

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO PARA ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE AMBULÂNCIAS NA CIDADE DE JACAREÍ

Luiz Henrique Marques¹, Aline de Lucas², Sostenes Pereira Gomes³, Wagner Ferraz Castro⁴

¹Graduando em Tecnologia de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Jacareí, marques.luiz@ifsp.edu.br

² Professor(a) EBTT, IFSP, Campus Jacareí, delucas@ifsp.edu.br

³Professor(a) EBTT, IFSP, Campus Jacareí, sostenes.gomes@ifsp.edu.br.

⁴Professor(a) EBTT, IFSP, Campus Jacareí, wagner.castro@ifsp.edu.br Wagner Ferraz Castro

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.03.03.04-9 Sistemas de Informação.

RESUMO: Este artigo propõe uma estratégia otimizada de posicionamento de veículos de emergência na cidade de Jacareí, com o objetivo de ampliar a cobertura populacional sem aumentar o número de viaturas. Para isso, foi aplicado um algoritmo genético à resolução do problema de cobertura máxima, utilizando dados populacionais e a frota já existente. Os resultados indicam que a cobertura pode ser aumentada em mais de 50% apenas com o reposicionamento dos veículos. A proposta demonstra que é possível alcançar melhorias significativas na resposta emergencial por meio da alocação estratégica de recursos, oferecendo uma solução eficaz e de baixo custo para contextos urbanos com restrições orçamentárias.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo genético, SAMU, modelo TEAM, alocação de ambulâncias, problema de localização de máxima cobertura

APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZED AMBULANCE ALLOCATION IN THE CITY OF JACAREÍ

ABSTRACT: This article proposes an optimized positioning strategy for emergency vehicles in the city of Jacareí, Brazil, aiming to increase population coverage without expanding the fleet. A genetic algorithm was applied to solve the maximum coverage problem using population data and the existing number of vehicles. The results indicate that coverage can be increased by over 50% simply by repositioning the current fleet. The proposed approach demonstrates that significant improvements in emergency response can be achieved through strategic resource allocation, offering an effective and low-cost solution for urban contexts with budgetary constraints.

KEYWORDS genetic algorithm, emergency public health, TEAM model, ambulance allocation, maximum coverage location problem

MH - Metaheuristics, SA - OR in Health

1 INTRODUÇÃO

A alocação eficiente de recursos é um desafio na administração pública, especialmente nos serviços de emergência médica, onde o tempo de resposta é crucial. No entanto, os custos para manter uma frota ampla são elevados. Técnicas de otimização, como algoritmos genéticos (AGs), permitem melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Este estudo aplica um AG para otimizar o posicionamento de ambulâncias em Jacareí (SP), município com cerca de 249 mil habitantes atendido pelo SAMU Regional desde 2015.

O serviço opera 24 horas com três Unidades de Suporte Básico e uma de Suporte Avançado, distribuídas em quatro bases. A escassez de recursos e a alta demanda afetam a eficiência, reforçando a necessidade de estratégias otimizadas. Este artigo apresenta a aplicação do AG ao problema de cobertura máxima, discute os resultados e suas implicações para o aprimoramento do atendimento emergencial na cidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O problema da cobertura ótima de serviços médicos de emergência (EMS) é amplamente estudado. O modelo de cobertura por conjunto de localizações (LSCM), proposto por Toregas et al. (1971), visa minimizar o número de instalações necessárias para cobrir todos os pontos de demanda dentro de um raio de atendimento. Contudo, ao assumir cobertura total, torna-se pouco realista em contextos com recursos limitados. O problema de localização com cobertura máxima (MCLP), introduzido por Church e ReVelle (1974), supera essa limitação ao buscar maximizar a cobertura com um número fixo de instalações, admitindo áreas não atendidas.

Figueiredo e Lorena (2005) e Schilling et al. (1979) propõem o modelo TEAM (Maximização da Cobertura Esperada com Base em Limiares), uma estrutura flexível para maximizar a cobertura sob restrições diversas, incluindo incertezas. O modelo permite a aplicação de algoritmos gulosos ou metaheurísticas, como algoritmos genéticos, sendo adequado para resolver o MCLP.

2.1 O Problema de Máxima Cobertura

O problema de máxima cobertura é um problema de otimização combinatória NP-difícil que busca encontrar o maior número de pontos de demanda que podem ser cobertos com um número limitado de conjuntos. Matematicamente, ele pode ser descrito da seguinte forma:

$$U = e_1, e_2, \dots, e_n; \quad (1)$$

$$S = s_1, s_2, \dots, s_m; \quad (2)$$

$$W = w_1, w_2, \dots, w_n; \quad (3)$$

$$S_i \subseteq U; \quad (4)$$

$$1 \leq k \leq m; \quad (5)$$

$$W_i = \bigcup_{i=1}^n; \quad (6)$$

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i. \quad (7)$$

A Equação 1 representa o universo de pontos de demanda. A Equação 2 é um conjunto de todos os subconjuntos possíveis si , onde cada subconjunto contém os pontos de demanda cobertos por uma possível localização de ambulância. Cada ponto de demanda $ei \in U$ possui um peso associado $wi \in W$ (Eq. 3) representando sua importância (por exemplo, população). O objetivo é selecionar k subconjuntos de S (Eq. 4 e 5) para maximizar o peso total dos pontos cobertos, conforme definido pela Equação 7.

3 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram obtidos do site oficial de Jacareí (2023) e de Jacareí (2010), incluindo quadras da cidade e populações por macrorregião do Plano Diretor Jacareí (2003). Como não havia um conjunto unificado, foi criado um novo *dataset* associando quadras a regiões.

$$P_{bn} = R_{gm}/n. \quad (8)$$

Cada quadra recebeu uma população (P_{bn}) proporcional a sua região (R_{gm}), dividida igualmente entre as quadras (n) como pode ser observado na equação 8. Em seguida, a biblioteca GeoPandas foi usada para calcular os centróides de cada quadra, gerando pontos de demanda com peso populacional e coordenadas. A clusterização via K-means, mostrada na Figura 1, para determinar o número adequado de clusters, foi calculado o coeficiente de silhueta médio (Rousseeuw (1987)) para diferentes valores de k . Observou-se que, para $k = 6$, o coeficiente apresentou um dos melhores desempenhos e portanto foi usado na representação. A clusterização destacou maiores concentrações de demanda nas regiões central e leste da cidade.

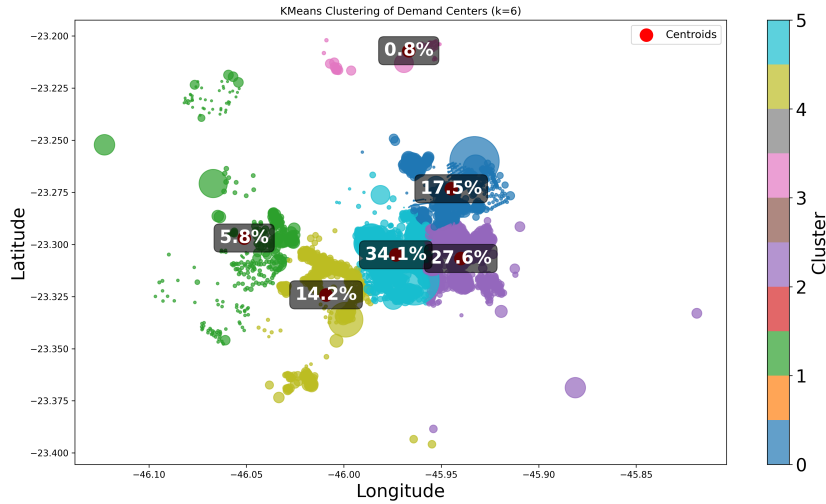


Figura 1: Clusterização dos pontos de demanda (centroid de cada quadra) da cidade feita usando o método K-means.

4 ALGORITMO GENÉTICO PARA O MODELO TEAM

Os AGs são eficazes para resolver o MCLP, explorando grandes espaços de soluções. O AG desenvolvido aloca ambulâncias do tipo avançado (TipoA) e do tipo básico (TipoB), de forma a maximizar a população coberta em um raio definido.

Representação: Cada solução é um cromossomo formado por dois vetores binários (xA e xB),

indicando a presença de ambulâncias TipoA e TipoB em locais potenciais.

Fitness: Calculado pela soma dos pesos populacionais cobertos, com bônus de 20% para quadras atendidas por TipoA.

Seleção: Utiliza roleta, favorecendo soluções mais aptas, mas mantendo diversidade.

Crossover: Combina dois pais, usando o mais apto como base. O filho adota posições onde ambos, ou apenas o pai base, possuem ambulâncias, e decide aleatoriamente quando apenas o pai guia as possui, equilibrando qualidade e diversidade.

5 RESULTADOS

Foram analisados dois cenários: (i) alocação ótima das quatro ambulâncias existentes, considerando tempos máximos de 10, 15 e 30 minutos com velocidade média de 30 km/h e distâncias diretas; (ii) impacto da inclusão de uma quinta unidade. Em ambos, o AG foi executado com 2.000 gerações e população de 200.

Cenário 1) Quatro Ambulâncias: A Figura 2 mostra os resultados para um tempo de resposta de 10 minutos. A solução gerada (A) reposiciona os veículos mais próximos ao centro, que possui a maior densidade de demanda. Esse posicionamento resulta em um aumento de 34,29% na cobertura em comparação com o modelo atual (B), que apresenta uma distribuição mais dispersa.

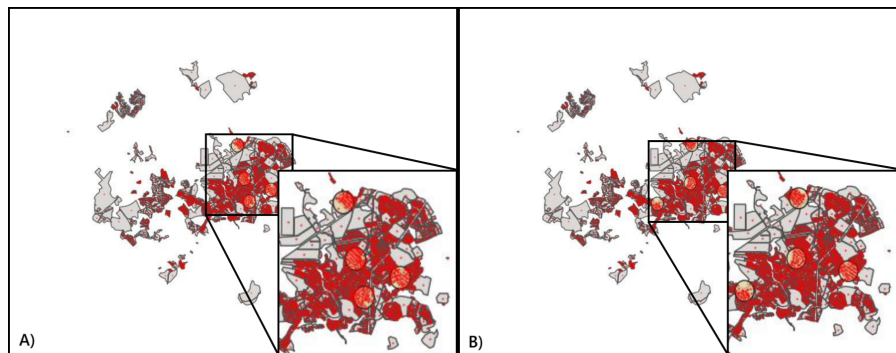


Figura 2: A) Solução gerada para um raio de 10 minutos; B) Representação do posicionamento real de ambulâncias para um raio de 10 minutos. Ambas as imagens apresentam zoom em ponto de interesse.

Com um raio de 15 minutos (Figura 3), o modelo atual (B) possui instalações em áreas pouco povoadas, reduzindo sua eficácia. A solução otimizada (A) concentra as instalações próximas aos *clusters* de alta demanda, alcançando um notável aumento de 52,07% na cobertura.

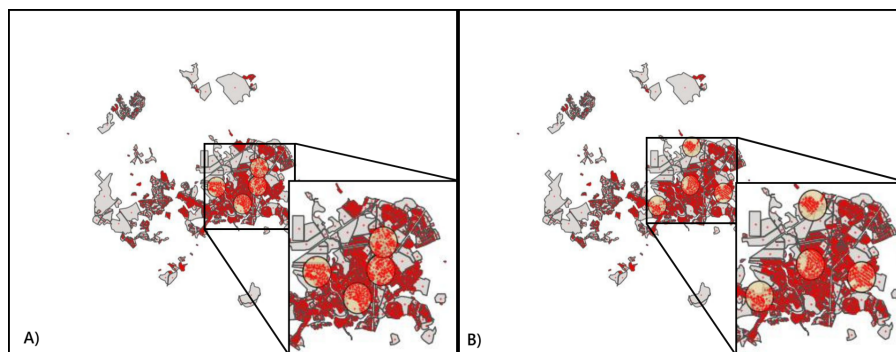


Figura 3: A) Solução do algoritmo para raio de 15 minutos; B) Posicionamento real das ambulâncias no mesmo raio. Ambas as imagens apresentam zoom em ponto de interesse.

A Figura 4 mostra o resultado para um raio de 30 minutos, onde o modelo atual apresenta melhor desempenho, mas ainda falha em cobrir áreas-chave de demanda. A solução otimizada resolve eficazmente essas lacunas, alcançando 65,14% de cobertura, uma melhoria de 20,82% em relação aos 53,91% do modelo atual.

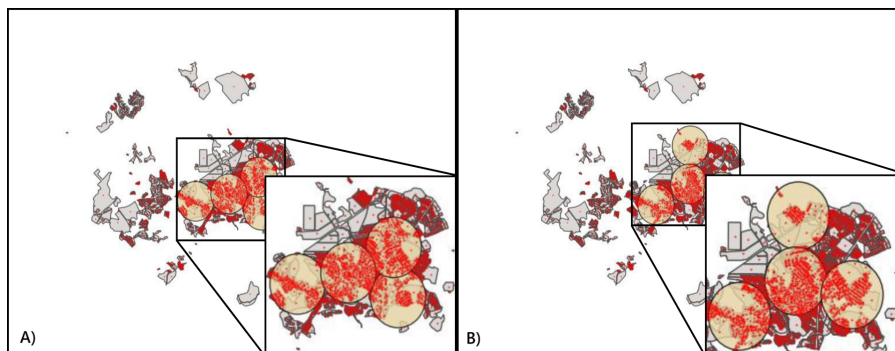


Figura 4: A) Solução gerada para um raio de 30 minutos; B) Representação do posicionamento real de ambulâncias para um raio 30 minutos. Ambas as imagens apresentam zoom em ponto de interesse.

A Tabela 1 compara o modelo atual de alocação de ambulâncias com as soluções otimizadas pelo AG, considerando raios de cobertura de 10, 15 e 30 minutos. Os resultados mostram ganhos expressivos de cobertura, especialmente no raio de 30 minutos, e tempos de execução compatíveis com a aplicação prática.

Raio (min)	Modelo Atual	4 Ambulâncias	5 Ambulâncias	Tempo de Execução
10	11.29%	15.16%	20.31%	4:56:45
15	19.30%	29.35%	35.80%	5:04:29
30	53.91%	65.13%	74.05%	5:28:48

Tabela 1: Comparação de cobertura entre o posicionamento atual da cidade e as soluções geradas para vários raios e quantidades de Ambulâncias.

Cenário 2) Cinco Ambulâncias: Este cenário avaliou os benefícios potenciais da adição de uma quinta ambulância à frota. Os resultados são comparados com a solução ótima para quatro ambulâncias em diferentes raios e suas imagens produzidas podem ser vistas na Figura 5.

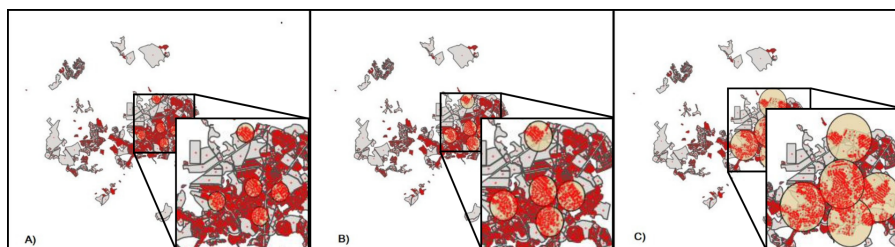


Figura 5: A) Solução para um raio de 10 minutos utilizando 5 veículos; B) Solução para um raio de 15 minutos utilizando 5 veículos; C) Solução para um raio de 30 minutos utilizando 5 veículos. As imagens contém também zoom em ponto de interesse.

A Tabela 1 mostra que a adição de uma quinta ambulância aumenta a cobertura em 33,97% no raio de 10 minutos, 21,98% para um raio de 15 minutos e um aumento de apenas 13,70% para um raio de 30 minutos. O resultado indica que, embora o reposicionamento da frota atual seja eficaz, a expansão

contribui para aprimorar a capacidade de resposta, sobretudo em situações que exigem menor tempo de deslocamento.

6 CONCLUSÃO

Este estudo demonstra a eficácia de um AG na alocação de ambulâncias em Jacareí, permitindo ampliar a cobertura populacional em mais de 50%, com tempo de resposta de 15 minutos e sem novos investimentos. Os resultados mostram que a alocação estratégica baseada em dados é uma alternativa eficaz e econômica para melhorar os serviços de saúde pública. As soluções superam o modelo atual ao concentrar recursos em áreas de maior demanda. Embora a inclusão de uma quinta ambulância aumente a cobertura, os maiores ganhos ocorrem com o reposicionamento da frota existente. O modelo proposto oferece uma solução prática e de baixo custo para contextos com recursos limitados.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

L.H.M.S. estudou o problema, levantou os dados, construiu os algoritmos genéticos e realizou as análises apresentadas no trabalho. S.P.G, A.L. e W.F.C. orientaram o trabalho e auxiliaram nas análises dos resultados obtidos. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFSP, por meio do programa PIBIFSP, pela concessão da bolsa de iniciação científica que possibilitou a execução do presente projeto.

REFERÊNCIAS

- CHURCH, R.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, Springer, v. 32, n. 1, p. 101–118, 1974.
- FIGUEIREDO, A. P. S.; LORENA, L. A. N. Localização de ambulâncias: Uma aplicação para a cidade de São José dos Campos – sp. In: *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiânia, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005. p. 1965–1972. 16–21 abril.
- PREFEITURA DE JACAREÍ. *Plano Diretor*. Jacareí: Prefeitura Municipal, 2003. Acesso em: 13 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.jacarei.sp.gov.br/cidadao/plano-diretor/>>.
- PREFEITURA DE JACAREÍ. *Face de Quadra 2023*. Jacareí: Prefeitura Municipal, 2023. Acesso em: 10 ago. 2024. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1WNOSxLlyk9lzJx08wMSonlOFIws2NTmh/view>>.
- PREFEITURA DE JACAREÍ. *Jacareí recebe três ambulâncias do Ministério da Saúde para atendimento do SAMU*. Jacareí: Prefeitura Municipal, 2023. Acesso em: 09 maio 2025. Disponível em: <<https://www.jacarei.sp.gov.br/tag/ambulancias/>>.
- ROUSSEUW, P. J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Elsevier, v. 20, p. 53–65, 1987.
- SCHILLING, D. A. et al. A location model for multiobjective siting of fire stations. *Interfaces, INFORMS*, v. 9, n. 4, p. 1–15, 1979.
- TOREGAS, C. et al. The location of emergency service facilities. *Operations Research, INFORMS*, v. 19, n. 6, p. 1363–1373, 1971.