-se que os movimentos de massa e inundações bruscas puderam ser representadas por modelos matemáticos, constata-se que as

áreas propensas a tais eventos poderiam ter sido previamente identificadas pelos órgãos responsáveis, reduzindo o impacto do evento.

Ainda, pelo resultado da análise de suscetibilidade topográfica à inundação e dos fluxos de detritos, evidenciou-se que as principais áreas afetadas foram aquelas próximas às margens de arroios, ribeirões e rios da região. Isto é, as regiões mais propensas a estes fenômenos e, assim, de maior perigo, são as regiões associadas às Áreas de Preservação Permanente. Afirma-se, desta forma, que a conservação de APP's, além do atendimento à legislação ambiental, atua como redutor de risco e mitigador dos impactos dos fenômenos supracitados, sendo necessária sua fiscalização para fins de prevenção de riscos de desastres.

REFERÊNCIAS

- BAAS, S. et al. “*Disaster risk management systems analysis: A guidebook*”. 1. ed. Rome: FAO-UN, 2008.
- FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, v. 27, n. 8, p. 861-874, 2006.
- GODOY J.V., BIEHL A., MELO C.M., MICHEL G.P. “*Implementação do modelo SHALSTAB em ferramentas para ArcGis e Qgis*”. Encontro Nacional de Desastres (1., jul. 2018, Porto Alegre). Anais. Porto Alegre: ABRHidro, 2018.
- KOBIYAMA, M. et al. “*Hydrological disasters reductions: lessons from hydrology*”. In: SENZ, Maurício Luiz; MONDARDO, Renata Iza (Org.). *Science and Technology for Environmental Studies*. Florianópolis: Ufsc, 2010. p. 49-72.
- MICHEL, G. P. “*Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação*”. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, BR. 2013.
- MACDONALD, R. “*Introduction to Natural and Man-made Disasters and their Effects on Buildings*”. Oxford: Elsevier. 2003, 257p.
- MOHIT, M. A.; SELLU, G. M. “*Mitigation of Climate Change Effects through Non-structural Flood Disaster Management in Pekan Town, Malaysia*”. *Procedia - Social And Behavioral Sciences*, v. 85, p. 564-573, set. 2013.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. “*A physically based model for the topographic control on shallow landsliding*”. *Water Resources Research*, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.
- O'LOUGHLIN, E. M. “*Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis*”. *Water Resources Research*, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.
- PAUL, L. R. “*Proposição de modelo para simulação de fluxos de detritos em escala de bacia*”. 2020. 204 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- 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 Sensing of Environment*, v. 112, p. 3469-3481. 2008.
- RODRIGUES, D. M. M.; AZZAM, R. “*Landslide hazard and cascading effects following the extreme rainfall event on Madeira Island. Natural Hazards*”, [S.L.], v. 65, n. 1, p. 635-652, 21 set. 2012. Springer Science and Business Media LLC. 2010.
- SCHWARZ, H. “*Identificação, mapeamento e caracterização de cicatrizes de escorregamentos*”. 154 pg. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2019.
- SELBY, M. J. “*Hillslope materials and processes*”. Ed. 2. Oxford University Press Inc. New York. 1993.
- SORBINO, G.; SICA, C. & CASCINI, L. “*Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models*”. *Natural Hazards*, v. 53, n. 2, p. 313-332, 2010.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH).