Planejamento de evacuação em áreas inundáveis: integração entre base cartográfica cadastral, análise de redes e sistema automatizado de notificação

Evacuation Planning in Flood-Prone Areas: Integration of Cadastral Cartographic Data, Network Analysis, and an Automated Notification System

Matheus Augusto Felix da Silva[1]

Matheus Dimas Lopes[2]

Daniel Camilo de Oliveira Duarte[3]

Claudio Daiwison Pereira de Sousa[4]

Júlio César de Oliveira[5]

RESUMO: As inundações figuram entre os desastres naturais de maior impacto nas áreas urbanas brasileiras, exigindo estratégias eficientes para planejamento da evacuação e redução da vulnerabilidade da população. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicação da multifinalidade presente no Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) como base para a modelagem de redes viárias e o desenvolvimento de um sistema automatizado de notificação para evacuação de áreas suscetíveis à inundação. O estudo foi desenvolvido no município de Itabirito, Minas Gerais, utilizando dados cadastrais municipais, Sistemas de Informações Geográficas (SIG), análise de redes fundamentada na Teoria dos Grafos e automação em Python. A metodologia compreendeu a identificação dos logradouros inseridos na mancha de inundação, definição de pontos de abrigo, geração de pontos de partida, modelagem das rotas de fuga, validação dos trajetos por comparação com o *Google Maps* e desenvolvimento de um sistema de envio de alertas personalizados via *WhatsApp*. Foram definidos 20 pontos de abrigo e geradas 111 rotas de fuga, das quais aproximadamente 76% apresentaram extensão inferior a 1 km, indicando adequada distribuição espacial dos locais de abrigo. A comparação com o *Google Maps* evidenciou elevada compatibilidade entre os trajetos, demonstrando a confiabilidade da modelagem proposta. O sistema de notificação mostrou-se operacionalmente viável, permitindo a emissão de alertas em tempo inferior ao disponível para evacuação. Os resultados evidenciam o potencial do CTM como infraestrutura estratégica para apoio às ações de Proteção e Defesa Civil.

Palavras-chave: Cadastro Territorial Multifinalitário; Inundações; Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT: Floods are among the natural hazards with the greatest impact on Brazilian urban areas, requiring efficient strategies for evacuation planning and vulnerability reduction. This study aims to demonstrate the application of the multifunctionality inherent to the Multipurpose Territorial Cadastre (MTC) as the basis for road network modeling and the development of an automated notification system for the evacuation of flood-prone areas. The research was conducted in the municipality of Itabirito, Minas Gerais, Brazil, using municipal cadastral data, Geographic Information Systems (GIS), graph theory-based network analysis, and Python automation. The proposed methodology included the identification of streets located within the flood extent, the definition of shelter locations, the generation of evacuation starting points, the modeling of evacuation routes, the validation of the routes through comparison with Google Maps, and the development of a WhatsApp-based notification system for personalized alerts. A total of 20 shelter locations and 111 evacuation routes were generated, of which approximately 76% were shorter than 1 km, indicating an adequate spatial distribution of shelters. Route validation showed a high level of agreement with Google Maps, confirming the reliability of the proposed network model. The notification system proved operationally feasible, allowing alerts to be sent within a time frame considerably shorter than the estimated evacuation window. The results demonstrate the potential of the Multipurpose Cadastre as a strategic spatial data infrastructure to support Civil Protection and Disaster Risk Management.

Keywords: Multipurpose Cadastre; Floods; Geographic Information System.

[1] Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenhria Civil / E-mail: matheus.felix@ufv.br
[2] Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenhria Civil / E-mail: matheus.d.dimas@ufv.br
[3] Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenhria Civil / E-mail: daniel.duarte@ufv.br
[4] Néreon Solutions / E-mail: engenharia@nereonengenharia.com
[5] Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenhria Civil / E-mail oliveirajc@ufv.br

1 INTRODUÇÃO

Os desastres naturais associados às inundações representam um dos principais desafios para o planejamento urbano e a gestão territorial, especialmente em municípios com intensa ocupação de áreas suscetíveis ao transbordamento de cursos d'água. O crescimento urbano desordenado, a impermeabilização do solo, as deficiências dos sistemas de drenagem e os efeitos das mudanças climáticas têm contribuído para o aumento da frequência e da intensidade desses eventos, ampliando significativamente a exposição da população aos riscos (Tucci, 2007; Vasco, 2016). Episódios recentes, como as inundações ocorridas no Rio Grande do Sul em 2024 e os rompimentos das barragens de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), evidenciam a necessidade de aprimorar os mecanismos de prevenção, alerta e resposta a desastres, demonstrando que a rapidez na evacuação pode ser determinante para a preservação de vidas.

Nesse contexto, o sucesso das ações de evacuação depende da disponibilidade de informações territoriais confiáveis e atualizadas. A identificação prévia dos imóveis situados em áreas de risco, das vias aptas à circulação durante a emergência e dos equipamentos públicos passíveis de utilização como pontos de abrigo constitui um requisito essencial para o planejamento de respostas eficientes. Entretanto, muitos municípios brasileiros ainda apresentam limitações relacionadas à organização e à atualização de suas bases cadastrais, dificultando a adoção de estratégias de evacuação compatíveis com a realidade local.

O Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM), regulamentado pela Portaria nº 3.242/2022 do Ministério do Desenvolvimento Regional (Brasil, 2022), configura-se como uma importante infraestrutura de dados espaciais para suprir essa demanda. Ao integrar informações cadastrais, físicas, ambientais, urbanísticas e de infraestrutura em uma base georreferenciada única, o CTM subsidia diferentes áreas da administração pública. Embora tradicionalmente empregado na gestão tributária, no planejamento urbano e na regularização fundiária, seu potencial para apoiar ações de Proteção e Defesa Civil ainda é pouco explorado, especialmente no planejamento operacional de evacuações.

Apesar dos avanços na modelagem hidrológica, no sensoriamento remoto e nos sistemas de alerta precoce, a maior parte das pesquisas concentra-se na identificação das áreas suscetíveis à inundação, dedicando menor atenção ao planejamento das ações de evacuação. Além disso, as soluções existentes normalmente utilizam informações geográficas em escala regional ou municipal, sem incorporar o detalhamento proporcionado pelos cadastros territoriais. Como consequência, os alertas tendem a abranger grandes áreas de forma generalizada, enquanto as rotas de fuga são definidas sem considerar a localização dos imóveis, a configuração da rede viária e a evolução espacial da inundação.

Dessa forma, identifica-se uma lacuna na integração entre a multifinalidade do CTM, a modelagem de redes viárias e sistemas automatizados de notificação para apoio às ações de evacuação. A utilização conjunta dessas informações permite identificar os imóveis potencialmente atingidos, estabelecer prioridades de evacuação, determinar rotas de fuga por meio da rede viária cadastrada e encaminhar alertas personalizados à população afetada.

Nesse cenário, o presente trabalho propõe a utilização da multifinalidade do CTM, através de seus insumos urbanisticos como elemento central para o planejamento da evacuação em áreas suscetíveis à inundação, integrando análises espaciais em Sistemas de Informações Geográficas, modelagem de redes baseada na teoria dos grafos e um sistema automatizado de notificação via aplicativo de mensagem. Diferentemente das abordagens convencionais, que tratam separadamente o mapeamento das áreas de risco e a emissão de alertas, a metodologia estabelece um fluxo integrado entre a identificação dos imóveis vulneráveis, a definição das rotas de fuga, a priorização espacial da evacuação e a

comunicação com a população.

Assim, este trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicação dos dados do CTM na modelagem de uma rede viária para o planejamento de rotas de fuga e no desenvolvimento de um sistema automatizado de notificação destinado à evacuação de áreas inundáveis. Especificamente, busca-se: (i) estruturar as informações cadastrais referentes aos logradouros, lotes, unidades cadastrais e edificações públicas em um geodatabase; (ii) identificar, por meio de análises espaciais, os imóveis e logradouros potencialmente atingidos pela mancha de inundação; (iii) definir pontos de partida para evacuação a partir da geometria da rede viária; (iv) modelar rotas de fuga utilizando técnicas de análise de redes fundamentadas na teoria dos grafos; e (v) integrar essas informações a um sistema automatizado de notificação via *WhatsApp*, permitindo o envio de alertas personalizados contendo a prioridade de evacuação, o ponto de abrigo e a rota recomendada para cada logradouro.

2 O CADASTRO TERRITORIAL MULTIFINALITÁRIO COMO INFRAESTRUTURA PARA GESTÃO TERRITORIAL

O CTM constitui uma infraestrutura de dados espaciais destinada à integração das informações cadastrais das parcelas territoriais com dados físicos, ambientais, sociais, econômicos, jurídicos e de infraestrutura. Conforme estabelecido pela Portaria nº 3.242/2022, o CTM corresponde ao inventário oficial das parcelas municipais, organizado em uma base georreferenciada única, permitindo a interoperabilidade entre diferentes setores da administração pública (Brasil, 2022).

Tradicionalmente empregado em atividades relacionadas à arrecadação tributária, à regularização fundiária e ao planejamento urbano, o CTM passou a desempenhar papel estratégico na gestão territorial. A integração entre informações sobre imóveis, logradouros, equipamentos públicos e infraestrutura urbana fornece suporte à elaboração de diagnósticos espaciais e à tomada de decisão em áreas como planejamento ambiental, mobilidade urbana e gestão de riscos (Oliani, 2016).

A confiabilidade dessas aplicações depende da qualidade das informações cadastrais, tornando indispensável a realização de estudos de pré-cadastro para organização, atualização e validação das bases cartográficas e cadastrais, reduzindo inconsistências e aumentando a precisão das análises (de Aguiar Padial, 2018; Silva et al., 2022).

Mais recentemente, o CTM passou a ser empregado no apoio à gestão de desastres, permitindo identificar populações expostas, equipamentos públicos estratégicos, infraestrutura urbana e áreas suscetíveis a eventos extremos. Entretanto, a efetividade dessas aplicações depende da utilização de técnicas de análise espacial capazes de transformar os dados cadastrais em informações estratégicas para a tomada de decisão.

No presente estudo, o CTM constitui a principal base de dados para identificar os logradouros inseridos na mancha de inundação, localizar os pontos de abrigo e estruturar a rede viária utilizada na definição das rotas de evacuação.

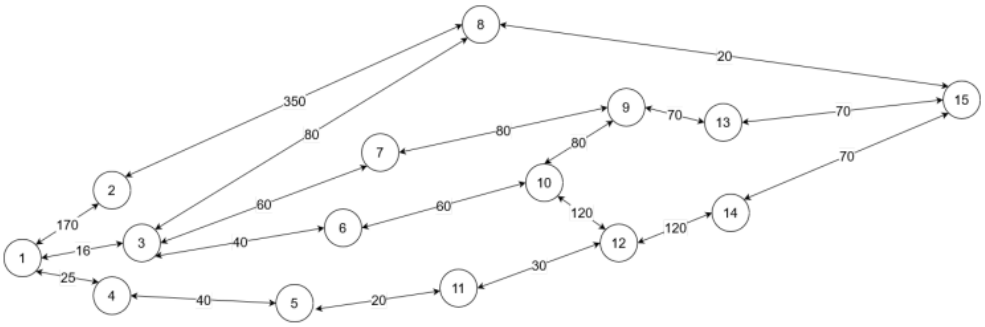
3 ANÁLISE DE REDES APLICADA AO PLANEJAMENTO DE ROTAS DE EVACUAÇÃO

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) constituem uma das principais ferramentas para aquisição, armazenamento, processamento e análise de informações espaciais, permitindo integrar dados geográficos e atributos descritivos em um ambiente computacional único (Longley et al., 2015). Entre suas diversas aplicações, destaca-se a análise de redes, amplamente utilizada no planejamento de sistemas de transporte, logística,

infraestrutura urbana e mobilidade.

Na modelagem de redes, a infraestrutura viária é representada por meio de grafos, estrutura matemática composta por vértices e arestas que representam, respectivamente, os pontos de conexão e os segmentos viários (Melo, 2014). Essa representação permite descrever a conectividade entre diferentes locais (Figura1) e aplicação de algoritmos de otimização para determinação de caminhos que minimizam critérios como distância, tempo de deslocamento ou custo operacional.

Figura 1 – Representação de um grafo ponderado



Fonte: Prieto e Lubacheski (2022)

Segundo a ESRI (2021), a análise de redes é amplamente empregada em sistemas de navegação, logística, transporte e planejamento urbano, tendo como uma de suas principais aplicações a determinação da rota mais eficiente entre dois pontos da rede. Em situações de emergência, essa abordagem também pode subsidiar o planejamento de evacuações ao identificar rotas seguras entre áreas suscetíveis e pontos de abrigo, contribuindo para reduzir o tempo de resposta e a exposição da população aos riscos.

Neste estudo, a integração entre o CTM e a análise de redes permite utilizar o cadastro municipal para identificar os logradouros inseridos na mancha de inundação, associá-los aos pontos de abrigo mais adequados e automatizar a definição das rotas de evacuação.

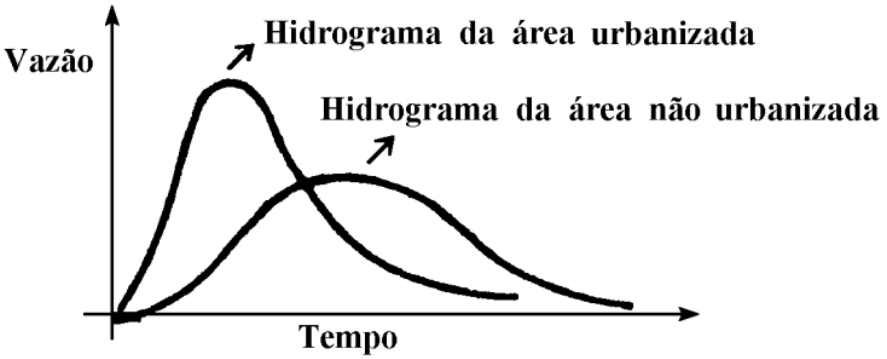
4 INUNDAÇÕES URBANAS E PLANEJAMENTO TERRITORIAL

As inundações são um dos principais riscos hidrológicos em áreas urbanas brasileiras. Ocorrem quando a água dos rios extravasa para as planícies de inundação ou para outras áreas que normalmente não ficam submersas. A intensidade e a distribuição das chuvas ao longo do tempo costumam ser a causa direta desses eventos. Mas a frequência, a magnitude e os impactos das inundações dependem também das mudanças que o ser humano provoca no uso e na ocupação do solo (Tucci, 2007).

O crescimento urbano desordenado promove alterações significativas no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. A impermeabilização do solo decorrente da pavimentação de vias, edificações e demais estruturas urbanas reduz a infiltração da água e aumenta o escoamento superficial, elevando os picos de vazão e reduzindo o tempo de concentração das águas pluviais (Tucci, 2007). Como consequência, áreas anteriormente consideradas seguras tornam-se mais suscetíveis à ocorrência de inundações.

A Figura 2 ilustra esse comportamento ao comparar os hidrogramas de bacias urbanizadas e não urbanizadas, evidenciando o aumento do pico de vazão e a redução do tempo de resposta hidrológica decorrentes da urbanização.

Figura 2 – Hidrogramas de escoamento superficial em áreas urbanizadas e não urbanizadas.



Fonte: Inundações Urbanas (Tucci, 2007)

Além dos impactos decorrentes da urbanização, as mudanças ambientais globais têm contribuído para o aumento da frequência e da intensidade dos eventos hidrológicos extremos, ampliando a vulnerabilidade das cidades aos desastres naturais (Rockström et al., 2009).

Nesse contexto, a gestão do risco de inundações demanda a integração entre planejamento territorial, informações espaciais e sistemas de apoio à decisão. Ferramentas capazes de identificar áreas vulneráveis, localizar a população potencialmente afetada e definir rotas seguras de evacuação contribuem para reduzir os impactos sociais, econômicos e ambientais desses eventos (Farias, 2019).

Embora os Sistemas de Informações Geográficas sejam amplamente empregados na gestão de riscos, ainda são limitados os estudos que utilizam o CTM como base para o planejamento operacional da Defesa Civil. Neste trabalho, o CTM fornece a infraestrutura cadastral necessária para identificar os logradouros suscetíveis à inundação, definir rotas de evacuação e subsidiar a emissão automatizada de notificações direcionadas à população afetada.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

Itabirito é um município localizado na região central do estado de Minas Gerais, com população estimada em 53.365 habitantes e área territorial de aproximadamente 544 km² (IBGE, 2022). Inserido na Região Metropolitana de Belo Horizonte, o município situa-se entre a capital mineira e a cidade histórica de Ouro Preto, ocupando posição estratégica no principal corredor logístico do Quadrilátero Ferrífero, conforme ilustrado na Figura 3. Essa localização confere ao município elevada importância econômica, uma vez que a atividade mineradora constitui a principal base de sua economia.

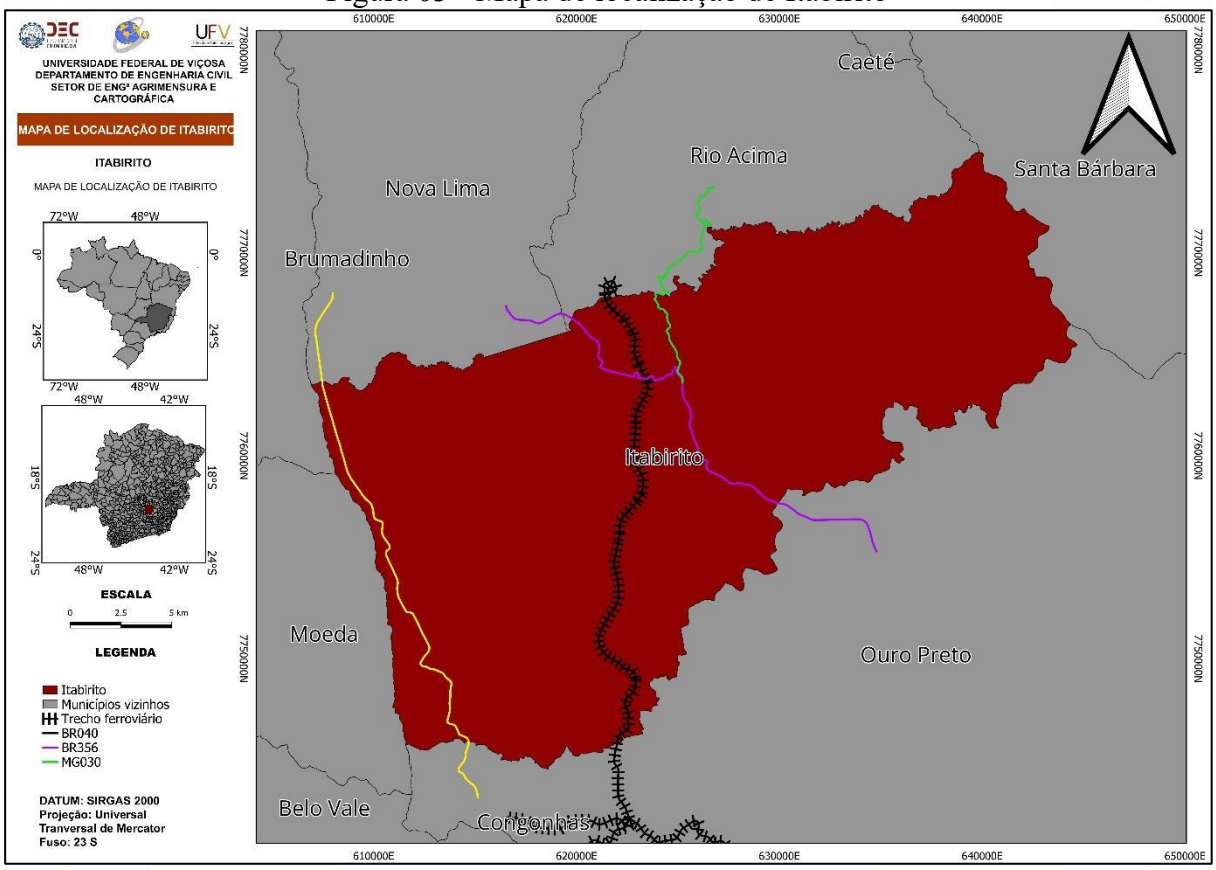
O território municipal integra o Quadrilátero Ferrífero, uma das mais importantes províncias minerais do mundo, caracterizada pela expressiva exploração de minério de ferro. Aproximadamente 7 km² do município são destinados à atividade de mineração, exercida por grandes empresas do setor (Araújo, 2023; Roeser e Roeser, 2010). Em decorrência dessa atividade, Itabirito dispõe de uma infraestrutura logística consolidada, composta pelas rodovias BR-040 e BR-356, além da Linha do Centro da antiga Estrada de Ferro Central do Brasil e da Ferrovia do Aço, anteriormente pertencente à Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), utilizadas para o transporte da produção mineral.

Paralelamente à relevância econômica, o município apresenta características que

favorecem a ocorrência de conflitos entre a ocupação urbana e os processos naturais. A expansão da malha urbana ao longo dos vales e cursos d'água, associada à impermeabilização crescente do solo e à concentração populacional na região central, aumenta a suscetibilidade à ocorrência de inundações e potencializa seus impactos sobre a população e a infraestrutura urbana. Nesse contexto, o planejamento de ações preventivas e a definição de rotas de evacuação tornam-se instrumentos fundamentais para a gestão do risco de desastres.

Considerando essas características, a área de estudo foi delimitada à região urbana de Itabirito, onde se concentram a maior parte da população, dos imóveis cadastrados, da infraestrutura viária e dos conflitos entre sociedade e natureza. Essa delimitação permite avaliar a aplicação integrada do CTM, da análise de redes e dos sistemas de informação geográfica no planejamento de rotas de evacuação em áreas suscetíveis à inundação.

Figura 03 - Mapa de localização de Itabirito



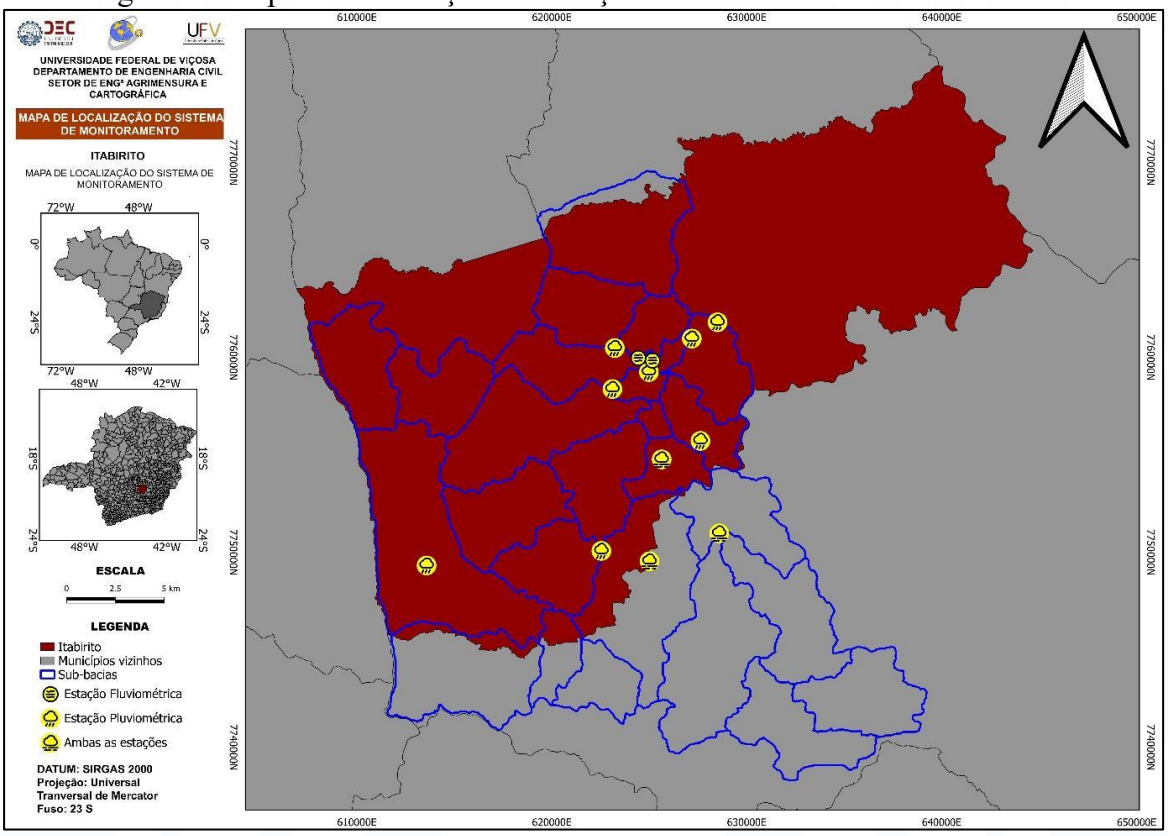
Fonte: Os autores (2026)

Com o objetivo de antecipar a ocorrência de desastres e subsidiar a tomada de decisão em situações de emergência, a Defesa Civil Municipal de Itabirito mantém um sistema de monitoramento hidrometeorológico composto por estações pluviométricas e fluviométricas distribuídas nas principais sub-bacias do município. Esses equipamentos realizam medições contínuas da precipitação e dos níveis dos cursos d'água, transmitindo informações em tempo real para a central de monitoramento e possibilitando a emissão de alertas preventivos. O município também dispõe de estudos e modelagens do cenário de rompimento da barragem de rejeitos da Gerdau, cujas simulações indicam comportamento espacial semelhante ao de grandes eventos de inundação e estimam um tempo aproximado de seis horas para a chegada da onda de rejeitos à região central de Itabirito.

A metodologia proposta complementa essa estrutura ao integrar os dados do

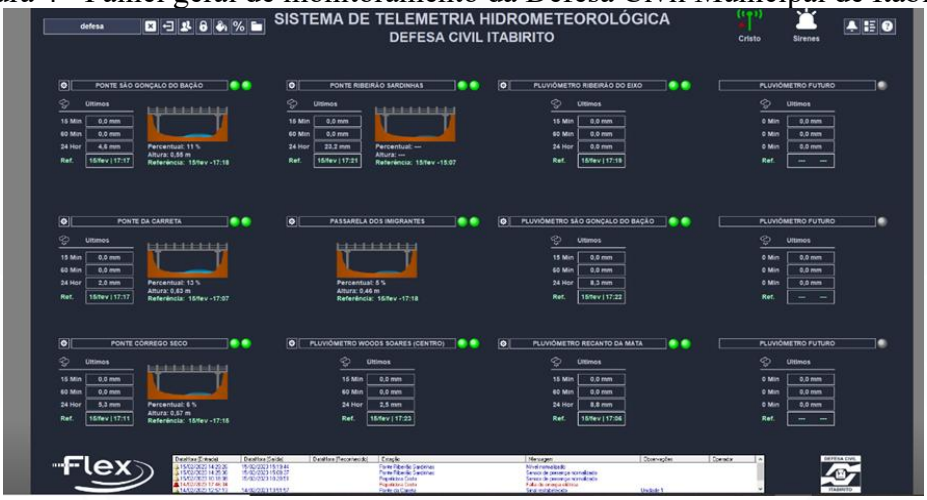
monitoramento hidrometeorológico ao CTM e às técnicas de análise de redes em Sistemas de Informações Geográficas. Enquanto o sistema de monitoramento identifica a iminência de um evento crítico, a metodologia permite identificar automaticamente os logradouros inseridos na área de inundação, definir as rotas de evacuação até os pontos de abrigo e encaminhar notificações à população potencialmente afetada. As Figura 4 e Figura 5 apresentam, respectivamente, a distribuição das estações hidrometeorológicas nas sub-bacias do município e o painel utilizado pela Defesa Civil para o acompanhamento, em tempo real, dos dados de telemetria e precipitação.

Figura 4 - Mapa de localização das estações Fluviométricas e Pluviométricas



Fonte: Os autores (2026)

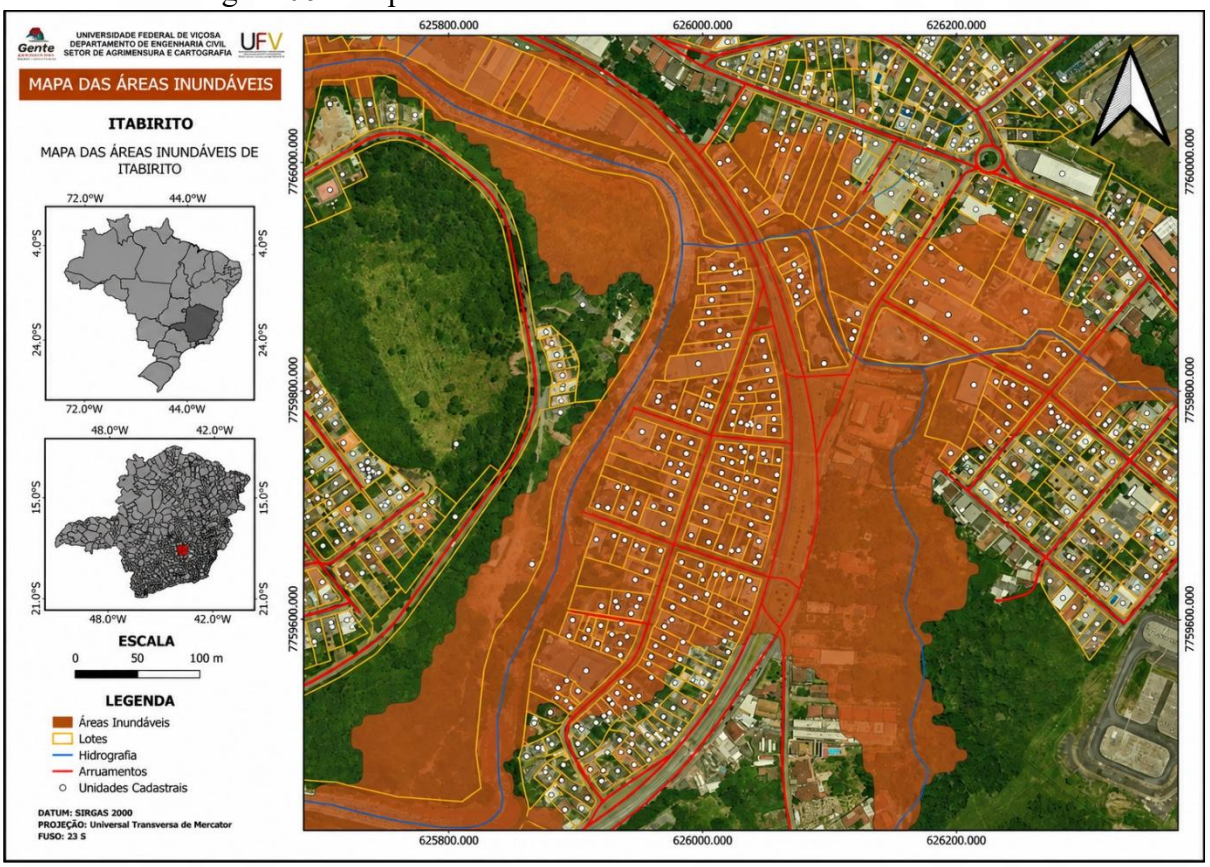
Figura 4 - Painel geral de monitoramento da Defesa Civil Municipal de Itabirito



Fonte: Defesa Civil Municipal de Itabirito – MG (2024)

A obtenção dos dados utilizados no desenvolvimento do projeto foi dividida em duas frentes principais. As informações referentes ao CTM, abrangendo lotes, unidades cadastrais e arruamentos, foram disponibilizadas pelo Grupo de Engenharia para Gestão Territorial da Universidade Federal de Viçosa (GENTE-UFV). Os dados referentes à mancha de inundação e ao tempo de resposta para a evacuação foram fornecidos pela Defesa Civil Municipal. A integração dessas informações é apresentada na Figura 6, que ilustra, em escala, um trecho da área urbana, evidenciando a sobreposição da mancha de inundação aos lotes e às áreas suscetíveis do município.

Figura 06 - Mapa de um trecho das áreas inundáveis de Itabirito



Fonte: Os autores (2026)

5.2 Identificação das áreas de risco e dos pontos de abrigo

A identificação dos imóveis e logradouros potencialmente afetados foi realizada por meio da sobreposição espacial entre a mancha de inundação e a base cadastral municipal. Inicialmente, foram selecionados os logradouros interceptados pela área inundável.

Após a identificação dos logradouros interceptados pela mancha de inundação, foi aplicado um buffer de 20 m ao redor dessas vias. Esse valor foi adotado por representar a faixa de influência imediata dos logradouros, compensar quaisquer imprecisões cartográficas e englobar o recuo frontal dos lotes, permitindo incorporar imóveis potencialmente afetados pela mancha de inundação. Dessa forma, buscou-se reduzir possíveis inconsistências decorrentes da representação cartográfica e garantir maior abrangência na identificação das áreas sujeitas ao risco.

Como pontos de abrigo foram consideradas inicialmente todas as instituições de ensino do município, incluindo escolas públicas, particulares e creches. A escolha dessas edificações

fundamentou-se em sua capacidade de acomodação, disponibilidade de infraestrutura e distribuição espacial na área urbana. Posteriormente, foram excluídas as instituições localizadas no interior da mancha de inundação ou excessivamente distantes das áreas de risco, permanecendo apenas aquelas capazes de atender adequadamente à população evacuada.

5.3 Geração dos pontos de partida e modelagem da rede viária

Os pontos de partida das rotas foram definidos ao longo dos logradouros inseridos na área de risco. Adotou-se um afastamento de 30 m das interseções viárias para evitar que os pontos coincidissem com cruzamentos, visto que a testada média dos lotes possuem 15 m. Com isso, adotou-se o ínicio a partir do segundo lote da via reduzindo ambiguidades na definição das rotas iniciais. Em logradouros de maior extensão, novos pontos foram inseridos a intervalos de 150 m, devido este valor representar o comprimento médio de uma quadra urbana padrão na área de estudo, permitindo representar adequadamente diferentes posições dos moradores ao longo da via e reduzindo a possibilidade de superestimação das distâncias percorridas até os pontos de abrigo.

A modelagem da rede viária foi realizada utilizando os logradouros do CTM como estrutura básica da rede de transporte. Antes da construção da rede foram executadas verificações topológicas para garantir a conectividade entre os segmentos viários e corrigir eventuais inconsistências geométricas. Também foram conferidos os atributos referentes ao sentido de circulação das vias, assegurando que as rotas respeitassem as restrições impostas pelo sistema viário municipal.

5.4 Modelagem das rotas de fuga

A determinação das rotas de fuga foi realizada por meio de análise de redes fundamentada na Teoria dos Grafos. Os pontos de partida foram definidos como origens da rede, enquanto os pontos de abrigo constituíram os destinos da análise.

A modelagem das rotas foi realizada considerando como função de custo a menor distância geométrica percorrida ao longo da rede viária. Embora dinâmicas temporais de tráfego e velocidade de elevação das águas sejam cruciais em uma simulação hiper-realista, a distância física atua como uma variável espacial estável (não influenciada pelo momento ou trânsito), provendo um modelo estático de base para a contingência imediata, possibilitando o planejamento prévio das rotas de evacuação. Assim, para cada ponto de partida, foi determinado o percurso que minimiza a distância total até o respectivo ponto de abrigo.

O algoritmo determinou automaticamente o caminho de menor distância entre cada ponto de partida e seu respectivo ponto de abrigo, produzindo como resultados as geometrias das rotas, suas extensões e os respectivos percursos utilizados para evacuação.

5.5 Validação das rotas utilizando o *Google Maps*

A consistência das rotas obtidas foi avaliada mediante comparação com os trajetos sugeridos pelo *Google Maps*, afim de verificar a coerência das rotas geradas na modelagem com o aplicativo de navegação mais comumente utilizado. Para automatizar esse procedimento foi desenvolvido um algoritmo em Python empregando as bibliotecas Pandas, Selenium e Time.

O algoritmo importou as coordenadas geográficas dos pontos de origem e destino, acessou automaticamente o *Google Maps*, gerou as rotas correspondentes e armazenou os

respectivos links para posterior análise.

A avaliação da consistência das rotas foi realizada mediante comparação entre os percursos obtidos no ambiente SIG e aqueles sugeridos pelo *Google Maps* para os mesmos pares origem-destino. A classificação das rotas foi realizada por inspeção técnica, considerando a similaridade espacial entre os trajetos e a existência de percursos alternativos equivalentes. As rotas foram agrupadas em categorias de compatibilidade total, compatibilidade parcial e divergência, permitindo avaliar a confiabilidade da modelagem proposta.

5.6 Organização da base de dados e estrutura de comunicação

Após a validação das rotas, foi estruturada uma base de dados contendo todas as informações necessárias para o sistema de notificação. Os pontos de partida receberam uma ordem de prioridade baseada na direção esperada do avanço da inundação, priorizando inicialmente as áreas mais suscetíveis ao impacto.

Além da prioridade de envio, a base passou a armazenar informações referentes ao nome da rua, ponto de abrigo associado, link da rota validada no *Google Maps* e link do respectivo grupo de *WhatsApp*.

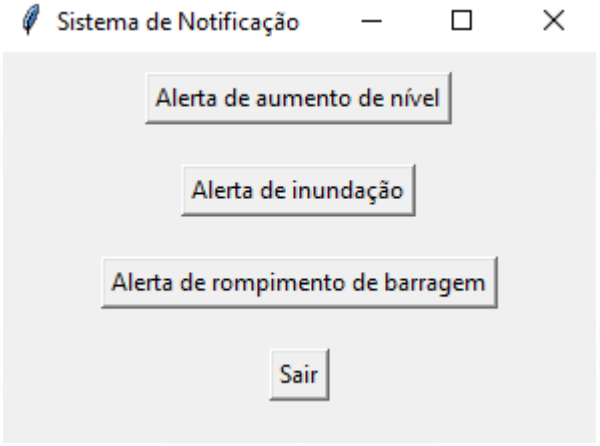
Os grupos de comunicação foram criados individualmente para cada logradouro, permitindo que apenas o administrador realizasse o envio das mensagens. Essa estratégia buscou minimizar o excesso de mensagens e evitar limitações impostas pela plataforma devido ao envio automatizado em massa.

5.7 Desenvolvimento de um sistema automatizado de notificações

O sistema de notificação foi desenvolvido em Python utilizando as bibliotecas Tkinter, Psycopg2, Pandas, Selenium, Time e Sys. A aplicação possui interface gráfica para interação com o operador, integração com banco de dados PostgreSQL e automação do *WhatsApp Web* para envio das mensagens de alerta.

O programa foi estruturado em funções específicas responsáveis pela seleção do modo de operação, autenticação no banco de dados, extração das informações necessárias, tratamento de eventos e envio das notificações. Os modos de execução contemplam diferentes cenários de emergência, como aumento do nível do rio, inundação e rompimento de barragem, conforme ilustrado pela Figura 7.

Figura 7 - Janela de diálogo inicial de escolha de opção de execução do sistema



Fonte: Os autores (2026)

Após a autenticação do usuário e sincronização do *WhatsApp Web*, o sistema consulta a base de dados, organiza os grupos segundo a prioridade previamente definida e inicia o envio automático das mensagens. Durante a execução, mecanismos de controle verificam o carregamento completo das páginas antes da interação com os elementos da interface, reduzindo falhas decorrentes da automação do navegador.

Essa arquitetura permite que as notificações sejam encaminhadas de forma ordenada, priorizando inicialmente as áreas mais vulneráveis e fornecendo aos moradores informações sobre o local seguro de destino e a rota previamente validada. Dessa forma, o sistema integra o CTM, a análise de redes em SIG e ferramentas de automação web para apoiar ações de resposta rápida em situações de inundação.

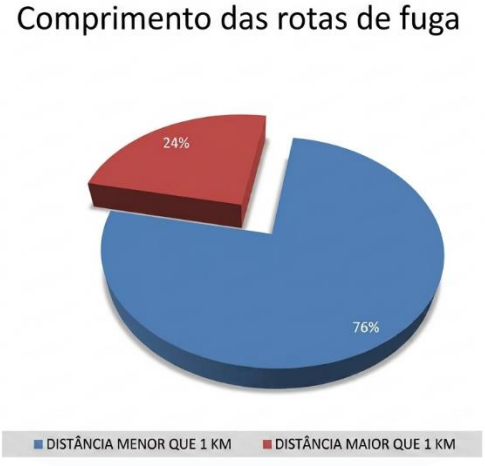
6 RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 Modelagem das rotas de fuga

A aplicação da metodologia proposta possibilitou a geração de uma rede estruturada de rotas de fuga para áreas suscetíveis à inundação. Inicialmente, foram selecionadas 20 instituições de ensino, entre escolas e creches, para atuarem como pontos de abrigo, distribuídas espacialmente de modo a atender as áreas urbanas sujeitas ao risco. Em seguida, foram definidos 111 pontos de partida ao longo dos logradouros inseridos ou adjacentes à mancha de inundação, respeitando os critérios metodológicos de posicionamento a 30 m das esquinas e espaçamento máximo de 150 m em vias extensas. A partir desses dados, foram geradas as rotas de evacuação considerando o critério de menor distância entre os pontos de origem e os respectivos pontos de abrigo.

Conforme apresentado na Figura 8, aproximadamente 76% das rotas possuem extensão inferior a 1 km, indicando que a maior parte dos logradouros localizados na área de inundação encontra-se próxima de um ponto de abrigo.

Figura 8 - Gráfico representando o comprimento das rotas de fuga



Fonte: Os autores (2026)

Contudo, é fundamental ressaltar que essa métrica de distância reflete exclusivamente a acessibilidade geométrica e a proximidade espacial. Este dado, por si só, não é suficiente para demonstrar a adequação total ou o preparo operacional destes locais para atuarem como abrigos, uma vez que variáveis cruciais como capacidade máxima de pessoas (lotação), infraestrutura sanitária e logística de suprimentos não foram avaliadas neste estudo e

demandam investigações multidisciplinares complementares.

A rota mais longa apresentou 5,1 km, correspondente a um ponto de partida localizado em via externa ao adensamento urbano contínuo, onde naturalmente a disponibilidade de equipamentos públicos reduzidos força um percurso mais alongado

A validação da modelagem foi realizada por meio da comparação entre as rotas geradas em ambiente SIG e aquelas obtidas no *Google Maps*. Os resultados, apresentados na Tabela 1, evidenciam elevada compatibilidade entre os trajetos calculados pelos dois sistemas. Das 111 rotas avaliadas, 78 apresentaram correspondência total, enquanto nove foram classificadas como compatíveis, embora o *Google Maps* apresentasse uma alternativa adicional de percurso. Também foram identificadas cinco rotas equivalentes entre três alternativas sugeridas pela plataforma e duas rotas com duas possibilidades distintas de deslocamento.

Tabela 01 -Resultado da validação de compatibilidade das rotas em SIG com as rotas do *Google Maps*

Compatibilidade	Quantidade	% em relação ao ao total de rotas
Compatível	78	70 %
Compatível, mas com duas possibilidades	9	08 %
Diferente, mas com três possibilidades	5	05 %
Diferente, mas com duas possibilidades	2	02%
Diferente, mas não considera mão única	4	04%
Diferente	13	12 %
Total de rota avaliadas	111	100 %

Fonte: Os autores (2026)

Embora parte das rotas tenha apresentado trajetos diferentes daqueles sugeridos pelo *Google Maps*, essas diferenças não representam, necessariamente, inconsistências na metodologia. Os algoritmos empregados pelas plataformas utilizam funções de custo distintas e podem priorizar critérios específicos, como tempo estimado de deslocamento, histórico de circulação ou preferências de navegação. Assim, a elevada compatibilidade observada indica que a modelagem baseada na menor distância produziu resultados consistentes para o planejamento das rotas de evacuação.

As divergências observadas concentraram-se principalmente em quatro rotas nas quais o *Google Maps* não considerou corretamente as restrições de sentido único das vias e em treze rotas classificadas como diferentes. Essas diferenças podem estar relacionadas às distintas bases cartográficas utilizadas pelos sistemas, bem como às atualizações das informações viárias e aos critérios próprios de otimização empregados pelo algoritmo do *Google Maps*. Ainda assim, o elevado percentual de rotas compatíveis demonstra que a metodologia baseada em análise de redes em SIG é suficientemente robusta para apoiar o planejamento de evacuações em situações de emergência.

6.2 Sistema de notificação

Os testes foram realizados em ambiente operacional utilizando computador convencional conectado à internet banda larga, simulando as condições de uso previstas para

a Defesa Civil Municipal. Durante a execução, observou-se estabilidade no envio sequencial das mensagens e correto encaminhamento das rotas e pontos de abrigo associados a cada logradouro. Esses resultados indicam que a metodologia apresenta potencial para utilização em situações reais de emergência, desde que mantidas as condições mínimas de conectividade e atualização da base cadastral.

O sistema automatizado de notificação apresentou desempenho compatível com os requisitos operacionais estabelecidos para emergências. Considerando as informações disponibilizadas pela Defesa Civil Municipal de Itabirito, o tempo estimado para a chegada da inundação ou de uma eventual onda de rejeitos é de aproximadamente seis horas. Em contrapartida, o sistema desenvolvido necessita de cerca de 30 minutos para concluir o envio das mensagens até o último grupo de logradouro definido pela ordem de prioridade.

Essa diferença entre o tempo disponível para resposta e o tempo necessário para disseminação dos alertas proporciona uma margem operacional aproximada de cinco horas e trinta minutos para que a população realize a evacuação das áreas de risco. Esse intervalo é considerado suficiente para permitir o deslocamento ordenado dos moradores até os pontos de encontro previamente definidos, contribuindo para a redução dos impactos decorrentes de eventos extremos.

Além do desempenho temporal, outro aspecto relevante observado foi a facilidade de utilização do sistema. A compilação do código em um arquivo executável, associada a uma interface gráfica simples e intuitiva, reduz a necessidade de conhecimentos técnicos específicos por parte do operador. Essa característica torna a ferramenta mais adequada para utilização por equipes da Defesa Civil e demais órgãos responsáveis pelo gerenciamento de emergências, favorecendo sua aplicação em situações reais que demandam rapidez, confiabilidade e simplicidade operacional.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a integração entre o CTM, a análise de redes em Sistemas de Informações Geográficas e a automação do envio de notificações constitui uma estratégia eficiente para o planejamento de evacuações em áreas suscetíveis à inundação. A combinação entre rotas otimizadas, validação por plataforma de navegação e comunicação automatizada contribui para aumentar a capacidade de resposta do município diante de eventos hidrológicos extremos, reforçando o potencial da metodologia como ferramenta de apoio à gestão de riscos e à proteção da população.

6.3 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos demonstram que a integração entre o CTM, a análise de redes em Sistemas de Informações Geográficas e a automação do envio de notificações constitui uma abordagem viável para o planejamento operacional da evacuação em áreas suscetíveis à inundação. A elevada compatibilidade entre as rotas geradas em ambiente SIG e aquelas obtidas pelo *Google Maps* indica que a modelagem da rede viária representa adequadamente as condições de deslocamento da área de estudo.

Além disso, a predominância de rotas de curta extensão evidencia que a distribuição dos pontos de abrigo mostrou-se adequada para atender a maior parte dos logradouros inseridos na mancha de inundação. Esses resultados ampliam as possibilidades de aplicação do CTM, demonstrando que bases cadastrais municipais podem subsidiar não apenas atividades de planejamento urbano, mas também o planejamento de ações de Proteção e Defesa Civil por meio da definição de rotas de evacuação e da emissão de notificações direcionadas à população.

Apesar dos resultados satisfatórios, algumas limitações devem ser consideradas. A concentração dos pontos de abrigo na área urbana resultou em rotas mais extensas para

comunidades rurais, enquanto a utilização da menor distância como função de custo não contempla fatores dinâmicos, como condições de tráfego, bloqueios viários ou alterações provocadas pela evolução da inundação. Ainda assim, a estrutura metodológica apresenta potencial de aplicação em outros municípios que disponham de bases cadastrais estruturadas, podendo contribuir para o fortalecimento das ações de planejamento e resposta da Defesa Civil.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da utilização do CTM como base para a modelagem de redes viárias e para o desenvolvimento de um sistema automatizado de notificação destinado ao planejamento da evacuação em áreas suscetíveis à inundação. A integração entre informações cadastrais, análise de redes em Sistemas de Informações Geográficas e automação da comunicação mostrou-se capaz de estruturar uma metodologia para apoiar as ações de Proteção e Defesa Civil.

Os resultados obtidos confirmaram a consistência da abordagem proposta. A distribuição espacial dos pontos de abrigo favoreceu a definição de rotas de evacuação de curta extensão para a maior parte dos logradouros analisados, enquanto a elevada compatibilidade entre os trajetos gerados em ambiente SIG e aqueles sugeridos pelo *Google Maps* reforçou a confiabilidade da modelagem desenvolvida. Além disso, o sistema automatizado apresentou desempenho operacional compatível com o tempo disponível para resposta no cenário analisado.

A principal contribuição deste estudo consiste em demonstrar que o CTM pode ser empregado além de suas aplicações tradicionais, constituindo uma infraestrutura estratégica para o planejamento operacional da Defesa Civil. A integração entre cadastro territorial, análise de redes e automação das notificações amplia o potencial de utilização das bases cadastrais municipais no planejamento de evacuações e na gestão de riscos de desastres.

Como limitações, destacam-se a concentração dos pontos de abrigo na área urbana e a utilização da menor distância como função de custo, sem considerar condições dinâmicas da rede viária ou da evolução da inundação. Como perspectivas futuras, recomenda-se incorporar funções de custo dinâmicas, integrar dados hidrológicos em tempo real, ampliar a rede de pontos de abrigo, especialmente em áreas rurais, e avaliar a aplicação da metodologia em diferentes municípios e em outros cenários de desastres.

Referências

AGÊNCIA BRASIL. **Chuvas no RS podem impactar em R$ 97 bilhões a economia nacional.** 29 jul. 2024. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-07/chuvas-no-rs-podem-impactar-em-r-97-bilhoes-economia-nacional. Acesso em: 28 ago. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Gabinete do ministro. **Portaria n° 3.242, de 9 de novembro de 2022.** Brasília, 2022.

DE AGUIAR PADIAL, F. et al. **Cadastro multifinalitário como tecnologia inovadora.** REGENT: Revista Eletrônica de Gestão, Engenharia e Tecnologia da Faculdade de Tecnologia de Piracicaba, v. 3, n. 1, 2018.

ESRI. **What is a network dataset? ArcGIS Pro, 2021**. Disponível em: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/networks/what-is-network-dataset-.htm. Acesso em: 19 ago. 2024.

FARIAS, **A. Inundações urbanas em Francisco Beltrão/PR: riscos e vulnerabilidades socioambientais**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2019a. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/66322. Acesso em: 07 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Itabirito - MG.** Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/itabirito.html. Acesso em: 19 ago. 2024.

Longley, P. A.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J.; Rhind, D. W. ***Geographic Information Science and Systems*.** 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

OLIANI, L. O. **Noções de cadastro territorial multifinalitário - CTM.** Curitiba: CREA-PR, 2016. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar. Disponível em:https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/nocoes-de-cadastro-territorial-multifinalitario-CTM.pdf. Acesso em: 19 ago. 2024.

PRIETO, P. S.; LUBACHESKI, F. **Uma aplicação de teoria dos grafos para otimização de custos de rotas aeronáuticas internacionais.** São Paulo: Faculdade de Computação e Informática, Universidade Presbiteriana Mackenzie, [s/n]. Disponível em: https://adelpha-api.mackenzie.br/server/api/core/bitstreams/f9f235ed-2ff9-4bee-9080-46ca9ca541e2/content

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. **O Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados.** Geonomos, Belo Horizonte, v. 18, n. 1, p. 33-37, 2010.

ROCKSTRÖM, J. et al. ***A safe operating space for humanity*.** *Nature*, v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009. doi:10.1038/461472a.

SANTOS, C. R. et al. **Otimização do espaço-tempo: um estudo sobre a informação dinâmica do tráfego de pessoas no transporte coletivo.** 2022. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão do Negócio) – Fundação Dom Cabral; Instituto de Transporte e Logística, Curitiba, 2022.

SILVA, M. A. F.; LOPES, M. D.; TEIXEIRA, C. F.; COELHO, A. A. A.; PEREIRA, R. A.; DUARTE, D. C. O. **Planejamento do Cadastro Territorial Multifinalitário de Itabirito.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA, CARTOGRAFIA, CADASTRO, GEODÉSIA E TOPOGRAFIA, VII, 2022, [São Paulo].

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas.** 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2007.

VASCO, J. R. J.. **Sistemas urbanos de drenagem sustentável.** Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2016. Dissertação de mestrado.