

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 26/06/2028.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



Ministério da Ciência,
Tecnologia e Inovações



DÉBORA FERREIRA

**ROTAS DE EVACUAÇÃO E PONTOS DE ENCONTRO
SEGUROS EM ÁREAS DE RISCO DE DESASTRES: modelagem
baseada em agentes**

DÉBORA FERREIRA

**ROTAS DE EVACUAÇÃO E PONTOS DE ENCONTRO SEGUROS EM ÁREAS DE
RISCO DE DESASTRES: modelagem baseada em agentes**

Tese apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São José dos Campos; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTORA pelo Programa de Pós-Graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres Naturais. Linha de pesquisa: Desastres associados a eventos extremos, inundações e movimentos de massa.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões

Coorientadora: Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

São José dos Campos

2026

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2026]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Ferreira, Débora

Rotas de evacuação e pontos de encontro seguros em áreas de risco de desastres: modelagem baseada em agentes / Débora Ferreira. - São José dos Campos : [s.n.], 2026.
82 f. : il.

Tese (doutorado) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2026.

Orientador: Silvío Jorge Coelho Simões

Coorientadora: Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

1. Modelagem baseada em agentes. 2. Rotas de evacuação. 3. Pontos de encontro seguros. 4. Riscos geológicos e hidrológicos. I. Simões, Silvío Jorge Coelho, orient. II. Mendes, Tatiana Sussel Gonçalves, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. V. Universidade Estadual Paulista (UNESP). VI. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VII. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto mais imediato se manifesta na capacidade de apoiar a elaboração e atualização de Planos de Contingência municipais. Os modelos desenvolvidos permitem identificar rotas de evacuação e pontos de encontro seguros e acessíveis à população antes mesmo da ocorrência de um evento, antecipando cenários e reduzindo o tempo de resposta em situações de emergência. A identificação de pontos de encontro como etapa estruturada do planejamento representa uma contribuição direta para a operacionalização das ações de evacuação, orientando onde a população deve se reunir inicialmente antes de ser encaminhada a abrigos permanentes. Outro diferencial da pesquisa consiste na consideração integrada de múltiplos riscos, incorporando simultaneamente áreas sujeitas a inundações e movimentos de massa em uma mesma estrutura de análise. A flexibilidade e escalabilidade dos modelos permitem sua adaptação a municípios brasileiros com diferentes contextos, ampliando o alcance potencial da pesquisa. Em um país marcado pela recorrência de desastres hidrológicos e geológicos e pela crescente urbanização de áreas vulneráveis, ferramentas como as propostas nesta tese representam um avanço concreto na direção de comunidades mais resilientes e preparadas.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The most immediate impact of this research lies in its potential to support the development and updating of municipal Contingency Plans. The developed models enable the identification of evacuation routes and assembly points that are safe and accessible to the population prior to the occurrence of an event, thereby anticipating potential scenarios and reducing response times during emergency situations. The identification of assembly points as a structured component of evacuation planning represents a direct contribution to the operationalization of evacuation procedures, providing guidance on where the population should initially gather before being transferred to permanent shelters. Another distinguishing feature of this research is the integrated consideration of multiple hazards, simultaneously incorporating areas susceptible to flooding and mass movements within a single analytical framework. The flexibility and scalability of the models allow their adaptation to municipalities with different territorial and socio-environmental contexts, thereby expanding the potential applicability of the proposed approach. In a country characterized by the recurrent occurrence of hydrological and geological

disasters and the continued urbanization of vulnerable areas, tools such as those proposed in this thesis represent a tangible advancement toward more resilient and better-prepared communities.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões (Orientador)

Universidade Estadual Paulista

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Dr. José Luis Gonçalves Moreira da Silva Zêzere

Universidade de Lisboa

Instituto de Geografia e Ordenamento do Território

Dra. Alessandra Cristina Corsi

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Centro de Tecnologias Geoambientais

Dra. Silvia Midori Saito

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Dr. Márcio Roberto Magalhães de Andrade

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

São José dos Campos, 26 de junho de 2026.

AGRADECIMENTOS

A realização desta tese não seria possível sem o suporte, a colaboração e o incentivo de diversas pessoas e instituições.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes, pelo direcionamento preciso, pelas contribuições essenciais ao desenvolvimento desta pesquisa e, de forma especial, pela disponibilidade desde antes do início do doutorado. Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões, pelo acompanhamento, apoio e valiosas orientações ao longo de todas as etapas. A ambos, agradeço a confiança no potencial desta tese.

À Profa. Dra. Raquel Melo e ao Prof. Dr. José Luis Gonçalves Moreira da Silva Zêzere, do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT), Universidade de Lisboa, e ao Prof. Dr. Rui Ferreira de Figueiredo e Prof. Dr. José Paulo Elvas Duarte de Almeida, da Universidade de Coimbra, pela receptividade, pelas discussões enriquecedoras e pelo aprendizado proporcionado ao longo dos meus períodos de pesquisa em Portugal.

Ao João Vitor Alencar Rosa Ataíde, por sua participação no terceiro artigo, contribuindo de forma significativa para a consolidação dos resultados apresentados.

À Defesa Civil do município de Blumenau, Santa Catarina, pela disponibilização dos dados utilizados, fundamentais para os modelos desenvolvidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes) - Código de Financiamento 001, pelo apoio concedido durante parte deste percurso acadêmico.

À Seção Técnica de Pós-Graduação, pela atenção e pela clareza no atendimento às solicitações ao longo do doutorado.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite para a avaliação desta tese.

Às minhas amigas e aos meus amigos, que tornaram esta trajetória menos solitária e mais leve.

Por fim, à minha família, pelo apoio contínuo, incentivo e compreensão ao longo de todo este ciclo.

RESUMO

FERREIRA, Débora. **Rotas de Evacuação e Pontos de Encontro Seguros em Áreas de Risco de Desastres:** modelagem baseada em agentes. 2026. Tese de Doutorado (Doutorado em Desastres Naturais) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2026.

Esta tese aborda o planejamento de evacuação de pedestres em áreas de risco associadas a processos hidrológicos e geológicos, com foco na definição de rotas de evacuação e pontos de encontro seguros, aplicada ao município de Blumenau, Santa Catarina. Estruturada em três artigos, a pesquisa inicia com uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre elaboração de rotas de evacuação, a qual identificou uma lacuna relevante relacionada à aplicação de métodos de evacuação em desastres deflagrados por precipitações intensas no contexto brasileiro. Os artigos seguintes buscam suprir essa lacuna por meio da proposição de dois modelos baseados em agentes (ABM), integrados a dados geoespaciais. O primeiro, desenvolvido em NetLogo, utiliza análise de redes espaciais com restrições derivadas de áreas de risco (movimentos de massa e inundação) e pesos de arestas baseados em variáveis topográficas como distância, declividade e elevação. O segundo, desenvolvido em Python, apresenta um framework de otimização para a seleção de pontos de encontro seguros, incorporando heterogeneidade demográfica por meio de velocidades de caminhada diferenciadas por idade e sexo. Os resultados da RSL evidenciaram o predomínio de estudos voltados a tsunamis e baseados em modelos de Menor Custo de Distância (*Least-Cost Distance* - LCD), além de limitações relacionadas à replicabilidade metodológica em estudos com ABM. O modelo em NetLogo demonstrou capacidade de identificar rotas de evacuação eficientes e seguras, respeitando restrições espaciais e áreas de risco definidas. O modelo de otimização em Python alcançou taxa de sucesso de evacuação de 100% em todos os cenários simulados, com pontos de encontro consistentemente localizados em trechos viários topologicamente centrais, bem conectados, fora das zonas de risco e acessíveis a todos os agentes, evidenciando a robustez do modelo. Em conjunto, os modelos ampliam o campo de aplicação ao serem empregados em cenários de risco associados simultaneamente a inundações e movimentos de massa, demonstrando a viabilidade da integração entre ABM e dados geoespaciais para a definição de rotas de evacuação e pontos de encontro seguros. Os resultados reforçam o potencial dessa abordagem como suporte ao planejamento de evacuações, à tomada de decisão em situações de emergência e à elaboração de Planos de Contingência municipais.

Palavras-chave: modelagem baseada em agentes; rotas de evacuação; pontos de encontro seguros; riscos geológicos e hidrológicos; NetLogo; Python.

ABSTRACT

*FERREIRA, Débora. **Evacuation Routes and Safe Assembly Points in Disaster Risk Areas: agent-based modeling.** 2026. Doctorate Thesis (Doctorate degree in Natural Disaster) - São Paulo State University (UNESP), Institute of Science and Technology, National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), São José dos Campos, 2026.*

This thesis addresses pedestrian evacuation planning in areas at risk from hydrological and geological processes, focusing on the definition of evacuation routes and safe assembly points, with application to the municipality of Blumenau, Santa Catarina, Brazil. Structured around three articles, the research begins with a Systematic Literature Review (SLR) on evacuation route planning, which identified a significant gap related to the application of evacuation methods to disasters triggered by intense rainfall in the Brazilian context. The subsequent articles seek to address this gap through the development of two agent-based models (ABMs) integrated with geospatial data. The first model, developed in NetLogo, employs spatial network analysis with constraints derived from risk areas associated with mass movements and flooding, and edge weights based on topographic variables such as distance, slope, and elevation. The second model, developed in Python, presents an optimization framework for the selection of safe assembly points, incorporating demographic heterogeneity through walking speeds differentiated by age and sex. The SLR revealed the predominance of studies focused on tsunami evacuation and based on Least-Cost Distance (LCD) models, as well as limitations related to methodological replicability in studies employing ABMs. The NetLogo model demonstrated the ability to identify efficient and safe evacuation routes while respecting predefined spatial constraints and risk areas. The Python optimization model achieved a 100% evacuation success rate across all simulated scenarios, with assembly points consistently located on topologically central, well-connected road segments, outside risk zones, and accessible to all agents, demonstrating the robustness of the model. Taken together, the models expand the scope of application to risk scenarios simultaneously associated with flooding and mass movements, demonstrating the feasibility of integrating ABMs with geospatial data for the definition of evacuation routes and safe assembly points. The findings reinforce the potential of this approach to support evacuation planning, decision-making during emergency situations, and the development of municipal Contingency Plans.

Keywords: agent-based modeling; evacuation routes; safe assembly points; geological and hydrological hazards; NetLogo; Python.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 ARTIGOS	12
2.1 Artigo – Ferreira, D.; Mendes, T.S.G.; Simões, S.J.C.; Melo, R.; Zezerê, J.L. <i>GIS - Based Escape Routes for Disaster Risk Areas: a systematic literature</i>	12
2.2 Artigo – Ferreira, D.; Figueiredo, R.F.; Almeida, J.P.E.D.; Mendes, T.S.G.; Simões, S.J.C. <i>Exploring the Role of Dynamic Graph-based Modeling in Disaster Evacuation Route Simulation for Hydrologically Hazardous Areas</i>	35
2.3 Artigo – Ferreira, D.; Ataíde, J.V.A.R.; Almeida, J.P.E.D.; Figueiredo, R.F.; Mendes, T.S.G.; Simões, S.J.C. <i>Identifying Safe Assembly Points and Evacuation Routes in Risk Areas: An Agent-Based Modeling and Spatial Analysis Approach</i>	55
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação e a maior recorrência de desastres têm se consolidado como um dos principais desafios contemporâneos para a gestão de riscos em escala global. Esse cenário está associado a fatores como as mudanças climáticas, a expansão urbana desordenada e a ocupação de áreas de maior suscetibilidade a desastres, que contribuem para o aumento da exposição e da vulnerabilidade das populações. Nesse contexto, eventos extremos, como precipitações intensas, têm desencadeado inundações e movimentos de massa, gerando impactos cada vez mais expressivos sobre sistemas socioeconômicos, infraestruturas e vidas humanas (IPCC, 2023; WMO, 2024).

No contexto brasileiro, essa problemática assume contornos ainda mais complexos, em função da forte associação entre vulnerabilidade socioambiental, desigualdade socioespacial e padrões históricos de ocupação do território. A recorrência de desastres evidencia a fragilidade de diferentes porções do território, especialmente em áreas urbanas caracterizadas por ocupações informais em encostas e planícies de inundação, resultando em elevados índices de mortalidade e perdas materiais significativas (Marengo et al., 2023; Vieira et al., 2023; Egas et al., 2025).

Diante desse contexto, torna-se fundamental o fortalecimento de estratégias de gestão de riscos e resposta a desastres, dentre as quais se destacam os planos de contingência, que podem ser aprimorados por meio da definição de rotas de evacuação seguras e eficientes, bem como da identificação de pontos seguros de encontro, que correspondem a locais intermediários para os quais a população pode se deslocar antes de ser encaminhada a abrigos definitivos. A operacionalização desses componentes exige a consideração integrada de variáveis como rede viária, topografia, uso e ocupação do solo, presença de áreas de risco e características dos indivíduos expostos (Wood; Schmidtlein, 2012; Wood et al., 2016; Faucher et al., 2020)

Considerando a complexidade envolvida na integração dessas variáveis, diferentes abordagens metodológicas têm sido empregadas para apoiar o planejamento de evacuação, entre as quais se destacam os modelos baseados em Menor Custo de Distância (*Least-Cost Distance* - LCD) e suas variações anisotrópicas. Embora eficientes para análises de larga escala, essas abordagens tratam o processo de evacuação de forma estática, assumindo homogeneidade entre os indivíduos e desconsiderando aspectos como tomada de decisão e interações entre evacuados (Mostafizi et al., 2019). A Modelagem Baseada em Agentes (*Agent-Based Modeling* — ABM), por sua vez, configura-se como uma abordagem mais realista para

a simulação de cenários de evacuação, ao permitir representar indivíduos heterogêneos e sua adaptação a condições dinâmicas do ambiente (Wilensky; Rand, 2015; Macal; North, 2010).

Embora a ABM represente avanços importantes, persistem lacunas relevantes na literatura: a predominância de estudos voltados a tsunamis em contextos asiáticos e norte-americanos resulta em uma atenção ainda limitada aos cenários de desastres hidrológicos e geológicos no Brasil. Além disso, enquanto a definição de rotas de evacuação tem sido amplamente abordada, a identificação de pontos de encontro seguros permanece pouco explorada. Observa-se ainda a predominância de estudos voltados a um único tipo de risco, sendo relativamente escassas as iniciativas que incorporam simultaneamente múltiplos riscos em um mesmo modelo.

Sob essa perspectiva, a presente tese parte da hipótese de que abordagens integradas podem aprimorar a análise de processos de evacuação, contribuindo para a definição de rotas de evacuação para pedestres e pontos de encontro seguros em cenários associados a múltiplos riscos. O objetivo geral é propor e aplicar um modelo integrado para a identificação e otimização de rotas de evacuação para pedestres e pontos de encontro seguros, com ênfase em processos hidrológicos e geológicos. Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos: 1) analisar criticamente o estado da arte das metodologias de elaboração de rotas de evacuação, com foco em métodos utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG); 2) desenvolver um ABM para a simulação de evacuação em áreas sujeitas a múltiplos riscos, considerando variáveis espaciais como distância, elevação, declividade e presença de áreas de risco; 3) integrar, no processo de modelagem, a definição de rotas de evacuação e a identificação de pontos de encontro seguros; e 4) avaliar o desempenho e a aplicabilidade dos modelos em cenários reais, considerando diferentes posições dos agentes, heterogeneidade demográfica e restrições espaciais.

O diferencial desta tese reside na identificação simultânea de rotas de evacuação e pontos de encontro seguros em áreas de risco a processos hidrológicos e geológicos. A definição de pontos de encontro como etapa estruturada do planejamento de evacuação constitui uma contribuição original, resultando em modelos mais aderentes à realidade brasileira e adaptáveis a diferentes escalas e contextos de aplicação.

A tese é estruturada em três artigos científicos progressivos e articulados entre si. O primeiro apresenta uma revisão sistemática da literatura, conduzida com o auxílio da ferramenta StArt (*State of the Art through Systematic Review*) e utilizando o fluxograma PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), permitindo

identificar e sistematizar os principais modelos, ferramentas e algoritmos utilizados na elaboração de rotas de evacuação em ambiente SIG. O segundo desenvolve um ABM, utilizando o software NetLogo, para simular a evacuação pedestre em áreas simultaneamente suscetíveis a inundações e movimentos de massa, incorporando dados geoespaciais ao ambiente de simulação. O terceiro consolida a proposta central da tese ao integrar ABM, análise de redes espaciais e técnicas de otimização para a identificação simultânea de rotas de evacuação para pedestres e pontos de encontro seguros, por meio da utilização da linguagem Python, considerando a heterogeneidade demográfica dos agentes e penalizações espaciais associadas à proximidade de áreas de risco. Ambos os modelos ABM, desenvolvidos no segundo e no terceiro artigo, foram elaborados a partir de dados do município de Blumenau, Santa Catarina.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos evidenciam o potencial de abordagens integradas para representar a complexidade dos processos de evacuação. A trajetória da pesquisa parte de uma lacuna identificada no primeiro artigo, que evidenciou a escassez de estudos voltados a desastres deflagrados por precipitações intensas, em especial aqueles que envolvem simultaneamente inundações e movimentos de massa, bem como a ausência de aplicações no contexto brasileiro. Os artigos subsequentes respondem diretamente a essa lacuna, desenvolvendo e aprimorando modelos computacionais aplicados a áreas com esse perfil de risco, utilizando dados do município de Blumenau (SC).

A RSL também revelou que, em grande parte dos estudos selecionados, as metodologias empregadas não eram descritas com clareza suficiente para permitir sua replicação, dificuldade particularmente acentuada nos estudos que utilizaram modelos baseados em agentes (ABM). Essa constatação orientou o esforço metodológico desta tese no sentido de detalhar cada etapa dos modelos desenvolvidos.

Um dos principais avanços desta pesquisa reside na definição simultânea de rotas de evacuação e na identificação de pontos de encontro seguros de forma integrada. Esse aspecto amplia a capacidade de análise em relação a métodos convencionais, ao considerar não apenas o deslocamento dos indivíduos, mas também a adequação dos locais de destino em termos de segurança, acessibilidade e conectividade.

Destaca-se que, até o momento, não há estudos que tratem especificamente da seleção otimizada de pontos de encontro seguros como etapa prévia à chegada aos abrigos permanentes por meio de modelagem baseada em agentes. Essa lacuna é relevante do ponto de vista operacional, pois a ausência de orientação sobre onde a população deve se reunir inicialmente pode comprometer a eficiência da evacuação e ampliar os riscos. O terceiro artigo desta tese endereça diretamente essa ausência, constituindo uma contribuição original.

No contexto brasileiro, em que a definição de rotas de evacuação para pedestres ainda é frequentemente realizada de forma manual, a abordagem proposta representa um avanço significativo ao introduzir um processo sistematizado e baseado em dados, contribuindo para maior consistência e eficiência no planejamento da evacuação. Os desastres ocorridos em Petrópolis (RJ), Recife (PE), São Sebastião (SP) e no Rio Grande do Sul, entre 2022 e 2024, reforçam a urgência de ferramentas que apoiem a tomada de decisão para evacuação segura nesses contextos, evidenciando que a ausência de planejamento operacional adequado e a baixa

capacidade de resposta das comunidades em áreas de risco tendem a amplificar significativamente os impactos humanos dos desastres.

Do ponto de vista metodológico, destaca-se a evolução do modelo ao longo da tese, desde uma implementação inicial em NetLogo até uma abordagem mais flexível e escalável em Python, permitindo maior integração com análise de redes espaciais e tratamento de dados geoespaciais. A incorporação de variáveis topográficas como declividade, elevação, além de áreas de risco e heterogeneidade demográfica dos agentes (faixa etária e sexo), possibilitou a construção de cenários mais realistas, reforçando a aplicabilidade da abordagem proposta. No terceiro artigo, considerando as duas áreas de estudo e os cenários simulados envolvendo agentes com posições fixas e distribuídas aleatoriamente, e heterogeneidade demográfica controlada, foi alcançada uma taxa de sucesso de evacuação de 100%, ou seja, sem agentes classificados como bloqueados ou incapazes de atingir os pontos de encontro designados. Esse resultado reforça a robustez do modelo desenvolvido.

Cabe também reconhecer que uma das principais limitações dos modelos desenvolvidos reside na dependência da qualidade e resolução espacial dos dados de entrada. A precisão das rotas geradas é diretamente influenciada pela rede viária, pela delimitação das áreas de risco e pelos dados de elevação e declividade disponíveis. Bases de dados com baixa resolução ou desatualizadas podem comprometer a representação da área e a classificação das barreiras (áreas de risco), afetando a viabilidade e a confiabilidade das rotas simuladas.

Como perspectiva futura, destaca-se o potencial de evolução do modelo, desenvolvido no terceiro artigo, para aplicações em tempo real, por meio da delimitação dinâmica de áreas afetadas diretamente no ambiente de simulação, permitindo a geração automatizada de rotas de evacuação e pontos de encontro seguros a partir de polígonos de risco definidos no momento da emergência. Análises futuras poderão incorporar mais variáveis físicas e comportamentais dos agentes, como características individuais, velocidade diferenciada e tomada de decisão, dinâmicas de evacuação multimodal com interação entre pedestres e veículos, e a exploração de caminhos alternativos além da rede viária principal. Esses avanços ampliariam a capacidade do modelo de representar cenários de evacuação mais complexos, fortalecendo seu uso como ferramenta de apoio à tomada de decisão em situações de emergência e sua contribuição para a gestão de riscos e desastres.

Destaca-se, ainda, a integração da participação popular como etapa complementar de validação das rotas de evacuação e dos pontos de encontro definidos. A incorporação de mecanismos de consulta e engajamento comunitário permitiria verificar as rotas geradas pelos

modelos considerando o conhecimento territorial e a percepção de risco da população local, contribuindo para o refinamento das soluções propostas e para maior aderência das rotas à realidade vivida pelos moradores. Esse processo fortaleceria a legitimidade e a efetividade do planejamento de evacuação, podendo as rotas validadas ser formalmente incorporadas aos Planos de Contingência municipais, subsidiando as ações de Defesa Civil na preparação e resposta a emergências e desastres.

REFERÊNCIAS

- EGAS, H. M.; STABILE, R. A.; ANDRADE, M. R. M. et al. Comprehensive inventory and initial assessment of landslides triggered by autumn 2024 rainfall in Rio Grande do Sul, Brazil. **Landslides**, v. 22, n. 2, p. 579–589, 2025. DOI: 10.1007/s10346-024-02410-w.
- FAUCHER, J.-E.; DÁVILA, S.; HERNÁNDEZ-CRUZ, X. Modeling pedestrian evacuation for near-field tsunamis fusing ALCD and agent-based approaches: a case study of Rincón, PR. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 49, p. 101606, 2020. DOI: 10.1016/j.ijdr.2020.101606.
- IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. DOI: 10.59327/ipcc/ar6-9789291691647.001.
- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 4, n. 3, p. 151–162, 2010. DOI: 10.1057/jos.2010.3.
- MARENGO, J. A.; ALCANTARA, E.; CUNHA, A. P. et al. Flash floods and landslides in the city of Recife, northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, v. 39, p. 100545, 2023. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100545.
- MOSTAFIZI, A.; WANG, H.; COX, D.; DONG, S. An agent-based vertical evacuation model for a near-field tsunami: choice behavior, logical shelter locations, and life safety. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 34, p. 467–479, 2019. DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.12.018.
- VIEIRA, E. T.; LEMES, M. C. R.; SILVA, R. C. et al. Desenvolvimento regional e a intensificação das catástrofes socionaturais: o caso do município de São Sebastião/SP. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 19, n. 3, p. 469–492, 2023.
- WILENSKY, U.; RAND, W. **An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo**. Cambridge: MIT Press, 2015.
- WOOD, N. J.; SCHMIDTLEIN, M. C. Anisotropic path modeling to assess pedestrian-evacuation potential from Cascadia-related tsunamis in the US Pacific Northwest. **Natural Hazards**, v. 62, n. 2, p. 275–300, 2012. DOI: 10.1007/s11069-011-9994-2.
- WOOD, N.; JONES, J.; SCHMIDTLEIN, M.; SCHELLING, J.; FRAZIER, T. Pedestrian flow-path modeling to support tsunami evacuation and disaster relief planning in the U.S. Pacific Northwest. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 18, p. 41–55, 2016. DOI: 10.1016/j.ijdr.2016.05.010.
- WMO. **State of the Global Climate 2023**. Geneva: World Meteorological Organization, 2024. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Global-statement%202023_en.pdf&type=pdf&navigator=1. Acesso em: 3 jul. 2024.