

Roteamento de drones para busca de vítimas em cenários de desastre: uma análise a partir da ciência, tecnologia e sociedade

RESUMO

Clara dos Santos Becker
Universidade do Estado de Santa
Catarina, Ibirama, Santa Catarina,
Brasil
clara.becker@edu.udesc.br

Marcelo de Souza
Universidade do Estado de Santa
Catarina, Ibirama, Santa Catarina,
Brasil
marcelo.desouza@udesc.br

A busca de vítimas é uma das principais tarefas na resposta a desastres naturais. É importante tomar decisões acertadas quanto à área a ser buscada e às rotas de busca. Este trabalho estuda o roteamento de drones para a busca de vítimas em cenários de desastres, apresentando a modelagem dessa tarefa como um problema de roteamento de veículos. São empregadas técnicas de otimização heurística por chaves aleatórias para a busca de soluções de maneira eficiente e escalável. A abordagem é validada em um estudo de caso real das enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul, com avaliação comparativa de dez algoritmos para definição de rotas. Além dos avanços técnicos, o trabalho discute as implicações sociais e éticas da tecnologia. Demonstra-se como a inovação tecnológica pode ser direcionada a desafios humanitários, reduzindo riscos para equipes de resgate, democratizando o acesso a soluções de baixo custo e promovendo governança colaborativa entre setores públicos, academia e comunidades. A análise de custos compara drones com alternativas tradicionais (e.g. helicópteros), evidenciando viabilidade econômica e operacional.

PALAVRAS-CHAVE: Resposta a desastres. Roteamento de drones. Otimização combinatória. Inteligência artificial. Otimização por chaves aleatórias.

INTRODUÇÃO

O número de desastres, sejam naturais ou provocados pelo ser humano, vem aumentando com o passar dos anos (OMM, 2021). Seus efeitos são de grande escala, como bloqueios e interdições de vias de transporte, falta de energia, interrupção de sistemas de comunicação, dificuldade no fornecimento de suprimentos e agravamento das condições sanitárias e de saúde. Diante disso, a resposta a desastres deve ser rápida e eficaz, reduzindo os impactos e o número de vítimas. A complexa tomada de decisões envolve diferentes tarefas, como a definição de rotas de transporte, operações de socorro e ajuda humanitária.

O planejamento de rotas para monitoramento da área afetada, busca e salvamento de vítimas, é um desafio importante nas operações de resposta a desastres. Trata-se de um desafio complexo devido ao impacto na infraestrutura viária, que comumente é danificada ou destruída. Além disso, a logística convencional é limitada por falta de veículos capazes de operar em ambientes instáveis e sujeitos a mudanças rápidas. O aumento do nível da água, por exemplo, causa o bloqueio de grandes áreas e vias de transporte, impedindo o acesso por veículos terrestres. Ademais, ações com esses veículos podem introduzir dificuldades adicionais, como a dificuldade da comunicação e coordenação em campo, aumento do risco à vida de profissionais e sobrecarga das demandas de equipes envolvidas no resgate de vítimas.

O uso de drones, i.e. veículos aéreos não tripulados, é uma solução eficiente para a busca de vítimas em cenários de desastres. Eles permitem ações de logística humanitária eficientes, seguras e de baixo custo em cenários de difícil acesso terrestre, como demonstrado por Lidumnieks et al. (2024). Além de facilitar o acesso a áreas atingidas, essas tecnologias permitem a coleta de dados em tempo real para localização e salvamento de vítimas, como evidenciado por Latha (2017). Drones podem reduzir o risco para equipes humanas, evitando a exposição a áreas de risco, além de que a muitos deles não requerem controle usuário em todo o tempo de operação.

Este trabalho apresenta um estudo da aplicação de drones para a busca de vítimas em cenários de desastres, como enchentes e deslizamentos de terra. Em particular, o trabalho foca no uso de algoritmos de otimização para definir rotas, visando cobrir a área atingida na busca por sobreviventes. É apresentada uma modelagem baseada no problema do roteamento de veículos (VRP, de *vehicle routing problem*) (Kulkarni e Bhawe, 1985), que consiste em definir rotas para a visita de um conjunto de pontos por um determinado número de veículos (neste caso, drones). Para a solução do problema, foram aplicados algoritmos de otimização por chaves aleatórias como o algoritmo BRKGA (Gonçalves e Resende, 2011) e GRASP (Chaves et al., 2024b), através do *framework Random-Key Optimizer* (Chaves et al., 2024a), produzindo rotas com o objetivo de minimizar o tempo total de operação. Essa modelagem permite adaptação para diferentes cenários de roteamento, como resposta a desastres e monitoramento da área afetada e busca de vítimas. Sua aplicação é demonstrada em um estudo de caso

real, envolvendo as cheias que ocorreram no estado do Rio Grande do Sul no ano de 2024 (BBC News, 2024).

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. É apresentada uma revisão da literatura e discutidos trabalhos relacionados. São descritos os conceitos básicos e o funcionamento da otimização por chaves aleatórias, bem como diferentes algoritmos dessa natureza usados neste trabalho. O VRP é formalizado e é descrita a representação de soluções via chaves aleatórias. É apresentado o estudo de caso da aplicação dos métodos propostos no cenário das enchentes do Rio Grande do Sul, bem como discutidos os resultados. Finalmente, são fornecidas conclusões e direcionamentos para trabalhos futuros.

TRABALHOS RELACIONADOS

A literatura apresenta diversas abordagens baseadas na modelagem de cenários de roteamento de drones via VRP. Rabta et al. (2018) apresentam um modelo de otimização para uso de drones na distribuição de itens de socorro. O modelo é resolvido como um programa linear inteiro misto e validado com cenários numéricos que ilustram sua aplicação na prática. Chowdhury et al. (2021) também propõem uma abordagem baseada em programação inteira mista para a resolução do VRP com uso de dois tipos de veículos, caminhões e drones, atuando em conjunto para entrega de suprimentos para populações isoladas. Eles apresentam um estudo de caso real de uma área costeira frequentemente afetada por furacões do estado do Mississippi. Os autores exploram algoritmos heurísticos para a busca de soluções para o problema estudado.

Faiz et al. (2024) propõem uma formulação baseada em programação inteira mista para a resolução do VRP com caminhões e drones para entrega de suprimentos para populações em cenários de desastres. Eles estudam dados simulados inspirados em um caso real e aplicam uma abordagem de geração de colunas e restrições para criação de rotas. Finalmente, Huang et al. (2022) também apresentam uma formulação matemática para resolução do VRP com drones e caminhões para entrega de pacotes usando um algoritmo heurístico para encontrar soluções aproximadas.

Os estudos apresentados propõem modelos de otimização que se adequam à gestão de cenários de desastre. Eles apresentam geração de rotas eficientes para a distribuição de itens de socorro e suprimentos, principalmente para populações isoladas e demonstram também a integração de drones com veículos terrestres para otimizar as operações logísticas. As conclusões apresentadas sustentam a aplicação de otimização via VRP com drones para o cenário das enchentes no Rio Grande do Sul, devido à necessidade de agilidade na busca e salvamento de vítimas do desastre e à impossibilidade de rotas terrestres devido à estrutura viária comprometida.

Vários estudos adotam técnicas de otimização por chaves aleatórias para resolver problemas variados de otimização. Enquanto a combinação dessa abordagem com algoritmos genéticos foi amplamente estudada ao longo dos últimos anos (Snider e Daskin, 2006; Gonçalves e Resende, 2011; Pinto et al., 2018; Shawkat et al., 2023), trabalhos recentes a combinam com outros algoritmos heurísticos. Chaves et al. (2024b) apresentam um algoritmo GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) usando otimização por chaves aleatórias,

explorando a versão contínua do algoritmo. Os autores apresentam um estudo experimental aplicando a abordagem para solução de diversos problemas em grafos, como o problema do caixeiro viajante, localização de hubs, sobertura e partição, além do problema de sequenciamento de tarefas. Chaves et al. (2024a) apresentam um estudo abrangente, combinando otimização por chaves aleatórias a oito algoritmos heurísticos. Além disso, os autores exploram execuções paralelas de um ou mais algoritmos e estratégias de colaboração através de um conjunto compartilhado de soluções elite. Os experimentos mostram um bom desempenho dessa abordagem na solução de diversos problemas, incluindo a localização de instalações e particionamento de grafos.

CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE

As contribuições desta pesquisa estabelecem uma relação direta do trabalho com as áreas de ciência, tecnologia e sociedade (CTS). Além do impacto científico e operacional, este trabalho demonstra como avanços tecnológicos podem ser direcionados para desafios sociais urgentes. O estudo se caracteriza pela inovação tecnológica aplicada a um propósito humanitário, reforçando o papel da tecnologia como ferramenta para redução de riscos e salvamento de vidas. A abordagem proposta otimiza recursos logísticos e minimiza a exposição de equipes de resgate a ambientes de risco, mostrando como soluções baseadas em inteligência artificial podem transformar a resposta a cenários críticos e de desastres. Dessa forma, o estudo ilustra a sinergia entre desenvolvimento tecnológico e bem-estar social, contribuindo para discussões sobre inovação responsável e aplicações da ciência em benefício coletivo.

O papel da tecnologia no desenvolvimento social foi amplamente discutido por Kahlau et al. (2019). Os autores defendem que a chamada tecnologia social oferece novas e mais sustentáveis formas de desenvolvimento econômico, contribuindo para a construção de uma sociedade mais justa e igualitária. Essa visão é compartilhada por diversos autores, como Santos e Rocha (2021) e Barros et al. (2024a). Tal como este trabalho, vários estudos demonstram a contribuição de tecnologias sociais em diversos domínios, como gestão de riscos (Kneodler et al., 2023), desenvolvimento territorial (Santos et al., 2025) e logística (Barros et al., 2024b).

Este trabalho também analisa os custos da aplicação de drones na busca por vítimas, em comparação com alternativas tradicionais como helicópteros. Essa análise evidencia dimensões importantes da relação entre tecnologia e sociedade. A viabilidade econômica da solução proposta abre possibilidades para sua adoção em contextos diversos, incluindo regiões com recursos limitados. Essa acessibilidade potencial reforça o papel da tecnologia como agente democratizante, especialmente quando desenvolvida com propósito social, um dos pilares centrais dos estudos em CTS. Neste contexto, Fernandes et al. (2024) analisam iniciativas relacionadas à tecnologia social, identificando sua relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Os autores mostram que a maioria das iniciativas estão relacionadas a tecnologias para saneamento básico e qualidade da água, o que evidencia a necessidade de ações voltadas a outras necessidades, como infraestrutura de qualidade e redução de desigualdades. Barros et al. (2024a) reúnem mais de cem iniciativas de tecnologia social na Amazônia. Essas iniciativas permitem explorar o potencial da região, rica

por sua diversidade biológica e cultural. Os autores destacam a importância da tecnologia social para o desenvolvimento da agricultura, educação, cultura, saúde, saneamento e tecnologia de alimentos.

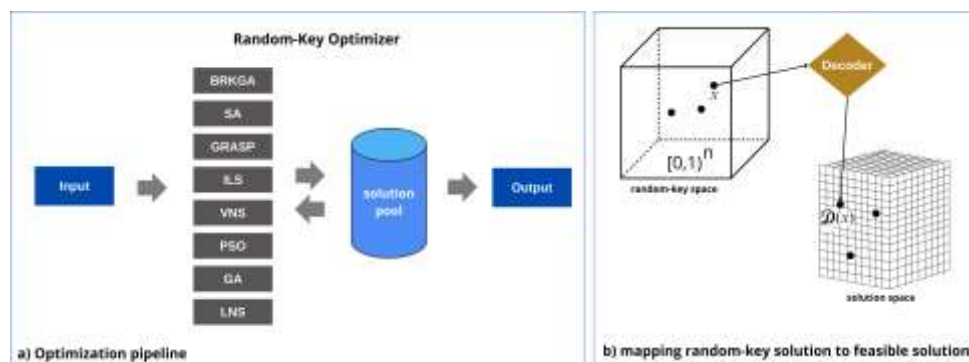
Outra discussão relevante no contexto deste estudo são as implicações éticas do uso de drones e outras tecnologias em operações humanitárias. Além do uso de drones, uma solução completa de busca em cenários de desastres envolve a adoção de técnicas de visão computacional para processar as imagens capturadas e identificar seres humanos e animais. A partir desse cenário, questões sobre privacidade, autonomia de sistemas e responsabilidade no uso de dados emergem como campos férteis para investigação interdisciplinar (Hagendorff, 2020; Trotta et al., 2023; Attard-Frost et al., 2023). Dignum (2019) discute as diretrizes para o desenvolvimento de soluções tecnológicas de forma responsável e ética. A autora defende a necessidade de preocupar-se com questões éticas no processo de construção dessas soluções, no projeto do seu comportamento e no código de conduta de projetistas e desenvolvedores. Neste sentido, o estudo oferece um caso concreto para examinar como soluções tecnológicas podem ser implementadas com transparência e responsabilidade social, mantendo o foco no benefício coletivo sem negligenciar considerações éticas fundamentais.

Finalmente, a implementação da solução proposta requer cooperação entre diferentes setores da sociedade. Governos, universidades, agentes de defesa civil e organizações humanitárias precisam atuar em conjunto para viabilizar a infraestrutura necessária, desde a regulamentação do uso de drones até o treinamento de equipes de resgate. Essa interdependência ilustra como inovações tecnológicas em resposta a desastres não são desenvolvidas isoladamente, mas emergem de ecossistemas que integram capacidade técnica, políticas públicas e conhecimento local (Howitt e Leonard, 2006; Oden et al., 2012; Nair et al., 2024). Neste sentido, o estudo reforça a importância de modelos de governança que facilitem a interação entre ciência, tecnologia e comunidades afetadas, garantindo que soluções sejam tecnicamente robustas e socialmente contextualizadas.

OTIMIZAÇÃO POR CHAVES ALEATÓRIAS

A otimização por chaves aleatórias usa uma representação abstrata da solução em um espaço latente. Para isso, são usadas chaves aleatórias que codificam a solução através de um vetor X de números reais no intervalo $[0,1]$. Cada elemento $x \in X$ é chamado de chave aleatória. Dado um vetor X de chaves aleatórias, um decodificador D o transforma em uma solução S do problema a ser resolvido. Com isso, o problema é reduzido a encontrar o conjunto de chaves aleatórias (i.e. o vetor X) que otimiza uma dada função objetivo. Em outras palavras, ele é reduzido a um problema de otimização contínua de caixa preta, o que permite a aplicação de algoritmos de forma independente do problema original.

Figura 1 – Ideia geral da otimização por chaves aleatórias e do *framework* RKO.



Fonte: Chaves et al. (2024a)

O *framework* Random-Key Optimizer (RKO), proposto por Chaves et al. (2024a), implementa essas ideias juntamente com vários algoritmos heurísticos de solução. A Figura 1 ilustra as ideias da otimização por chaves aleatórias e o funcionamento do RKO. A Figura 1 (b) apresenta a ideia geral do mapeamento de chaves aleatórias ao espaço de soluções através do decodificador do problema. O RKO recebe como entrada uma instância do problema e retorna a melhor solução encontrada durante o processo de busca. Ele implementa as metaheurísticas listadas na Figura 1 (a) e usa computação paralela para realizar busca colaborativa, compartilhando soluções de boa qualidade através de um *pool* de soluções elite.

O *pool* de soluções é inicializado com uma quantidade predefinida de soluções geradas aleatoriamente e refinadas por um procedimento de busca local. Não são aceitas soluções repetidas nesse *pool*. Qualquer solução melhor que as existentes e encontrada por algum algoritmo é inserida no *pool* de soluções. Após a aceitação da nova solução, o *pool* descarta a solução com pior valor de função objetivo, mantendo seu tamanho fixo. Esse processo de compartilhamento de soluções visa melhorar continuamente a qualidade das soluções, ao mesmo tempo que mantém diversidade.

A flexibilidade do RKO se destaca na integração de várias metaheurísticas ao *framework*. Esse conjunto inclui algoritmos genéticos (GA e BRKGA), *simulated annealing* (SA), *greedy randomized adaptive search procedure* (GRASP), *iterated local search* (ILS), *variable neighborhood search* (VNS), *particle swarm optimization* (PSO) e *large neighborhood search* (LNS). Cada algoritmo apresenta uma abordagem diferente de exploração do espaço de busca, baseada na representação por chaves aleatórias e no mecanismo de decodificação de soluções.

Os algoritmos genéticos (GA) (Holland, 1992) são inspirados na natureza e se baseiam nos princípios da seleção natural e da evolução das espécies para produzir boas soluções para problemas de otimização. Em sua versão padrão, o algoritmo opera em uma população de soluções candidatas. O algoritmo evolui gerações de soluções mediante a seleção, recombinação e mutação dessas soluções. Sua extensão para a otimização por chaves aleatórias deu origem ao algoritmo RKGA (Bean, 1994) e, posteriormente, à sua versão com viés (BRKGA) (Gonçalves e Resende, 2011). O algoritmo mantém uma população de soluções por chaves aleatórias e introduz um viés para a seleção de soluções elite. A cada iteração, a população é dividida em conjuntos de soluções elite e soluções aleatórias, gerando novos descendentes por meio da recombinação de soluções desses grupos. A recombinação, proposta por Spears e De Jong (1991), seleciona prioritariamente

elementos da solução de elite, uma vez que adota maior probabilidade de herança para essa solução.

O **SA** (Kirkpatrick et al., 1983) é um algoritmo inspirado no processo de resfriamento (ou recozimento) de produtos da metalurgia. O resfriamento controlado de materiais leva a estados mais estáveis e de baixa energia. O SA explora o espaço de soluções modificando iterativamente a solução atual e aceitando a solução resultante com base em um critério probabilístico, o qual é evoluído de forma controlada, dando cada vez menor probabilidade de aceitar soluções de pior qualidade. O **GRASP** (Feo e Resende, 1995) e sua versão contínua C-GRASP (Hirsch et al., 2007) apresentam duas fases. A primeira consiste na construção de uma nova solução usando uma heurística semi-gulosa. A segunda aplica uma busca local para refinamento da solução construída.

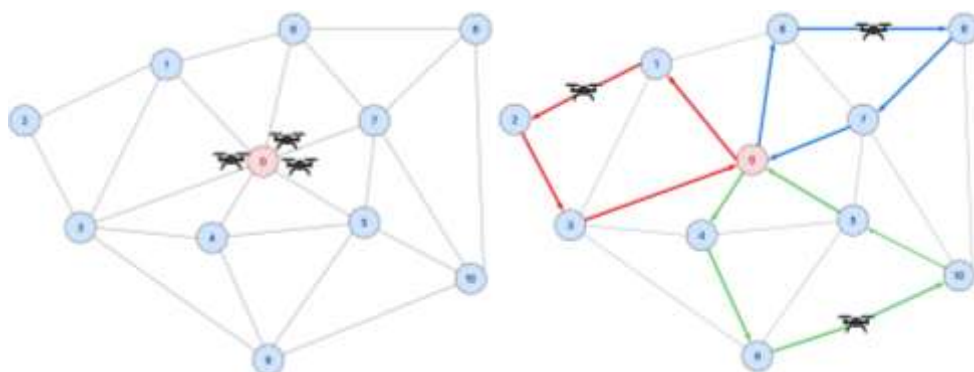
O **ILS** (Lourenço et al., 2003) é uma metaheurística que alterna entre duas etapas com objetivos de diversificação e intensificação, respectivamente. Na etapa de diversificação, a solução atual é perturbada e, por consequência, uma nova solução é produzida. Na etapa de intensificação, a região em torno da solução perturbada é explorada por uma busca local. O **VNS** (Mladenovic e Hansen, 1997) explora sistematicamente um conjunto de vizinhanças para escapar de ótimos locais. A busca alterna entre as vizinhanças com o objetivo de encontrar soluções progressivamente melhores.

O **PSO** (Kennedy e Eberhart, 1995) também é um algoritmo inspirado na natureza, especificamente no comportamento social de bandos de pássaros. Nessa abordagem, um grupo de soluções candidatas, chamadas de partículas, iterativamente ajustam suas posições com base em sua melhor experiência individual e na melhor experiência de todo o grupo, buscando assim pela solução ótima. Finalmente, o **LNS** (Ropke e Pisinger, 2006) define uma estratégia de exploração do espaço de soluções que consiste em realizar, iterativamente a destruição parcial da solução atual, para logo em seguida realizar sua reconstrução com potencial de melhoria. A fase de destruição é realizada por meio da remoção de uma parte das chaves aleatórias, enquanto a fase de reparo adota uma estratégias de busca local.

PROBLEMA DO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

O problema do roteamento de veículos (VRP) (Kulkarni e Bhave, 1985) é um problema clássico de otimização combinatória, sendo aplicado a diversos cenários nas áreas de logística e transporte. Sua proposta consiste em determinar as rotas mais eficientes para uma frota de veículos que deve atender (i.e. visitar) um conjunto de clientes, de forma a minimizar o custo das rotas percorridas pelos veículos. Neste trabalho, os veículos são drones que devem visitar um conjunto de pontos de monitoramento em busca de vítimas. O objetivo é minimizar o tempo de viagem da rota mais longa, de modo que o tempo total de operação (todos os pontos visitados) seja mínimo.

Figura 2 – Representação de uma instância (esquerda) do VRP, representada por um grafo e um conjunto de drones, e uma possível solução (direita) mostrando as rotas de cada drone.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

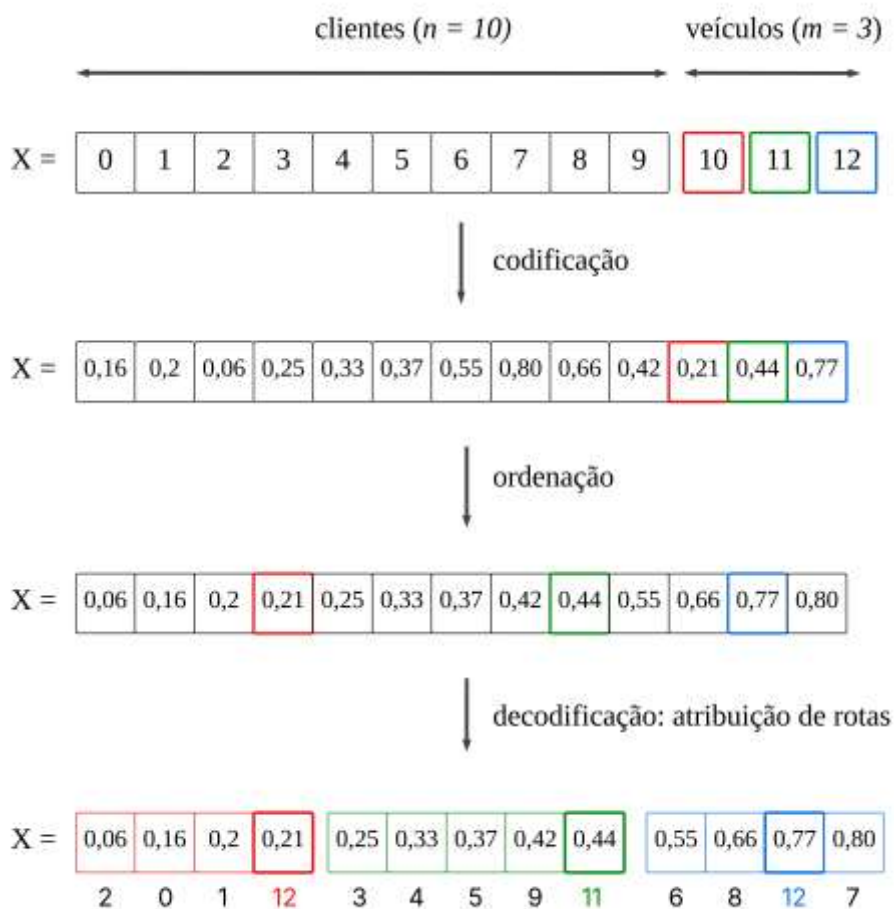
A Figura 2 ilustra uma instância do problema (esquerda), representada por um grafo com 10 pontos e 3 drones. O ponto 0 representa o depósito, i.e. a base de operações de onde os veículos devem partir para realizar a busca e, posteriormente, retornar. A Figura 2 também apresenta uma possível solução para essa instância (direita). São apresentadas as rotas de cada drone: o primeiro visita os pontos $\{1,2,3\}$, rota apresentada com os arcos na cor vermelha; o segundo visita os pontos $\{6,8,7\}$, com a rota ilustrada pelos arcos em azul; e o terceiro visita os pontos $\{4,9,10,5\}$, com arcos na cor verde. Todos os drones voltam ao depósito após visitação dos pontos.

Para mapear soluções do VRP a chaves aleatórias, foi implementado um decodificador baseado nas ideias de (Resende e Werneck, 2015). Assume-se a existência de n pontos e m veículos. A solução por chaves aleatórias é representada por um vetor X com $n + m$ posições (i.e. chaves aleatórias). As primeiras n chaves estão associadas a cada um dos n pontos, enquanto as últimas m chaves se relacionam com os veículos.

A Figura 3 ilustra o processo de decodificação de chaves aleatórias em uma solução para o VRP. É apresentada uma instância com $n = 10$ e $m = 3$. Inicialmente, os índices do vetor são ordenados de forma crescente em relação aos seus valores, produzindo uma permutação. As chaves associadas aos veículos atuam como delimitadores de rota. Os pontos menores que o primeiro delimitador são atribuídos à rota do primeiro veículo. Os pontos subsequentes são atribuídos ao segundo veículo, até o segundo delimitador. Esse processo é repetido até que todos os pontos sejam atribuídos à rota correspondente. Note que após o penúltimo delimitador, todos os pontos são atribuídos à última rota.

No exemplo da Figura 3, o primeiro veículo visita os pontos $\{2,0,1\}$, cujas posições no vetor são destacados na cor vermelha; o segundo veículo visita os pontos $\{3,4,5,9\}$, com a rota ilustrada pelas posições na cor verde; o terceiro veículo visita os pontos $\{6,8,7\}$, com posições na cor azul.

Figura 3 – Representação da resolução do VRP através de chaves aleatórias.



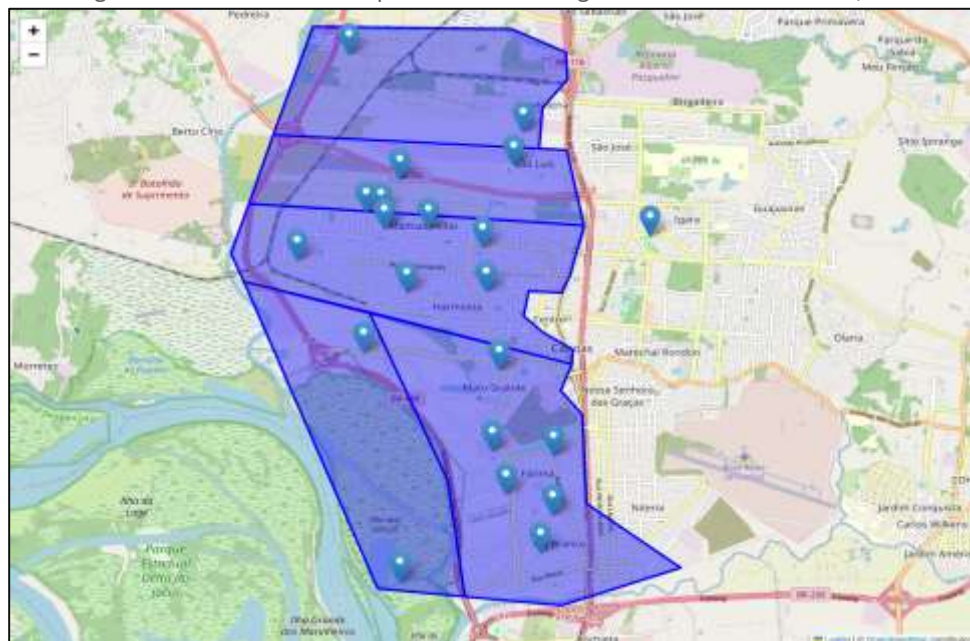
Fonte: elaborado pelos autores (2025).

ESTUDO DE CASO: ENCHENTES NO RIO GRANDE DO SUL

O desastre natural que assolou o estado do Rio Grande do Sul (Brasil), no período de abril a maio de 2024, afetou cerca de 90% do território estadual e atingiu 470 municípios (Senado Federal, 2024). Os impactos foram expressivos, incluindo inundações generalizadas, deslizamentos de terra e infraestrutura viária fortemente comprometida (Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2024). Esses impactos resultaram em centenas de milhares de pessoas desabrigadas. Um dos municípios mais afetados pelas enchentes foi Canoas, situado na Região Metropolitana de Porto Alegre. A cidade teve dois terços de sua área atingida (Zanchettin, 2024).

Dada a severidade dos acontecimentos e a complexidade do cenário resultante, este município foi escolhido para o estudo. Os bairros mais afetados foram Mathias Velho, Mato Grande, Rio Branco e São Luís. Mesmo após o recuo da água, algumas ruas ainda possuíam mais de dois metros de entulhos e lama (Aguiar e Reinholz, 2025). Os dados para geração das instâncias para o VRP com drones foram extraídos do GEOCANOAS, um repositório de informações geográficas sobre a inundação disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Canoas (2024).

Figura 4 – Instância com 20 pontos na área alagada da cidade de Canoas, RS.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

A Figura 4 apresenta uma instância com 20 pontos a serem visitados pelos drone na operação de busca. Cada ponto é definido por uma coordenada geográfica e, portanto, corresponde a uma posição da área afetada, onde potencialmente há vítimas a serem socorridas. O Centro Olímpico Municipal de Canoas, localizado fora da área afetada e marcada na Figura 4, atua como base para a operação (i.e. de onde sai e para onde retornam os drones). Ao total foram geradas 15 instâncias, variando a quantidade, posição dos pontos e a quantidade de drones. Foram criadas instâncias com todas as combinações de n pontos e m drones, para $n \in \{10, 20, 40, 80, 160\}$ e $m \in \{2, 4, 8\}$, totalizando 15 instâncias de diferentes tamanhos (e, por consequência, diferentes níveis de complexidade). A distribuição dos pontos a serem visitados considera a densidade populacional de cada região da área afetada. Note que a área destacada na Figura 4 está dividida em cinco regiões. As regiões superiores abrangem os bairros Ilha das Graças, Bairro Industrial e São Luís. Por serem menos populosos, 10% do total de pontos são posicionados nessa região. A região central compreende os bairros Mathias Velho, Harmonia e Centro e recebe 40% dos pontos. As regiões ao sul abrangem os bairros Mato Grande, Fátima e Rio Branco, e recebem 30% dos pontos.

O custo de deslocamento entre os pontos é medido em tempo de voo realizado pelo drone. O custo é calculado pela razão entre a distância de Haversine das coordenadas dos pontos e a velocidade média do drone. As simulações da aplicação foram baseadas nas especificações do modelo Spectral 2 da Nuvem UAV¹. O custo do equipamento e seus acessórios (que inclui uma câmera RGB) totaliza R\$ 98.900,00. Adotou-se uma velocidade média de cruzeiro de 43 km/h e autonomia de 1 hora por voo, sendo este o tempo máximo de duração de uma rota. O custo a ser minimizado na aplicação é o tempo da rota mais longa.

Foram avaliadas cada metaheurística disponível no RKO, bem como a execução paralela de todas as metaheurísticas implementadas (algoritmo chamado de "RKO"). Os algoritmos foram executados por 10 replicações, com 60 segundos de tempo limite de execução em cada replicação. Os experimentos

consideram o tempo de execução da CPU, garantindo que todas as metaheurísticas sejam executadas em tempo computacional equivalente. As soluções são avaliadas conforme o tempo de viagem da rota mais longa (i.e. mais demorada, em horas) a ser minimizado. As execuções do RKO foram realizadas em um ambiente computacional com processador Intel Core i5-10210U de 10ª geração, com 4 núcleos operando a 1,6 GHz, 8 GB de memória RAM, executando sistema operacional Linux.

A Tabela 1 apresenta os resultados da aplicação do RKO para o cenário estudado. São apresentados o melhor valor (*best*) e a média de valores (*avg*) de 5 execuções de cada algoritmo. Para as instâncias menores (com $n \leq 20$), todos os algoritmos encontram a mesma solução em todas as replicações, potencialmente a solução ótima. Em instâncias maiores, no entanto, a diferença entre os algoritmos se torna mais notável. O GRASP apresenta bom desempenho para instâncias maiores, como as de $n = 160$, obtendo bons valores para diferentes quantidades de drones. O BRKGA-CS apresenta um bom desempenho em instâncias médias, assim como o GA padrão. O ILS apresenta o único melhor resultado para a instância com $n = 80$ e $m = 4$. O algoritmo RKO (que combina as metaheurísticas anteriores) também apresenta desempenho competitivo com os outros algoritmos, encontrando as melhores soluções para todas as instâncias com $n = 40$ e o melhor valor entre os algoritmos avaliados para última instância ($n = 160$ e $m = 8$).

A viabilidade da aplicação de drones para busca de vítimas pode ser analisada em função do custo e das limitações desses equipamentos. O modelo de referência para este estudo, Spectral 2, tem um custo aproximado de aquisição de R\$ 98.000,00. Assim, o investimento total varia de R\$ 98.000,00 a R\$ 784.000,00, para a aquisição de 1 a 8 unidades do drone. Os resultados da Tabela 1 evidenciam os benefícios de adotar um maior número de drones. Com uma frota de 8 deles, é possível fazer o monitoramento de 160 pontos em uma única operação, i.e. em menos de 1 hora todos os pontos são visitados, o que não é possível com somente 2 drones. Existem alternativas de menor custo que também poderiam ser adotadas, mas a autonomia e a velocidade de voo costumam ser menores. A autonomia de voo do equipamento impõe uma restrição prática para a aplicação, pois as rotas precisam respeitar essa limitação. O modelo Spectral 2 possui autonomia de 1 hora, i.e. a rota de maior tempo deve levar no máximo esse tempo.

Em comparação com o monitoramento e busca de vítimas em cenários de desastres com veículos tradicionais, um helicóptero apresenta custo operacional superior. Um helicóptero como o Esquilo B3 H125 tem consumo de 170 a 200 litros de querosene por hora de voo. Considerando apenas o custo com combustível, estima-se um custo total próximo de R\$ 1.000,00 para esse helicóptero os 8 drones para a instância com 160 pontos. Para o monitoramento completo, o custo sobe para cerca de R\$ 8.000,00.

Tabela 1 – Resultados do RKO e suas diferentes metaheurísticas para as instâncias estudadas. Para cada algoritmo, é apresentado o valor médio das soluções produzidas em 5 replicações, bem como o valor da melhor solução produzida. Os melhores valores para cada instância são apresentados em negrito.

Inst.	n	m	BRKGA			BRKGA-CS			GA			GRASP			ILS			LNS			PSO			SA			VNS			RKO		
			Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best		
10	2	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392			
10	4	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360			
10	8	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360			
20	2	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521			
20	4	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400			
20	8	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400			
40	2	0,642	0,623	0,644	0,624	0,615	0,607	0,623	0,614	0,655	0,623	0,614	0,655	0,623	0,667	0,635	0,646	0,623	0,608	0,607	0,632	0,623	0,614	0,607	0,632	0,623	0,614	0,607	0,632	0,614		
40	4	0,430	0,424	0,432	0,419	0,424	0,419	0,430	0,420	0,441	0,427	0,456	0,428	0,442	0,428	0,442	0,426	0,424	0,435	0,419	0,426	0,419	0,426	0,419	0,435	0,419	0,426	0,419	0,435	0,419		
40	8	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393			
80	2	0,894	0,810	0,870	0,774	0,888	0,823	0,824	0,782	0,903	0,875	0,850	0,828	0,881	0,795	0,946	0,924	0,870	0,815	0,862	0,835	0,870	0,815	0,862	0,835	0,870	0,815	0,862	0,835			
80	4	0,589	0,532	0,591	0,543	0,545	0,531	0,537	0,516	0,553	0,497	0,609	0,529	0,558	0,506	0,602	0,568	0,569	0,544	0,571	0,535	0,569	0,544	0,571	0,535	0,569	0,544	0,571	0,535			
80	8	0,417	0,403	0,440	0,420	0,410	0,404	0,416	0,407	0,411	0,404	0,436	0,403	0,418	0,405	0,453	0,440	0,409	0,404	0,418	0,410	0,409	0,404	0,418	0,410	0,409	0,404	0,418	0,410			
160	2	1,378	1,251	1,407	1,349	1,235	1,116	1,169	1,106	1,193	1,155	1,259	1,203	1,266	1,197	1,894	1,783	1,242	1,193	1,254	1,174	1,242	1,193	1,254	1,174	1,242	1,193	1,254	1,174			
160	4	0,848	0,773	0,870	0,818	0,738	0,694	0,745	0,644	0,702	0,669	0,700	0,665	0,761	0,714	1,350	1,264	0,720	0,692	0,760	0,723	0,720	0,692	0,760	0,723	0,720	0,692	0,760	0,723			
160	8	0,585	0,556	0,631	0,611	0,526	0,484	0,509	0,477	0,504	0,485	0,519	0,491	0,528	0,490	0,911	0,883	0,511	0,494	0,509	0,471	0,511	0,494	0,509	0,471	0,511	0,494	0,509	0,471			

Essa análise desconsidera os custos adicionais de manutenção, seguro e equipe especializada. A alternativa, em caso de cheias, seria a busca de vítimas com o uso de embarcações. Essa alternativa possui limitações de velocidade e acesso em áreas com obstáculos, como destroços ou entulhos. Essas condições demandam maior tempo de operação, além da necessidade de equipe humana e sua exposição a riscos diretos, como o contato com água potencialmente contaminada. Diante disso, a exploração de drones para busca e salvamento de vítimas, empregando otimização heurística para definição de rotas, se mostra como uma estratégia viável e interessante. A abordagem oferece um monitoramento eficiente da área de desastre, fornecendo dados visuais em tempo real enquanto reduz os custos operacionais. Embora a aplicação opere sob a restrição de autonomia de 1 hora, ela se mostra robusta, mantendo a viabilidade para grandes áreas de monitoramento, a exemplo dos cenários apresentados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresenta uma estratégia de busca por vítimas em áreas afetadas por desastres naturais. É apresentada uma modelagem desse tipo de cenário envolvendo o problema do roteamento de veículos com drones. A geração das instâncias para roteamento de drones na resposta emergencial foi realizada com base em dados reais, por meio de um estudo de caso das enchentes ocorridas no estado Rio Grande Sul. Essas instâncias são resolvidas com 10 metaheurísticas, empregando o paradigma de otimização por chaves aleatórias através do uso do *framework* Random-Key Optimizer (RKO).

A análise comparativa das abordagens mostra que para instâncias menores, a escolha da estratégia heurística tem pouco impacto na qualidade das soluções. Porém, em instâncias maiores há diferenças expressivas no desempenho dos algoritmos. Os algoritmos BRKGA-CS e ILS se destacam em instâncias com 80 pontos de monitoramento, enquanto o algoritmo GRASP e a abordagem própria do RKO são superiores para instâncias com 160 pontos, que correspondem aos maiores cenários estudados. Cabe destacar que nenhuma das abordagens se mostra dominante ao considerar todas as instâncias, o que mostra o desempenho competitivo de todos os algoritmos estudados, bem como a possibilidade de construção de um portfolio de algoritmos integrado a estratégias de seleção de algoritmos com base em características das instâncias. Os resultados evidenciam a eficácia do RKO na solução do problema proposto, mostrando-se uma ferramenta robusta e flexível para a solução de problemas de roteamento.

A análise de custo da exploração de drones em cenários de busca de vítimas demonstra a necessidade de um investimento inicial considerável. No entanto, o custo operacional da aplicação é significativamente menor do que aquele observado com uso de helicópteros, uma estratégia comumente adotada. O uso de drones também oferece maior segurança à equipe de resgate e menor tempo de operação, quando comparado ao uso de embarcações. Apesar da limitação da autonomia de voo dos drones (em torno de 1 hora), eles se mostram como uma estratégia eficiente, fornecendo o monitoramento da área afetada em tempo real e reduzindo a exposição da equipe de resgate a riscos envolvidos na operação.

Além disso, a integração dos novos algoritmos heurísticos baseados em chaves aleatórias com o roteamento de drones é um primeiro passo para o

desenvolvimento de aplicações mais abrangentes em cenários de logística humanitária, incluindo a distribuição de suprimentos médicos, a avaliação de danos pós-desastre e o monitoramento contínuo de áreas de risco. Os resultados apresentados evidenciam que o roteamento usando drones melhora a eficiência operacional, bem como aumenta a capacidade de resposta em situações críticas, onde o tempo e a eficácia são determinantes para salvar vidas. Trabalhos futuros podem explorar a combinação de drones com veículos terrestres ou aquáticos, bem como a incorporação de técnicas de inteligência artificial e visão computacional para análise automática de imagens capturadas durante as missões, permitindo uma identificação mais rápida e precisa de vítimas. Neste sentido, a abordagem proposta se mostra viável para o cenário estudado, mas também estabelece abordagens promissoras para a gestão de desastres em larga escala, com potencial de adaptação a diferentes contextos e tecnologias.

Drone routing for victim search in disaster scenarios: An analysis based on Science, Technology, and Society

ABSTRACT

Searching for victims is one of the main tasks in natural disaster response. It is important to make accurate decisions regarding the search area and search routes. This work studies drone routing for victim search in disaster scenarios, presenting the modeling of this task as a vehicle routing problem. Random-key heuristic optimization techniques are used to search for solutions in an efficient and scalable manner. The approach is validated in a real case study of the 2024 floods in Rio Grande do Sul, with a comparative evaluation of ten algorithms for route definition. In addition to technical advances, the work discusses the social and ethical implications of technology. It demonstrates how technological innovation can be directed to humanitarian challenges, reducing risks for rescue teams, democratizing access to low-cost solutions, and promoting collaborative governance among public sectors, academia and communities. The cost analysis compares drones with traditional alternatives (e.g. helicopters), demonstrating economic and operational feasibility.

KEYWORDS: Disaster response. Drone routing. Combinatorial optimization. Artificial intelligence. Random-key optimization.

NOTAS

¹ As especificações do drone Spectral 2 (Nuvem UAV) podem ser consultadas em <https://www.nuvemuav.com/drone-spectral>.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC; TO2023TR246).

REFERÊNCIAS

- Aguiar, C. and Reinholz, F. Ato reúne moradores de Canoas (RS) que ainda sofrem com os efeitos das enchentes de 2024. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2025/05/05/ato-reune-moradores-de-canoas-rs-que-ainda-sofrem-com-os-efeitos-das-enchentes-de-2024>. 2025. Acesso em: junho de 2025.
- Attard-Frost, Blair; de los Ríos, Andrés; Walters, Deneille R. The ethics of AI business practices: a review of 47 AI ethics guidelines. *AI and Ethics*, v. 3, n. 2, p. 389-406, 2023.
- Barros, Benedita et al. Coletânea de Experiências de Tecnologia Social na Amazônia. 2024a.
- Barros, Wellington Silva de et al. Tecnologias sociais e inovação na logística de última milha: proposta de integração entre correios e OSCS. 2024b.
- BBC News. Brazil floods: Hundreds of Rio Grande do Sul towns under water. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-68968987>. 2024. Acesso em: junho de 2025.
- Bean, J. C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA Journal on Computing*, 6(2):154–160, 1994.
- Chaves, A. A., Resende, M. G. C., Schuetz, M. J. A., Brubaker, J. K., Katzgraber, H. G., Arruda, E. F. d., and Silva, R. M. A. A random-key optimizer for combinatorial optimization. *arXiv preprint arXiv:2411.04293*, 2024a.
- Chaves, A. A., Resende, M. G. C., and Silva, R. M. A. A random-key GRASP for combinatorial optimization. *Journal of Nonlinear and Variational Analysis*, v. 8, p. 855-881, 2024b.
- Chowdhury, S., Shahvari, O., Marufuzzaman, M., Li, X., and Bian, L. Drone routing and optimization for post-disaster inspection. *Computers & Industrial Engineering*, 159:107495, 2021.
- Dignum, Virginia. Responsible artificial intelligence: how to develop and use AI in a responsible way. Cham: Springer, 2019.
- Faiz, T. I., Vogiatzis, C., Liu, J., and Noor-E-Alam, M. A robust optimization framework for two-echelon vehicle and UAV routing for post-disaster humanitarian logistics operations. *Networks*, 84(2):200–219, 2024.

- Feo, T. A. and Resende, M. G. A greedy randomized adaptive search procedure. *Journal of Global Optimization*, 6(2):109–133, 1995.
- Fernandes, Jardel Lopes et al. *Tecnologias Socioambientais Aplicáveis em Áreas de Vulnerabilidade Social*. XV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Belém, PA, 2024.
- Gonçalves, J. F. and Resende, M. G. C. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. *Journal of Heuristics*, 17(5):487–525, 2011.
- Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Impactos das chuvas e cheias extremas no rio grande do sul em maio de 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/relatorio-sisperdas-evento-enchentes-em-maio-2024.pdf>. 2024. Acesso em: junho de 2025.
- Hagendorff, Thilo. The ethics of AI ethics: An evaluation of guidelines. *Minds and machines*, v. 30, n. 1, p. 99-120, 2020.
- Hirsch, P., Pardalos, P. M., and Resende, M. G. A GRASP for the continuous p-median problem. *Journal of Global Optimization*, 39(1):21–35, 2007.
- Holland, J. H. Genetic algorithms. *Scientific American*, 267(1):66–73, 1992.
- Howitt, Arnold M.; Leonard, Herman B. Katrina and the core challenges of disaster response. *Fletcher F. World Aff.*, v. 30, p. 215, 2006.
- Huang, S.-H., Huang, Y.-H., Blazquez, C. A., and Chen, C.-Y. Solving the vehicle routing problem with drone for delivery services using an ant colony optimization algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, 51:101536, 2022.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*, volume 4, pages 1942–1948. IEEE, 1995.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., and Vecchi, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598):671–680, 1983.
- Kneodler, Thais da Silva et al. *Tecnologias sociais para ações de gestão de risco em desastres: uma revisão de escopo*. *Saúde em Debate*, v. 46, p. 187-200, 2023.
- Kulkarni, R. V. and Bhawe, P. R. Integer programming formulations of vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 20(1):58–67, 1985.
- Latha, S. Application of drone technology for flood risk monitoring and modeling. *Computers & Electrical Engineering*, 106:24–34, 2017.
- Lidumnieks, T., Celms, A., and Bergmanis, I. Application of drone technology for flood risk monitoring and modeling. In *Proceedings of the 24th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, volume 24, pages 11–18, 2024.
- Lourenço, H. R., Martin, O., and Stützle, T. Iterated Local Search. In Glover, F. And Kochenberger, G. A., editors, *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 2003.
- Mladenovic, N. and Hansen, P. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11-12):1097–1100, 1997.
- Nair, Vishnu G. et al. A scoping review on unmanned aerial vehicles in disaster management: Challenges and opportunities. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, v. 5, n. 6, p. 1799-1826, 2024.

Oden, Razia V. N. et al. Four key challenges in disaster response. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2012. p. 488-492.

Petrobras. Tabelas de preços de combustíveis de aviação. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/documents/d/precos-dos-combustiveis/tabelas-de-precos-comb-aviacao-01-06-25-pdf>. 2025. Acesso em: junho de 2025.

Pinto, B. Q., Ribeiro, C. C., Rosseti, I., and Plastino, A. A biased random-key genetic algorithm for the maximum quasi-clique problem. European Journal of Operational Research, 271(3), 849-865, 2018.

Prefeitura Municipal de Canoas. Portal GEOCANOAS. Disponível em: <https://tinyurl.com/4dep867f>. 2025. Acesso em: junho de 2025.

Rabta, B., Wankmüller, C., and Reiner, G. A drone fleet model for last-mile distribution in disaster relief operations. International Journal of Disaster Risk Reduction, 28:107–112, 2018.

Resende, M. G. C. and Werneck, R. F. BRKGA for VRP. Poster presented at the Amazon Machine Learning Conference, 2015.

Ropke, S. and Pisinger, D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. Transportation Science, 40(4):455–467, 2006.

Santos, André Luis Matos; ROCHA, Marcelo Borges. Estudo sobre tecnologia social e meio ambiente: levantamento em dissertações e teses brasileiras. Revista Tecnologia e Sociedade, v. 17, n. 46, p. 73-91, 2021.

Santos, Clérison Albanizio Pio et al. Tecnologias sociais e o desenvolvimento territorial do semiárido cearense. Revista Tecnologia e Sociedade, v. 21, n. 64, p. 75-98, 2025.

Senado Federal. Enchentes no RS: 417 municípios já foram atingidos. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/videos/2024/05/enchentes-no-rs-417-municipios-ja-foram-atingidos>. 2024. Acesso em: junho de 2025.

Shawkat, S. A., Tagougui, N., and Kherallah, M. Optimization-based pseudo random key generation for fast encryption scheme. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 12(2), 1007-1018, 2023.

Snyder, L. V., and Daskin, M. S. A random-key genetic algorithm for the generalized traveling salesman problem. European journal of operational research, 174(1), 38-53, 2006.

Spears, W. M. and De Jong, K. A. On the virtues of parameterized uniform crossover. In Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, pages 59–68. Morgan Kaufmann, 1991.

Trotta, Angelo; Ziosi, Marta; Lomonaco, Vincenzo. The future of ethics in AI: challenges and opportunities. AI & SOCIETY, v. 38, n. 2, p. 439-441, 2023.

WMO – World Meteorological Organization. Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water-related Hazards (1970–2019). World Meteorological Organization, Geneva, 2021.

Zanchettin, L. Ao menos 50 mil pessoas devem deixar suas casas devido à cheia dos rios em Canoas. Disponível em:

<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2024/05/ao-menos-50-mil-pessoas-devem-deixar-suas-casas-devido-a-cheia-dos-rios-em-canoas-clvr61xsk02b5011w6c9c0v5m.html>. 2024. Acesso em: junho de 2025.

Recebido: 27/06/2025
Aprovado: 11/08/2025
DOI: 10.3895/rts.v21n67.20468

Como citar:

BECKER, Clara dos Santos, SOUZA, Marcelo de. Roteamento de drones para busca de vítimas em cenários de desastre: uma análise a partir da ciência, tecnologia e sociedade. **Rev. Tecnol. Soc., Curitiba**, v. 21, n. 67, p.379-397, out./dez, 2025. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/20468>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

