



Otimização de rotas de *jet skis* para o patrulhamento de regiões alagadas

Milena Benício dos Reis

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (milena.reis@discentes.fat.uerj.br)

Ana Beatriz Isidoro de Araújo

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (ana.araujo@discentes.fat.uerj.br)

Flávia Alessandra Caetano de Freitas

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (flavia.freitas@discentes.fat.uerj.br)

Thatiana Muylaert Siqueira Menezes

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (thatiana.muylaert@fat.uerj.br)

Luana Souza Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (luana.almeida@fat.uerj.br)

Resumo

As catástrofes, decorrentes das mudanças climáticas, têm se intensificado de forma expressiva, especialmente no que diz respeito à frequência e à severidade de tempestades tropicais e de inundações. No Brasil, esse cenário não é diferente, sendo a tragédia ocorrida em 2024 no Rio Grande do Sul um dos exemplos mais emblemáticos. Diante desse contexto, o presente artigo propõe um modelo de programação linear inteira mista voltado à otimização das rotas de *jet skis* empregados no patrulhamento de áreas alagadas, com o objetivo de maximizar a quantidade de locais visitados. As funcionalidades do modelo são ilustradas por meio de um estudo de caso fictício, de pequena escala, situado no Rio Grande do Sul. A solução ótima foi obtida em curto tempo computacional. Entretanto, espera-se que, em grafos de maior ordem, o tempo de processamento seja mais elevado em função da complexidade do modelo. O modelo proposto constitui, assim, um ponto de partida para o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão e ao planejamento em futuros eventos climáticos no Brasil.

Palavras-chave: Otimização, Roteamento, Desastres, Alagamento, Transporte aquático.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Abstract

Climate change–related disasters have intensified significantly, particularly with regard to the frequency and severity of tropical storms and floods. In Brazil, the situation is no different, with the 2024 tragedy in Rio Grande do Sul standing out as one of the most emblematic examples. In this context, the present article proposes a mixed-integer linear programming model designed to optimize the routes of jet skis used to patrol flooded areas, aiming to maximize the number of sites visited. The model’s functionalities are illustrated through a small-scale, fictitious case study set in Rio Grande do Sul. The optimal solution was obtained within a short computational time. However, it is expected that, for larger-order graphs, processing time will increase due to the model’s complexity. The proposed model thus represents a promising starting point for the development of decision-support and planning tools for future climate-related events in Brazil.

Keywords: Optimization, Routing, Disasters, Flooding, Water transportation.

Resumen

Las catástrofes, derivadas del cambio climático, se han intensificado de manera significativa, especialmente en lo que respecta a la frecuencia y la severidad de las tormentas tropicales y las inundaciones. En Brasil, la situación no es diferente, siendo la tragedia ocurrida en 2024 en Rio Grande do Sul uno de los ejemplos más emblemáticos. En este contexto, el presente artículo propone un modelo de programación lineal entera mixta orientado a la optimización de las rutas de motos acuáticas empleadas en el patrullaje de áreas inundadas, con el objetivo de maximizar la cantidad de lugares visitados. Las funcionalidades del modelo se ilustran mediante un estudio de caso ficticio, de pequeña escala, situado en Rio Grande do Sul. La solución óptima se obtuvo en un corto tiempo computacional; sin embargo, se espera que, en grafos de mayor orden, el tiempo de procesamiento sea más elevado debido a la complejidad del modelo. El modelo propuesto constituye, así, un punto de partida prometedor para el desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones y a la planificación en futuros eventos climáticos en Brasil.



Palabras clave: Optimización, Ruteo, Desastres, Inundaciones, Transporte acuático.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os desastres no Brasil e no mundo têm aparecido com mais frequência nos noticiários como, por exemplo, as tempestades tropicais, os alagamentos e os ciclones (De Freitas *et al.*, 2014; Marengo *et al.*, 2024; Nina; De Almeida; Lobo, 2021). A ação do ser humano tem um peso ainda maior no agravamento dos desastres, visto que a emissão excessiva de dióxido de carbono impulsiona o aquecimento global e intensifica as mudanças climáticas, tornando eventos extremos cada vez mais frequentes e destrutivos (CRED; UNDRR, 2020; Kabir *et al.*, 2023). Segundo a Confederação Nacional de Municípios (CNM), houve um aumento de mais de 30% em relação aos desastres no Brasil, considerando que 70% dessas ocorrências foram ocasionadas pelas chuvas (Confederação Nacional de Municípios, 2024). Neste contexto, alguns exemplos incluem as enchentes e os deslizamentos em Petrópolis (Oda *et al.*, 2024) e as enchentes no nordeste (BBC News Brasil, 2021; Machado; Oliveira; Lois-González, 2019).

Este artigo tem como plano de fundo a tragédia no Rio Grande do Sul, ocorrida em 2024, que resultou em quase 200 mortes, devido às chuvas, afetou mais de 2 milhões de moradores e atingiu mais de 450 municípios (Osório, 2024; Webber *et al.*, 2025). A tragédia teve início em abril e terminou em junho de 2024, com a água invadindo as ruas e arrastando tudo o que estivesse no caminho, incluindo casas, automóveis, animais e pessoas. A chuva deixou 48 mil pessoas em abrigos provisórios e mais de 130 mil pessoas desalojadas (Morosini, 2024). O nível do rio Guaíba, em Porto Alegre, chegou a 3 metros e 60 centímetros, ultrapassando as barreiras de contenção e invadindo os bairros mais próximos, demorando cerca de 10 dias para começar a baixar nas redondezas (FolhaPress; UOL, 2024; Morosini, 2024).

Durante esse período de enchentes, foram utilizados *jet skis* nas operações de resgate e de socorro às pessoas e aos animais, que ficaram ilhados em telhados, em árvores ou, até mesmo, à deriva da correnteza. O governo do estado do Rio Grande do Sul permitiu e facilitou a participação de voluntários, como surfistas de ondas grandes, os quais



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

utilizaram seus *jet skis* profissionais para adentrar às áreas alagadas, patrulhando e resgatando as vítimas em risco (Dias, 2024; OTEMPO, 2024). Outra ocorrência do uso dos *jet skis* foi para entrega de mantimentos e itens de emergência para famílias que se encontravam impossibilitadas de deixar suas residências (Dias, 2024).

Considerando a facilidade que os *jet skis* possuem para alcançar locais de difícil acesso, o presente artigo propõe um problema de otimização da busca e de resgate de vítimas ilhadas, cujo objetivo é o de maximizar a área patrulhada por *jet skis*. Tendo em vista o exposto, este artigo tem por objetivos específicos (i) propor um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para a definição de rotas de patrulhamento em áreas alagadas por meio de *jet skis* e (ii) ilustrar as características do modelo em um estudo de caso fictício na região da tragédia de 2024. Desta forma, este artigo visa destacar a relevância de tais modelos para o fortalecimento da resiliência em territórios vulneráveis.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o referencial teórico sobre a otimização de rotas de patrulhamento no contexto de desastres. A seção 3 apresenta a definição do problema, formulação matemática e as características do estudo de caso realizado na região sul do país. A seção 4 apresenta a análise dos resultados do estudo de caso, além de discutir as limitações do estudo e vias de pesquisas futuras. Por fim, a seção 5 apresenta as conclusões provenientes deste estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apesar de, anualmente, o Brasil enfrentar inúmeros alagamentos, deslizamentos e outros desastres naturais, ainda são escassos os estudos que propõem modelos para apoiar os tomadores de decisão ao longo do ciclo do desastre (planejamento, resposta, pós-desastre e recuperação). Souza e Silva (2025) realizaram uma análise quali-quantitativa da produção bibliográfica sobre modelos de previsão de alagamentos no país. Os autores identificaram apenas 31 estudos, dos quais 90% foram publicados após 2014, o que evidencia que a área é recente e ainda não consolidada.

O debate sobre alagamentos no Brasil antecede a tragédia de 2024 no Rio Grande do Sul. Assis Dias *et al.* (2018), por exemplo, investigaram populações vulneráveis a



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

deslizamentos, como os ocorridos em Petrópolis (RJ), e a inundações, como as registradas no Rio Grande do Sul. Para isso, desenvolveram o *Statistical Territorial Base of Risk*, um novo *basemap* que combina dados censitários e análises de risco. Em um estudo de caso em Petrópolis, identificaram 1.357 áreas de risco e estimaram cerca de 155 mil pessoas expostas a deslizamentos e alagamentos. Em outro trabalho, Dolman *et al.* (2018) analisaram o impacto econômico da enchente de 2015 em Rio Branco (AC), causada pelo transbordamento do Rio Amazonas, e estimaram prejuízos entre 60 e 200 milhões de dólares.

Mais recentemente, alguns pesquisadores já vêm investigando as consequências do alagamento de 2024 no Rio Grande do Sul. Marengo *et al.* (2025) analisaram as condições climáticas que desencadearam a tragédia, com foco na avaliação dos sistemas de alerta precoce (*Early Warning Systems – EWS*) e da atuação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), responsável por acompanhar desastres hidro-geo-meteorológicos no Brasil. Rathore *et al.* (2025) utilizaram imagens de satélite SAR para realizar uma análise geoespacial da enchente, quantificando a extensão da área atingida e estimando a população exposta. Eles verificaram que cerca de 1.480 km² de áreas agrícolas foram submersos. De modo complementar, Nóia-Júnior (2025) investigou os impactos combinados das enchentes de 2024 e de períodos recentes de seca sobre a produção agrícola do estado, alertando para a necessidade de melhorias nas práticas agrícolas como estratégia de adaptação às mudanças climáticas. Já Neto *et al.* (2025) destacam que, além das alterações climáticas, o uso inadequado do solo contribuiu significativamente para a intensificação dos impactos da tragédia.

Mesmo com o crescente número de estudos sobre a enchente de 2024, ainda persiste uma lacuna importante relacionada à dimensão logística do desastre. Rathore *et al.* (2025), por exemplo, apontaram que o Aeroporto Internacional Salgado Filho permaneceu submerso por vários dias, comprometendo não apenas o transporte aéreo, gerando perdas econômicas, mas também prejudicando severamente a distribuição de medicamentos e suprimentos emergenciais (como alimentos, água, abrigo e roupas). Considerando a

projeção de Neto *et al.* (2025) de que, caso a temperatura global aumente 2 °C, os alagamentos no Rio Grande do Sul tendem a se intensificar drasticamente em função de fenômenos climáticos associados ao *El Niño*.

Conforme explicado na seção 1, os *jet skis* desempenharam papel crucial no patrulhamento e no resgate de vítimas ilhadas durante os alagamentos. No entanto, como qualquer meio de transporte, apresentam características específicas que precisam ser devidamente modeladas. Ozkan *et al.* (2019), por exemplo, destacam que a visibilidade dos pilotos de botes e outros veículos aquáticos é limitada, assumindo que o conhecimento das ruas inundadas só é possível com o apoio de veículos aéreos não tripulados (VANTs). A partir desse mapeamento, os autores implementam algoritmos como A*, Algoritmos Genéticos e *Probabilistic Roadmap Path Planning* (PRM) para identificar o caminho mais curto entre dois pontos do mapa. De forma semelhante, Nizami *et al.* (2012) também investigam o uso de transporte aquático em operações de busca e resgate, modelando a situação como um problema de caminho mínimo e avaliando a performance de diferentes algoritmos, como A*, Dijkstra, busca em largura e busca em grafos. Diferentemente desses trabalhos, o modelo apresentado neste artigo não tem como objetivo apenas encontrar o menor trajeto entre dois pontos, mas sim maximizar a quantidade de locais a serem vasculhados pelas equipes de resgate

Li *et al.* (2025) concentram-se na quantificação das demandas das equipes de resgate, considerando três fatores principais: eficiência das operações, severidade do alagamento para a comunidade e vulnerabilidade social. A partir dessa métrica, os autores definem estratégias de alocação de botes para comunidades afetadas, ilustrando as funcionalidades do modelo por meio de um estudo de caso nos Estados Unidos. De forma complementar, Cai *et al.* (2020) propõem um modelo de PLIM estruturado em dois níveis: o primeiro busca minimizar o número de estações de resgate ativas, enquanto o segundo visa a reduzir o tempo de resposta aos acidentes. Em contraste com Li *et al.* (2025) e Cai *et al.* (2020), que abordam o problema em uma perspectiva tática, este artigo concentra-se no nível operacional das operações de busca e resgate.

Em síntese, a maior parte dos estudos relacionados a alagamentos no Brasil e suas especificidades concentra-se na modelagem e na simulação de áreas potencialmente afetadas, sem aprofundar a dimensão logística das operações de resgate. No campo da literatura sobre busca e resgate com transporte aquático, observa-se uma predominância de análises voltadas a veículos de maior porte, como botes e embarcações, havendo, portanto, uma lacuna no que se refere ao uso de *jet skis*. O presente artigo busca preencher essas lacunas ao propor um modelo de PLIM voltado à otimização do planejamento de rotas de *jet skis*, contribuindo para ampliar a efetividade das operações de busca e resgate em contextos de emergência.

3. MÉTODO

A presente seção apresenta a definição do problema de patrulhamento por meio do uso de *jet skis* (subseção 3.1), detalha o modelo de PLIM (subseção 3.2) e descreve os dados relacionados a um estudo de caso fictício e ilustrativo no município de Canoas, no Rio Grande do Sul (subseção 3.3).

3.1. Definição do problema

Considere um grafo simples e indireto, com a definição de que $G = (V, E)$, tendo que “ V ” é o conjunto de vértices que representa as possíveis localizações das vítimas, e “ E ” é o conjunto de arestas que representa as ruas da cidade afetadas pela tragédia e cujo nível de água permite o atravessamento por meio de *jet skis*. Neste problema, assume-se que, por conta do nível de inundação, os *jet skis* podem se movimentar em ambos os sentidos das ruas. Cada vértice representa um possível local que uma vítima (ex.: pessoas, animais, qualquer ser com necessidade de prestação de socorro) poderia estar ilhada. O depósito (abrigo) é o ponto inicial e final dos múltiplos *jet skis*, e o objetivo deste problema é o de maximizar a quantidade de vértices (abrigos) patrulhados.

3.2. Modelo de PLIM

A formulação matemático do modelo proposto neste artigo é baseada no problema do caixeiro viajante (Cook, 2012; Dantzig; Fulkerson; Johnson, 1954) e no problema do roteamento de veículos capacitados (Dantzig; Ramser, 1959), considerando variáveis de

decisão com até três índices. A Tabela 1 a seguir apresenta os conjuntos e os parâmetros utilizados no problema.

Tabela 1 – Conjuntos e parâmetros do modelo de PLIM

Notação	Definição
n	Número total de vértices
i	Vértice ($i = \{0, \dots, n\}$)
j	Vértice ($j = \{0, \dots, n\}$)
r	<i>Jet ski</i> ($r = \{0, \dots, k\}$)
$E(G)$	Conjunto de arestas do grafo simples
c_{ij}	Distância percorrida do vértice i até o vértice j
d	Depósito

Fonte: as autoras (2025).

As variáveis de decisão do problema são x_{rij} , u_{rj} , e v_i , sendo x_{rij} e v_i variáveis binárias e u_{rj} variável contínua. A função objetivo (1) maximiza a quantidade de vértices patrulhados pelos *jet skis*.

Notação **Definição**

$$x_{rij} = \begin{cases} 1, & \text{se o jet ski } r \text{ vai do vértice } i \text{ para o vértice } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$u_{rj} = \text{variável auxiliar que indica a ordem que os vértices } j \text{ são visitados}$$

$$v_i = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } i \text{ é patrulhado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i \in V(G)} v_i \quad (1)$$

As restrições tecnológicas (2-5) abordam as limitações que surgem nos desafios do patrulhamento em caso de alagamento. A restrição (2) garante que todos os vértices visitados por *jet skis* são contabilizados na função objetivo (1). Ou seja, um vértice i só é considerado visitado ($v_i = 1$) se ele é patrulhado por algum *jet ski* r ($\sum_{r \in K} \sum_{j \in V(G)} x_{rij} \geq 0$).

$$\sum_{r \in K} \sum_{j \in V(G)} x_{rij} \geq v_j, \quad \forall i \in V(G) \quad (2)$$

A restrição de fluxo (3) assegura que os *jet skis*, que patrulham um vértice, saiam desse local para visitar outros vértices. Ou seja, a restrição (3) garante que os *jet skis* não fiquem presos em um vértice.

$$\sum_{(i,j) \in E(G)} x_{rij} = \sum_{(i,j) \in E(G)} x_{rji}, \forall j \in V, r \in K \quad (3)$$

A restrição (4) é a eliminação de subtour do tipo Miller-Tucker-Zemlin (Miller; Tucker; Zemlin, 1960) e garante a continuidade das rotas.

$$u_{ri} - u_{rj} + n \times x_{rij} \leq n - 1, \forall r \in K, (i,j) \in E(G) \quad (4)$$

Como todos os *jet skis* iniciam o seu percurso no depósito (vértice d), a restrição (5) garante que cada *jet ski* deixa o depósito uma única vez. Portanto, é obrigatório que todos os *jet skis* saiam do depósito. Por fim, as restrições de não-negatividade (6) e (7) definem as variáveis de decisão x_{rij} e v_i como binárias, além da (8) variável auxiliar u_{ri} como contínua.

$$\sum_{(d,j) \in E(G)} x_{rdj} = 1, \forall r \in K \quad (5)$$

$$x_{rij} \in \{0,1\} \quad (6)$$

$$v_i \in \{0,1\} \quad (7)$$

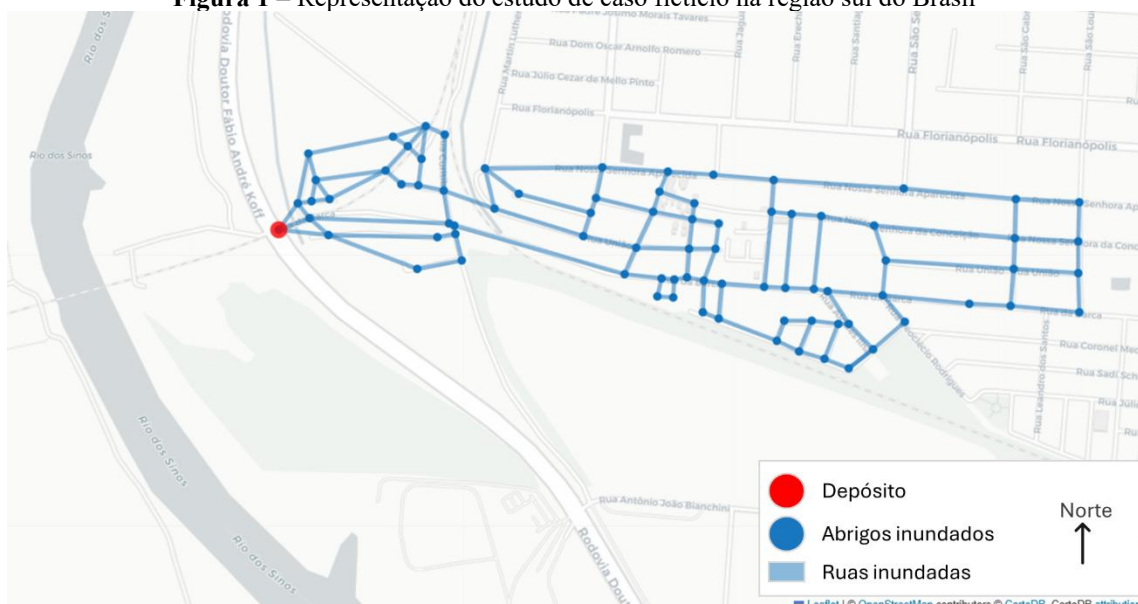
$$u_{ri} \in \mathbb{R}^+ \quad (8)$$

3.3. Estudo de caso

O estudo de caso ilustrativo e fictício apresentado neste artigo está situado na cidade de Canoas, no Rio Grande do Sul. O grafo mostrado na Figura 1 possui 81 vértices e 121 arestas. O vértice vermelho representa o ponto de partida dos *jet skis*, enquanto os vértices azuis indicam potenciais abrigos para as vítimas, como prédios ou sobrados abandonados. Este grafo foi desenvolvido em *Python* (versão 3.12.2), utilizando a biblioteca *Folium* (versão 0.14.0), seguindo a metodologia proposta por Souza Almeida *et al.* (2022).

Conforme explicado na subseção 3.1, os *jet skis* devem visitar o maior número possível de vértices em suas rotas, considerando que apenas dois veículos estão disponíveis para o patrulhamento da região. O modelo de PLIM, apresentado na subseção 3.2, foi implementado em *Python* com o auxílio da biblioteca *PuLP* (versão 2.8.0) e resolvido utilizando o *GUROBI* (versão 12.0.2). Os experimentos foram realizados em um processador *AMD Ryzen 5 Microsoft Surface Edition*, com 6 núcleos e 12 *threads*.

Figura 1 – Representação do estudo de caso fictício na região sul do Brasil

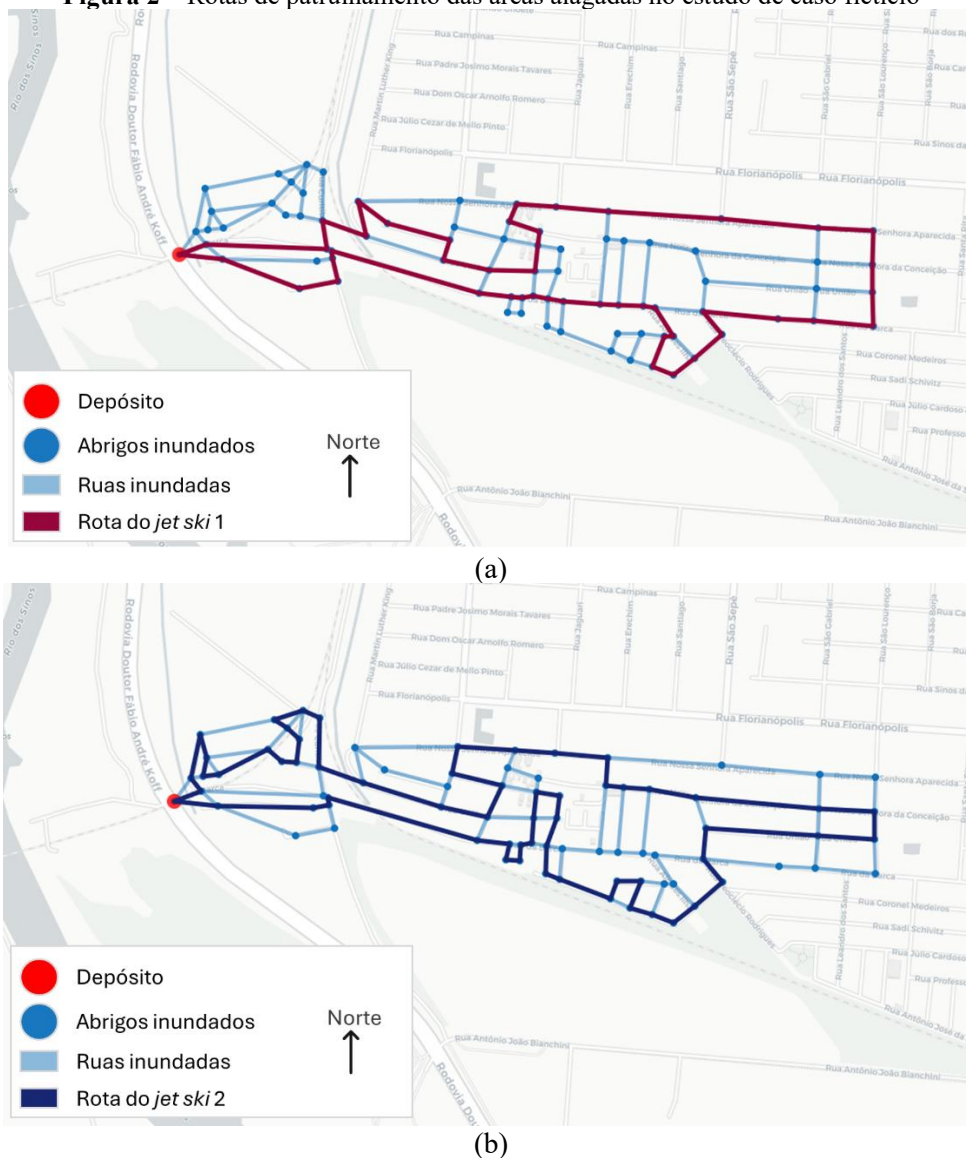


Fonte: as autoras (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com o modelo de PLIM, apresentado na subseção 3.2, estão ilustrados na Figura 2. A Figura 2(a) mostra a rota do primeiro *jet ski*, enquanto a Figura 2(b) apresenta a rota do segundo. Todos os abrigos (vértices) foram visitados pelo menos uma vez, resultando em um valor da função objetivo igual a 81, correspondente à ordem total do grafo. A rota do primeiro *jet ski* abrange 47 vértices, enquanto a do segundo abrange 59 vértices. Dessa forma, alguns vértices são patrulhados mais de uma vez. Considerando que a quantidade de vértices visitados por cada veículo é aproximadamente equilibrada, pode-se concluir que o modelo produziu um conjunto de rotas balanceadas.

Figura 2 – Rotas de patrulhamento das áreas alagadas no estudo de caso fictício



Fonte: as autoras (2025).

O modelo implementado em *Python* gerou um total de 162 variáveis contínuas e 561 variáveis inteiras, e o *solver* executou cerca de 32.000 iterações SIMPLEX em menos de 1 segundo, obtendo a solução ótima para o estudo de caso. Apesar da rápida obtenção da solução, sabe-se que o problema do caixeiro-viajante, do qual este modelo deriva, é classificado como NP-difícil, o que implica que o tempo de processamento cresce exponencialmente à medida que a ordem e o tamanho do grafo aumentam. Dessa forma, uma limitação do presente estudo é que apenas um modelo exato de PLIM foi proposto, o que pode não ser adequado para casos de maior escala. Assim, pesquisas futuras podem

explorar soluções alternativas, incluindo heurísticas e metaheurísticas, visando lidar com instâncias mais complexas de forma eficiente.

Os resultados apresentados na Figura 2 podem ser úteis não apenas para otimizar as rotas dos *jet skis* durante as primeiras horas de resgate e do patrulhamento imediatamente após a tragédia, mas também como uma ferramenta de apoio à decisão e ao planejamento para as autoridades locais. Por exemplo, ao considerar uma área territorial maior, é possível estimar o número adequado de *jet skis* e outros veículos aquáticos, como botes e canoas, necessários para cobrir eficientemente as regiões alagadas. Além disso, o modelo pode auxiliar na distribuição de recursos por parte do governo federal, facilitando a alocação de recursos escassos com base em estimativas precisas da demanda necessária para realizar a operação.

Uma limitação deste estudo diz respeito ao fato de que muitas cidades possuem ruas sem saída. Durante a aplicação do modelo de PLIM proposto, o *solver* poderia gerar soluções inviáveis caso um único veículo precisasse atravessar um vértice mais de uma vez, potencialmente violando restrições como (4) e (5). No estudo de caso fictício, assumiu-se que todas as ruas eram conectadas, incluindo-se arestas imaginárias para eliminar ruas sem saída. Vale ressaltar que, em cenários de alagamento intenso, vias que normalmente não são transitáveis podem se tornar rotas alternativas de emergência.

Estudos futuros podem aprimorar o modelo, adotando uma abordagem de roteamento por arco (*arc routing*), como sugerido em Souza Almeida *et al.* (2023) e Benavent *et al.* (2015), em vez do roteamento por vértice (*node routing*) utilizado neste trabalho e em Maya Duque *et al.* (2016). Entretanto, a transformação do modelo para o estilo de roteamento por arco aumenta significativamente o desenvolvimento do modelo de PLIM, dado que essa área da literatura é menos explorada, conforme discutido por Souza Almeida *et al.* (2022).

Estudos futuros podem realizar análises de sensibilidade em relação aos parâmetros de entrada, como feito por Pelot *et al.* (2024) em outro caso de bloqueio de rotas devido a catástrofes climáticas. Além disso, embora as rotas obtidas neste estudo de caso

apresentem extensões semelhantes (por exemplo, um número aproximado de vértices), pesquisas futuras podem incorporar restrições adicionais para garantir um balanceamento mais rigoroso das rotas. Outra linha de investigação promissora envolve a inclusão de características adicionais do problema, tais como a autonomia dos *jet skis*, a troca de turno entre voluntários e a dinâmica de cheias e vazantes da região, de modo a tornar o modelo mais realista e aplicável a cenários operacionais complexos.

Por fim, a capacidade de transporte de carga dos *jet skis*, como kits de primeiros socorros e refeições de emergência (por exemplo, *ready-to-eat emergency food*), também pode ser considerada em estudos futuros. Além de apenas localizar as vítimas, novas pesquisas podem explorar a sincronização das atividades de patrulhamento, de resgate e de transporte de cargas leves, permitindo, por exemplo, a distribuição de alimentos em abrigos inundados que ainda estejam em processo de evacuação das vítimas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O número de catástrofes relacionadas às mudanças climáticas tem aumentado, tanto no Brasil quanto no mundo, com eventos extremos cada vez mais impactantes, como as recentes inundações no Rio Grande do Sul (CRED; UNDRR, 2020). Após tais desastres, as vulnerabilidades das comunidades tornam-se mais evidentes, uma vez que muitas delas ficam desamparadas e dependentes de auxílio externo para sua sobrevivência e reconstrução.

Neste artigo, propõe-se um modelo de PLIM, ilustrado por meio de um estudo de caso fictício no Rio Grande do Sul. O modelo é maximiza a cobertura de áreas de difícil acesso patrulhadas por *jet skis*. O modelo foi implementado em *Python* e o estudo de caso resolvido com o auxílio de um *solver* comercial. Os resultados demonstram a aplicabilidade potencial do modelo, que pode auxiliar autoridades a estimar o número de veículos necessários para patrulhar uma determinada região e, assim, aprimorar o planejamento de respostas a futuras catástrofes.

Entre as limitações deste estudo, destacam-se o tempo de processamento do *solver* no caso de grafos maiores, e a proposta de somente um modelo de PLIM. Pesquisas futuras



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

podem explorar alterações nos parâmetros do estudo de caso, o balanceamento das rotas e a possibilidade de transporte de cargas, ampliando ainda mais a aplicabilidade prática do modelo.

REFERÊNCIAS

ASSIS DIAS, Mariane Carvalho de *et al.* Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil, on an intra-urban scale. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 31, p. 449–459, 1 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.06.002>. Acesso em: 14 set. 2025

BBC NEWS BRASIL. **Chuvas na Bahia: os fenômenos extremos que causam a tragédia no Estado.**, 27 dez. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-59804297>. Acesso em: 3 fev. 2022

BENAVENT, Enrique *et al.* Profitable mixed capacitated arc routing and related problems. **TOP**, v. 23, n. 1, p. 244–274, 1 abr. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11750-014-0336-x>. Acesso em: 1 set. 2025

CAI, Lecai *et al.* Bi-level programming enabled design of an intelligent maritime search and rescue system. **Advanced Engineering Informatics**, v. 46, p. 101194, 1 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101194>. Acesso em: 12 set. 2025

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **Panorama dos desastres no Brasil: Estudo técnico.** Brasília: Confederação Nacional de Municípios, 2024. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2024/Estudos_tecnicos/202405_ET_Panorama_De_sastres_Brasil_2013_a_2023.pdf. Acesso em: 1 set. 2025.

COOK, William. **In pursuit of the traveling salesman : mathematics at the limits of computation.** Course Book ed. Princeton: Princeton University Press, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/9781400839599>. Acesso em: 25 ago. 2025

CRED; UNDRR. **Human cost of disasters: an overview of the last twenty years (2000-2019).** [S.l.]: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019#:~:text=In%20the%20period%202000%20to,trillion%20in%20global%20econom ic%20losses>. Acesso em: 14 set. 2025

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The Truck Dispatching Problem. **Management Science**, v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2627477>. Acesso em: 14 set. 2025



DANTZIG, G.; FULKERSON, R.; JOHNSON, S. Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. **Journal of the Operations Research Society of America**, v. 2, n. 4, p. 393–410, 1954. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/166695>. Acesso em: 14 set. 2025

DE FREITAS, Carlos Machado *et al.* Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-81232014199.00732014>. Acesso em: 12 jun. 2025

DIAS, Juliana. **Estados doam R\$ 50 milhões, 2 mil toneladas de donativos e mais de 421 mil litros de água**. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/estados-doam-r-50-milhoes-2-mil-toneladas-de-donativos-e-mais-de-421-mil-litros-de-agua>. Acesso em: 1 set. 2025.

DOLMAN, Dorien Irene *et al.* Re-thinking socio-economic impact assessments of disasters: The 2015 flood in Rio Branco, Brazilian Amazon. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 31, p. 212–219, 1 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.04.024>. Acesso em: 11 set. 2025

FOLHAPRESS; UOL. **Guaíba transborda e orla de Porto Alegre é invadida pela água**. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2024/06/29/guaiba-transborda-e-orla-de-porto-alegre-e-invadida-pela-agua.ghtml>. Acesso em: 1 set. 2025.

KABIR, Muhammad *et al.* Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. **Journal of King Saud University - Science**, v. 35, n. 5, p. 102693, 1 jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102693>. Acesso em: 2 ago. 2025

LI, Yitong; WANG, Yifan; GONG, Jie. An integrated metric for rapid and equitable emergency rescue during urban flash flooding events. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 118, p. 105209, 15 fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105209>. Acesso em: 13 set. 2025

M. S. H. NIZAMI *et al.* Efficient Algorithm for Automated Rescue Boats. *In*: PROCEEDINGS OF THE 2012 IEEE 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SUPPORTED COOPERATIVE WORK IN DESIGN (CSCWD). **Proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)**. 23 maio 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CSCWD.2012.6221894>. Acesso em: 9 set. 2025

MACHADO, Ricardo A. S.; OLIVEIRA, Anderson G.; LOIS-GONZÁLEZ, Rubén C. Urban ecological infrastructure: The importance of vegetation cover in the control of floods and landslides in Salvador / Bahia, Brazil. **Land Use Policy**, v. 89, p. 104180, 1 dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104180>. Acesso em: 14 set. 2025



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

MARENGO, José *et al.* O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos avançados**, v. 38, n. 112, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012>. Acesso em: 13 set. 2025

MARENGO, Jose A. *et al.* Early warning services for disaster risk reduction in Brazil: The experience of CEMADEN during the floods of Rio Grande do Sul of May 2024. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 126, p. 105645, 1 ago. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105645>. Acesso em: 14 set. 2025

MAYA DUQUE, Pablo A.; DOLINSKAYA, Irina S.; SÖRENSEN, Kenneth. Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem. **European journal of operational research**, v. 248, n. 1, p. 272–285, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.026>. Acesso em: 30 dez. 2021

MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. **J. ACM**, v. 7, n. 4, p. 326–329, out. 1960. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/321043.321046>. Acesso em: 13 mai. 2025

MOROSINI, Lidianne. **Nova edição da Radis destaca crise climática e tragédia no RS**. Disponível em: <https://agencia.fiocruz.br/nova-edicao-da-radis-destaca-crise-climatica-e-tragedia-no-rs>. Acesso em: 1 set. 2025.

NETO, João Batista Ferreira *et al.* Impact of April and May, 2024 extreme precipitation on flooding in Rio Grande do Sul, Brazil. **Urban Climate**, v. 61, p. 102487, 1 jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102487>. Acesso em: 14 set. 2025.

NINA, Alex Santiago; DE ALMEIDA, Oriana Trindade; LOBO, Ivonês Damasceno. As abordagens técnica e social dos desastres naturais no Brasil: uma análise comparativa entre os banco de dados EM-DAT e S2ID. **Caderno de Estudos Sociais**, v. 36, n. 1, p. 1–23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33148/CES25954091>. Acesso em: 1 set. 2025

NÓIA-JÚNIOR, Rogério de S.; CHRISTO, Bruno Fardim; PEZZOPANE, José Eduardo Macedo. Extreme weather events in southern Brazil warn of agricultural collapse. **Next Research**, v. 2, n. 2, p. 100217, 1 jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100217>. Acesso em: 13 set. 2025

ODA, Paula Sayeko Souza *et al.* Disasters in Petrópolis, Brazil: political, urban planning, and geometeorological factors that contributed to the event on February 15, 2022. **Urban Climate**, v. 54, p. 101849, 1 mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101849>. Acesso em: 14 set. 2025



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

OSÓRIO, Pedro. **Brasil registrou mais de mil desastres naturais em 2023, segundo o Cemaden**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/brasil-registrou-mais-de-mil-desastres-naturais-em-2023-segundo-o-cemaden/>. Acesso em: 1 set. 2025.

OTEMPO. **Surfista que auxilia em resgate no RS encontra jacarés em cidade inundada**. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/brasil/2024/5/7/surfista-que-auxilia-em-resgate-no-rs-encontra-jacares-em-cidade0>. Acesso em: 1 set. 2025.

OZKAN, M. F.; CARRILLO, L. R. G.; KING, S. A. Rescue Boat Path Planning in Flooded Urban Environments. *In: 2019 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MEASUREMENT AND CONTROL IN ROBOTICS (ISMCR)*. **2019 IEEE International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR)**. 19 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISMCR47492.2019.8955663>. Acesso em: 8 set. 2025

PELOT, Ronald *et al.* Sensitivity Analysis of a Road Clearing and Relief Supplies Distribution Model for Vancouver Island in the Event of a Cascadia Megathrust Earthquake. *In: ISCRAM. ISCRAM Proceedings*. Münster, Germany: 2024. Disponível em: <https://ojs.iscram.org/index.php/Proceedings/article/view/96>. Acesso em: 26 set. 2024

RATHORE, Jitender *et al.* 2024 Brazil Floods: Mapping the extent and impacts in Eastern Rio Grande do Sul using geospatial techniques. **Natural Hazards Research**, 22 mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.03.011>. Acesso em: 8 set. 2025

SOUZA ALMEIDA, Luana *et al.* Datasets of disrupted transportation networks on Canada's West Coast in a plausible M9.0 Cascadia Subduction Zone earthquake scenario. **Data in Brief**, n. 108762, 20 nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108762>. Acesso em: 16 jun. 2022

SOUZA ALMEIDA, Luana; GHASEMI, Alireza; GOERLANDT, Floris. E-ARCP: an exact approach to the collaborative multi-vehicle prize collecting arc routing for connectivity problem. **SoftwareX**, v. 23, n. 101465, p. 6, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101465>. Acesso: 8 ago. 2023

SOUZA ALMEIDA, Luana; GOERLANDT, Floris; PELOT, Ronald. Trends and gaps in the literature of road network repair and restoration in the context of disaster response operations. **Socio-economic planning sciences**, v. 84, p. 101398, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101398>. Acesso em: 13 set. 2023

SOUZA, Ícaro Andrade; DE AMORIM SILVA, Vinícius. Flood prediction in Brazil: A review of trends, gaps and methodological perspectives. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 164, p. 105637, 1 out. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105637>. Acesso em: 14 set. 2025



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia
de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

WEBBER, Analupe *et al.* Profile of dermatoses in extreme weather events: case series during floods in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, 21 fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.abd.2024.12.001>. Acesso em: 20 mar. 2025