

ANÁLISE PARA REPLANEJAMENTO DA LOCALIZAÇÃO DE BASES DE DESPACHO DE VEÍCULOS DE RESGATE: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Thayse Ferrari
Marcus Vinicius Oliveira Camara
Glaydston Mattos Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia de Transportes

RESUMO

Serviços Médicos de Emergência são sistemas de segurança pública responsáveis pelo atendimento pré-hospitalar a pacientes de emergência médica. Neste sentido, Problemas de Localização de Facilidades têm sido aplicados a fim de indicar locais estratégicos para posicionar bases de despacho de veículos de resgate que atendem às ocorrências de emergência. Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação dos possíveis impactos de um replanejamento das localizações de bases de despacho de veículos de resgate na cobertura e no tempo de resposta do atendimento de emergência. Dez cenários foram propostos com variações na quantidade de locais candidatos a receber bases de despacho de veículos de resgate, com ou sem limitação de número de bases a serem abertas. Esses cenários foram aplicados a um estudo de caso real no município do Rio de Janeiro – Brasil.

ABSTRACT

Emergency Medical Services are public safety systems in charge of prehospital care for patients in critical conditions. For this reason, Facility Location Problems have been applied to indicate strategic locations of dispatch bases for rescue vehicles that respond to emergency occurrences. The objective of this study is to evaluate the impacts of replanning the base locations for dispatching rescue vehicles in a certain coverage area and its response time. Ten scenarios are created with variations in the number of candidate sites to place rescue vehicle dispatch bases, with or without limitation on the number of bases to be opened. These scenarios are applied to a real case study in the city of Rio de Janeiro – Brazil.

1. INTRODUÇÃO

O Serviço Médico de Emergência, em inglês *Emergency Medical Service* (EMS), tem se mostrado, na atualidade, como um dos mais importantes serviços de saúde, tendo em vista que exerce um papel fundamental na redução das taxas de mortalidade e morbidade (Aringhieri *et al.*, 2017). Segundo Bélanger *et al.* (2016), tal serviço consiste em atividades básicas de cuidados médicos e de transportes, realizados a partir do recebimento de uma chamada de emergência. Com isso, a população é atendida por uma determinada equipe que dispõe de uma frota de ambulâncias, as quais devem ser estrategicamente posicionadas sobre a região que servem.

Este tipo de atendimento precisa ocorrer da maneira mais eficiente possível, uma vez que diversos estudos apontam que o primeiro quinto de hora (“*First Hour Quintet*”) está relacionado a condições críticas para as quais o sistema EMS pode ter um impacto significativo no resultado. Um dos principais exemplos do impacto negativo causado por um atendimento ineficiente são as paradas cardíacas, responsáveis por mais de 300 mil mortes anualmente na América do Norte, onde a probabilidade de sobrevivência do paciente é reduzida de 7 a 10% a cada minuto de atraso no tratamento inicial (Nichol *et al.*, 2008; Aringhieri *et al.*, 2017). Com isso, Jagtenberg *et al.* (2017) destacam que, devido a necessidade de prontidão no atendimento, o planejamento de EMS geralmente ocorre em função do tempo de resposta - tempo decorrido entre o recebimento da chamada de emergência e a chegada do EMS ao local de atendimento.

Neste contexto, há décadas surgem na literatura novas variações do Problema de Localização de Facilidades (PLF) com foco na localização de bases de despacho de veículos de resgate. As aplicações voltadas para o planejamento da localização de EMS podem ser encontradas em

diversos modelos, como na cobertura de conjuntos (Toregas *et al.*, 1971), modelos probabilísticos, em problemas de localização de máxima cobertura esperada (Daskin, 1983) e principalmente, nos modelos de cobertura (Brotcorne *et al.*, 2003; Alsalloum e Rand, 2006; Knight *et al.*, 2012; Yin e Mu, 2012; Su *et al.* 2015; Ferrari *et al.*, 2018).

Diante do exposto surgem alguns questionamentos: Até que ponto a disposição espacial das bases de despacho de veículos de resgate e, por consequência, a distribuição dos próprios veículos, influenciam no atendimento à população? A utilização de um número maior de bases, por si só, é capaz de aumentar a cobertura de atendimento e reduzir os tempos médios de resposta dos chamados? Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar os impactos de um replanejamento das localizações de bases de despacho de veículos de resgate na cobertura e tempo de resposta do atendimento de emergência prestado pelos EMS.

Como estudo de caso e base para proposição de novos cenários, este trabalho considera o modelo matemático proposto por Ferrari *et al.* (2018) e sua aplicação com dados reais do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ) – histórico de atendimentos de emergência para o ano de 2014 no município do Rio de Janeiro, com cerca de 105 mil registros e localização de 36 bases existentes disponíveis para EMS – e dados demográficos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – Censo Demográfico de 2010.

Assim, a contribuição deste artigo pode ser observada sob três vertentes principais: 1) no âmbito do planejamento de serviços de saúde, especialmente o atendimento de emergência, seja na esfera privada ou governamental; 2) no âmbito das questões socioeconômicas, tendo em vista que possibilita a diminuição da gravidade das sequelas adquiridas, em função da redução do tempo de resposta, que afeta diretamente a vida dos indivíduos e a economia do país; e 3) no âmbito acadêmico/científico, com a aplicação de modelagem matemática utilizando dados reais de um estudo de caso.

Este artigo está organizado da seguinte forma: o contexto da pesquisa é apresentado na Seção 2, com uma breve revisão da literatura sobre os Problemas de Localização de Facilidades aplicados aos atendimentos de emergência. A Seção 3 expõe o procedimento metodológico e o modelo matemático adotado neste estudo. O estudo de caso, que contempla a descrição da área de estudo e a definição dos cenários propostos, é apresentado na Seção 4. Na Seção 5 são expostos e discutidos os resultados obtidos para os cenários apresentados. Por fim, na última seção são apresentadas as considerações finais do trabalho.

2. PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES APLICADOS AOS ATENDIMENTOS DE EMERGÊNCIA

Maleki *et al.* (2014) afirmam que os EMS são sistemas de segurança pública que gerenciam a entrega de atendimento pré-hospitalar a pacientes que se encontram em condições de urgência/emergência médica. Segundo Ahmadi-Javid *et al.* (2017) cada EMS é, tipicamente, um processo de serviços que compreende quatro etapas principais: i) o recebimento de uma chamada de emergência e a avaliação da situação; ii) o despacho da equipe para o local da chamada, caso necessário; iii) o atendimento de emergência no local da chamada; e, iv) a transferência do paciente para uma unidade de tratamento adequada, seguida do retorno da equipe para a base.

No entanto, de acordo com Kergosien *et al.* (2015), a natureza incerta das chamadas de emergência, principalmente no que se refere ao horário de chegada e suas localizações, tende a prejudicar a operacionalização deste tipo de serviço. Diversos outros fatores também podem influenciar

diretamente a área de atendimento da EMS, como as variações no padrão da demanda, as mudanças no tempo de viagem ao longo do dia e da rede de transporte e a disponibilidade de veículos para atendimento das ocorrências (Bélanger *et al.*, 2016). Tal situação exige que os tomadores de decisão encontrem a melhor localização para abrir as bases de despacho de veículos de resgate, a fim de satisfazer a demanda de maneira otimizada. Neste sentido, Ingolfsson (2013) destaca que a seleção de locais para abrigar bases de veículos de resgate é uma decisão de longo prazo, no entanto, a atribuição de veículos às estações pode variar ao longo do tempo com o intuito de fornecer uma melhor correspondência entre a oferta e a demanda, em uma escala de tempo real.

Tradicionalmente, o Problema de Localização Máxima de Cobertura, do inglês *Maximal Covering Location Problem* (MCLP), é um problema de localização de facilidades que tem como objetivo selecionar alguns candidatos locais para instalar determinadas facilidades, a fim de maximizar a demanda total de clientes que são atendidos dentro de um raio de cobertura pré-definido (Church e ReVelle, 1974). Neste contexto, a maior parte dos modelos matemáticos presentes na literatura considera que as chamadas de emergência dos PLF são geradas a partir de pontos de demanda discretos e os locais das facilidades são selecionados a partir de um conjunto finito de locais candidatos (Marín, 2011; ReVelle *et al.*, 2008).

A modelagem matemática do MCLP foi inicialmente proposta por Church e ReVelle (1974), quando os autores partiram do princípio básico de que as facilidades não apresentavam capacidades, ou seja, um ponto de demanda seria atendido por uma facilidade desde que ele estivesse dentro do padrão de cobertura desta facilidade. No entanto, diversos outros estudos apontam que, além do padrão de cobertura, mostra-se fundamental considerar a capacidade das facilidades. Neste sentido, foram propostos modelos que garantiam que as demandas atribuídas a uma facilidade não excedessem a capacidade da mesma (Chung *et al.*, 1983; Current e Storbeck, 1988). Estes, maximizavam a demanda atendida ao mesmo tempo em que a distância média entre as demandas descobertas e as facilidades era minimizada (Haghani, 1996) e a facilidade apresentasse diferentes níveis de capacidade (Yin e Mu, 2012), tornando o problema ainda mais condizente com a realidade.

Com o intuito de trazer mais realidade aos estudos, surgiram abordagens multiobjetivo, uma vez que se constata com facilidade o *trade-off* entre objetivos do estudo. Como exemplo disso, o trabalho de Zaffar *et al.* (2016) propôs um modelo multiobjetivo para avaliar o desempenho de três objetivos comumente encontrados em modelos de localização de veículos de resgate (maximizar cobertura, minimizar tempo de resposta médio e maximizar a capacidade de sobrevivência dos pacientes). Já Shahriari *et al.* (2017) utilizaram um modelo bi-objetivo que busca minimizar o tempo de viagem e maximizar o nível de serviço para avaliar o atendimento de emergência por ambulâncias terrestres e helicóptero em Lorestan – Irã. Os autores constataram que nem sempre o aumento do gasto financeiro (com abertura de novos pontos de liberação dos veículos) implica em melhorias reais no tempo de atendimento das vítimas.

Recentemente este tema tem sido abordado com maior enfoque em situações reais, a exemplo de KC *et al.* (2018) que ampliaram a aplicação do MCLP para delimitar a cobertura atual do atendimento dos bombeiros de Brisbane – Austrália, a fim de compará-la com a cobertura de novas bases propostas, levando em conta as estimativas de crescimento populacional da área de estudo. Já Ferrari *et al.* (2018) avaliaram sob a ótica do problema multiobjetivo os atendimentos de emergência na cidade do Rio de Janeiro – Brasil. Para tanto, os autores utilizaram um modelo matemático que leva em conta a população atendida, o número de ocorrências e a distância percorrida pelos veículos de emergência para atendimento.

O PLF aplicado aos EMS também pode ser abordado com diferentes enfoques. Nickel *et al.* (2016), por exemplo, investigaram o problema de definir a localização e o número de ambulâncias e suas bases de despacho em uma determinada região sob a ótica do custo. O objetivo do modelo, neste caso, era minimizar o custo total de instalação dessas facilidades com a garantia de um nível de cobertura mínimo. Outras abordagens atuais dos PLF aplicados aos serviços de emergência podem ser encontradas em Harewood (2002), Schmid (2012), Maleki *et al.* (2014), McCormack e Coates (2015), Moeini *et al.* (2015), Ünlüyurt e Tunçer (2016), Dibene *et al.* (2017), Leknes *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2017).

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Este estudo utilizou os registros históricos de ocorrências no município do Rio de Janeiro, a localização das bases atuais de despacho de veículos de resgate e o modelo matemático proposto por Ferrari *et al.* (2018), como elementos para proposição de novos cenários e fonte primária de resultados para comparação. Os conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão do modelo matemático utilizados são apresentados a seguir.

Conjuntos e Parâmetros:

- I – conjunto que representa todos os pontos de demanda (setores censitários);
- J – conjunto que representa os locais candidatos a bases de despacho de veículos de resgate;
- $B_i \subseteq J$ – conjunto que representa todas as bases que podem atender a um ponto de demanda $i \in I$, dado um padrão de cobertura preestabelecido;
- $E \subseteq J$ – conjunto que representa as bases de despacho de veículos de resgate existentes;
- α_i – população da área de demanda $i \in I$;
- β_i – número de ocorrências do Tipo 1 na área de demanda $i \in I$;
- γ_i – número de ocorrências do Tipo 2 na área de demanda $i \in I$;
- δ_j – custo de abertura da base $j \in J$;
- $DIST_{ij}$ – distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e uma base $j \in J$;
- P – número total de ambulâncias disponíveis para serem alocadas aos pontos de despacho;
- $MAXP$ – número máximo de ambulâncias que cada base pode receber;
- C – capacidade de atendimento (em número de pessoas) de cada veículo de resgate;
- μ – número máximo de pontos de demanda que uma base de despacho pode atender;
- $dummy$ – base fictícia de capacidade infinita utilizada para demandas não cobertas por bases reais;
- TP – população total do município;
- TG – total de ocorrências Tipo 1;
- TT – total de ocorrências Tipo 2;
- TC – custo total de abertura das bases de despacho de veículos de resgate;
- TD – distância total a ser percorrida no município;
- K – penalidade atribuída à alocação de um ponto de demanda à base fictícia $dummy$;
- Q – número mínimo de bases de despacho de veículos de resgate existentes que devem ser selecionadas para permitir que novas bases sejam abertas; e
- N – número máximo de novas bases de despacho que podem ser escolhidas para abertura.

Variáveis de Decisão:

- $x_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in B_i$. Se $x_{ij} = 1$, o ponto de demanda $i \in I$ deve ser alocado à base de despacho de ambulâncias $j \in B_i$, caso contrário, $x_{ij} = 0$;
- $y_j \in \{0,1\} \forall j \in J$. Se $y_j = 1$, a base de despacho de veículos de resgate $j \in J$ deve ser aberta, caso contrário, $y_j = 0$;

- $a \in \{0,1\}$. Se $a = 1$, o número mínimo Q de bases de despacho existentes foi cumprido, caso contrário, $a = 0$; e
- $z_j \in \mathbb{Z}^+ \forall j \in J$. Esta variável representa o número de ambulâncias que deve ser alocado à base $j \in J$.

Modelo Matemático:

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} \frac{\alpha_i x_{ij}}{TP} + \frac{\beta_i x_{ij}}{TG} + \frac{\gamma_i x_{ij}}{TT} - \sum_{j \in J} \frac{\delta_j y_j}{TC} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} \frac{DIST_{ij} x_{ij}}{TD} - \sum_{i \in I} \frac{K(\alpha_i x_{i,dummy})}{TP} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in B_i} x_{ij} + x_{i,dummy} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in B_i \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq P \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_i x_{ij} \leq C z_j \quad \forall j \in B_i \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq \mu \quad \forall j \in B_i \quad (6)$$

$$\frac{(\sum_{j \in E} y_j - Q)}{|E|} \leq a \leq \left\lceil \frac{(\sum_{j \in E} y_j - Q)}{|E|} \right\rceil + 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J \setminus E} y_j \leq N a \quad (8)$$

$$z_j \leq MAXP \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in \{B_i, dummy\} \quad (10)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$a \in \{0,1\} \quad (12)$$

$$z_j \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j \in J \quad (13)$$

A Função Objetivo (1) deve maximizar a quantidade de pessoas atendidas pelas bases de despacho de veículos de resgate e a cobertura dos pontos de demanda, com prioridade para o atendimento de setores censitários com maior número de ocorrências registradas. Já os três últimos termos da Função Objetivo devem minimizar, respectivamente, o número de bases abertas, a distância entre as áreas cobertas e as bases de despacho e a penalidade pela alocação de bases de despacho fictícias aos setores censitários. A descrição completa do modelo, incluindo as restrições, pode ser observada em Ferrari *et al.* (2018).

4. ESTUDO DE CASO: RIO DE JANEIRO

O presente estudo foi aplicado à cidade do Rio de Janeiro, que possui população superior a 6,3 milhões de habitantes. Seu território é segmentado em 10.504 setores censitários que, para efeito administrativo, foram agrupados em cinco grandes Áreas de Planejamento (AP): AP 1 (Centro), AP 2 (Zona Sul), AP 3 (Zona Norte), AP 4 (Barra da Tijuca e Jacarepaguá) e AP 5 (Zona Oeste). No que se refere à distribuição populacional, devido às características naturais do município, sua população não se encontra distribuída de maneira igualitária ao longo do seu território, como pode-se observar na Figura 1. Os principais EMS da cidade são o Resgate do Corpo de Bombeiros e o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU), ambos sob a responsabilidade do CBMERJ, e sua infraestrutura para atendimento à população compreende 36 Unidades de Bombeiro Militar, utilizadas como bases de despacho de veículos de resgate (veja Figura 1). No ano de 2014, utilizado como base para essa pesquisa, esses EMS registraram o atendimento de 105.696 ocorrências.

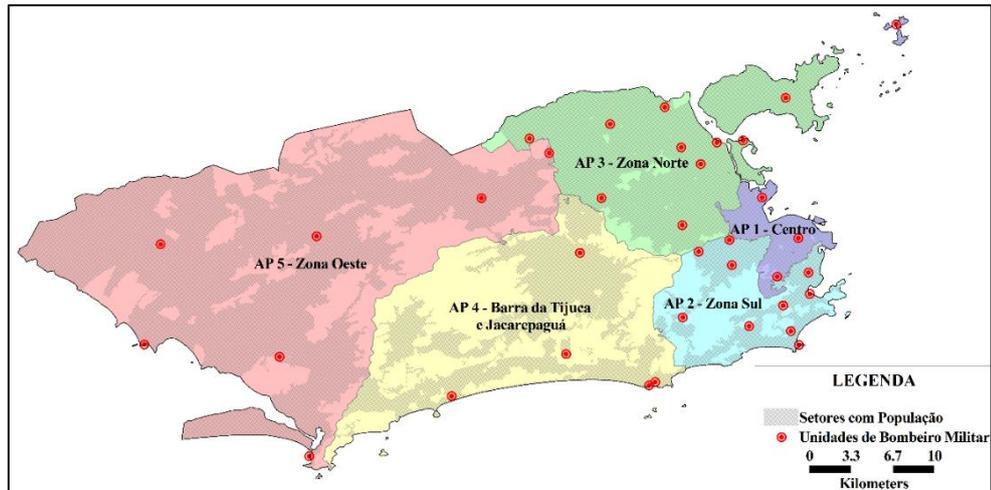


Figura 1: Representação da área de estudo.

No trabalho de Ferrari *et al.* (2018) foram estudados cenários que consideraram 36 bases pré-existentes do CBMERJ e, no máximo, 20 novos locais candidatos a receber novas bases e até 85 veículos disponíveis. O denominado Cenário-Base, utilizado para comparação, permite a utilização de até 36 bases pré-existentes e nenhum novo local. Com objetivo de avaliar os possíveis impactos de um replanejamento completo da localização de bases para despacho de veículos de resgate, são propostos neste estudo, 10 novos cenários que consideram: 50, 100, 200, 500 e 1000 locais candidatos a receber bases de despacho (Figura 2) com possibilidade de abertura de até 36 bases (Cenários 1-5) e sem limite de abertura de bases (Cenários 6-10), com a mesma quantidade de pontos candidatos. Todos os cenários permitem a utilização de até 85 veículos. As coordenadas geográficas dos pontos candidatos foram determinadas de forma aleatória dentro dos limites territoriais do município.

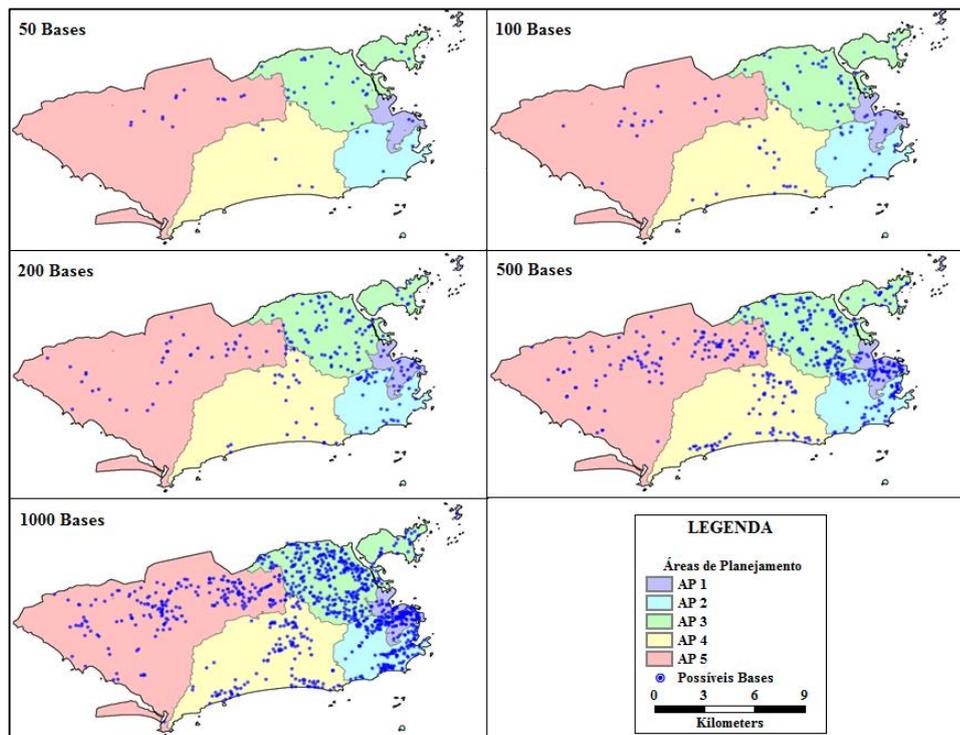


Figura 2: Locais candidatos a receber bases de despacho de veículos de resgate.

5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os experimentos computacionais foram realizados em computador com processador Intel® Xeon® 3.5Ghz, 32 GB de memória RAM, software de otimização CPLEX 12.7 (IBM, 2017) e TransCAD 5.0 (Caliper, 2008) para processamento de resultados e elaboração de mapas. Como critérios de parada para o CPLEX foram definidos: *gap* residual = 0; e tempo máximo de execução de 20 horas.

O resumo dos resultados para o Cenário-Base e para os 10 cenários propostos pode ser visualizado na Tabela 1. Utilizou-se como critérios de comparação entre os cenários a população e o número de ocorrências atendidas, a quantidade de bases de despacho abertas, a quantidade de veículos utilizados e o tempo médio de resposta para atendimento. Também foram analisados os recursos computacionais utilizados na obtenção dos resultados dos cenários.

Tabela 1: Resumo dos resultados dos cenários

Cenários	População	Ocorrências	Bases	Veículos	Tempo Médio de Resposta (min)	Tempo de Execução (seg)	GAP
Cenário-Base	82,7%	86,3%	32	82	5,5	2,8	0,00%
Cenário 1	83,1%	84,0%	33	83	5,4	3,1	0,00%
Cenário 2	92,7%	93,5%	36	85	6,0	13,5	0,00%
Cenário 3	95,5%	94,7%	36	85	5,5	301,4	0,00%
Cenário 4	97,7%	96,4%	36	85	5,3	2187,6	0,00%
Cenário 5	98,7%	98,1%	36	85	5,6	21875,7	0,00%
Cenário 6	83,1%	84,0%	33	83	5,4	3,1	0,00%
Cenário 7	93,0%	93,9%	46	85	5,0	315,6	0,00%
Cenário 8	96,0%	95,4%	56	85	4,3	1451,6	0,00%
Cenário 9	98,3%	97,0%	65	85	4,8	72000,0	0,14%
Cenário 10	98,1%	98,1%	59	85	4,9	72000,0	80,19%

No Cenário-Base, os parâmetros adotados permitem uma avaliação do atual nível de cobertura das bases de despacho do CBMERJ (observar Figura 3). Nota-se que o percentual de cobertura oferecido pelo sistema é de 82,7% da população e 86,3% das ocorrências, o que significa que quase 1,1 milhão de pessoas podem estar fora do raio de atendimento com tempo de resposta inferior a 10 minutos. Neste cenário são selecionadas 32 das 36 bases disponíveis para atendimento e 82 veículos. Quatro bases deixaram de ser utilizadas mesmo com pontos de demanda sem atendimento, o que pode ser explicado por possíveis sobreposições das áreas de cobertura das bases.

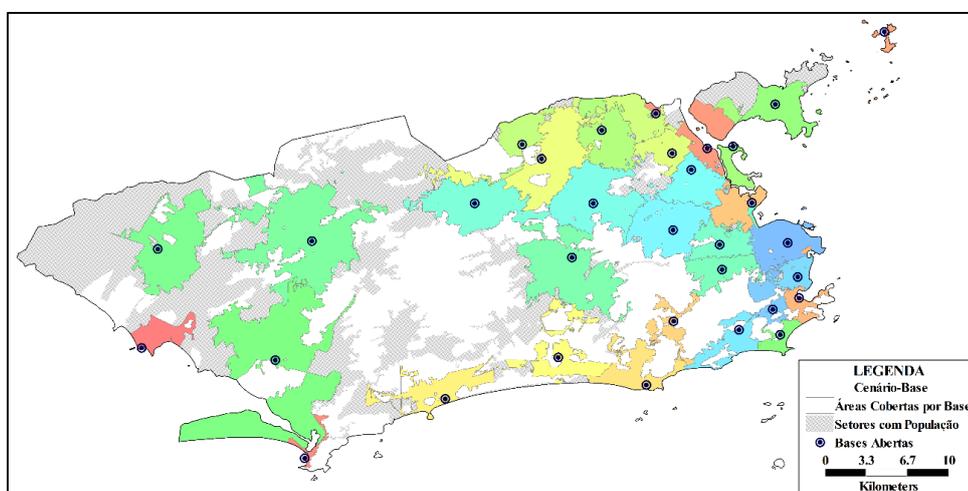


Figura 3: Áreas de cobertura do Cenário-Base.

Nos resultados dos Cenários 1 e 6, representados na Figura 4, que possuem o mesmo conjunto de locais possíveis para abertura de bases (50 locais), percebe-se que o incremento de mais uma base e um veículo resultam em uma pequena melhora no percentual de população coberta (0,4%) e no tempo médio de resposta. Contudo, o mesmo não é verificado para as ocorrências atendidas, que diminuem em 2,3%.

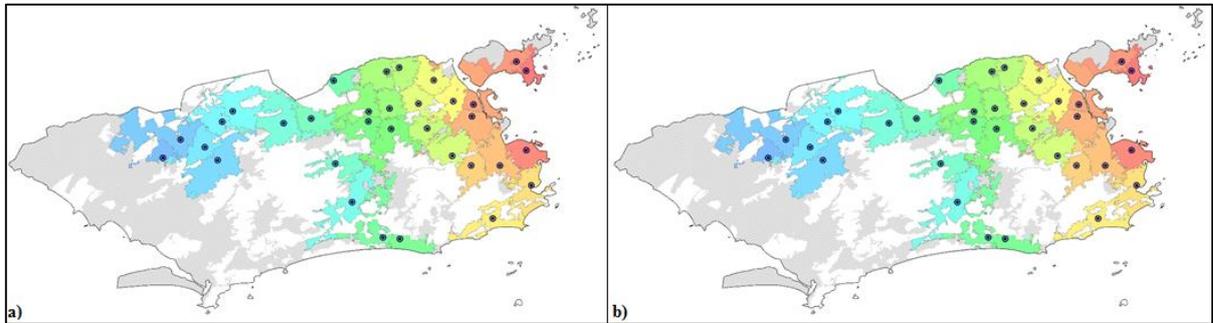


Figura 4: Áreas de cobertura do Cenário 1 (a) e do Cenário 6 (b).

Em ambos os cenários nota-se que não foram abertas bases na extremidade oeste das AP 4 e 5. Tal fato pode estar relacionado à disposição das possíveis novas bases pelo município, uma vez que, na disposição aleatória dos 50 locais disponíveis para abertura de bases, essa região pode ter recebido poucos pontos. Como, já no Cenário-Base, a distribuição das bases de despacho entre as AP do município não era igualitária, optou-se por analisar essa questão separadamente. Com isso, pode-se observar na Figura 5, que representa a distribuição percentual da população atendida por AP em cada um dos cenários, que além dos cenários já discutidos, as regiões das AP 4 e 5 também possuem atendimento consideravelmente inferior às demais nos Cenários 2 e 7 (100 locais disponíveis).

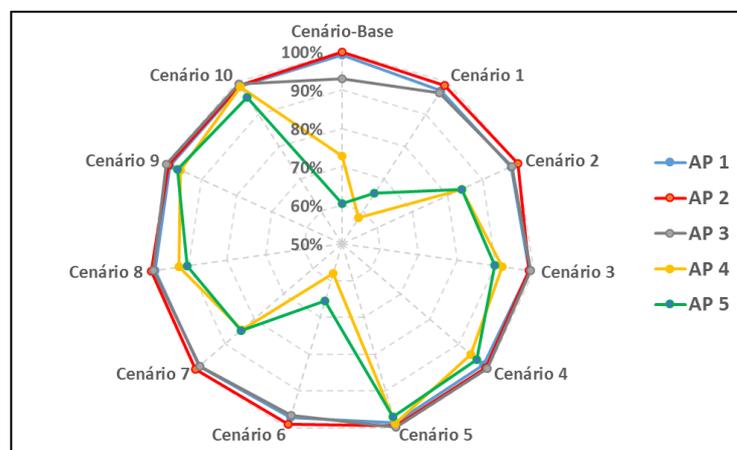


Figura 5: Percentual de população atendida por AP em cada cenário.

Apesar de ainda apresentarem deficiências na cobertura das AP 4 e 5, percebe-se que nos Cenários 2 e 7 houve um incremento considerável na cobertura da população (ver Figura 6) e das ocorrências. O aumento da população, em relação ao Cenário-Base foi de 10% para o Cenário 2, que utilizou 36 bases, e 10,3% para o Cenário 7, que resultou em 46 bases abertas. Já as ocorrências atendidas aumentaram em mais 7% em ambos os cenários. Por se valerem da mesma quantidade de veículos disponíveis (85 veículos), percebe-se que a diferença no número de bases utilizadas é capaz de explicar o menor tempo médio de resposta encontrado para o Cenário 7, de cinco minutos, um minuto a menos que no Cenário 2.

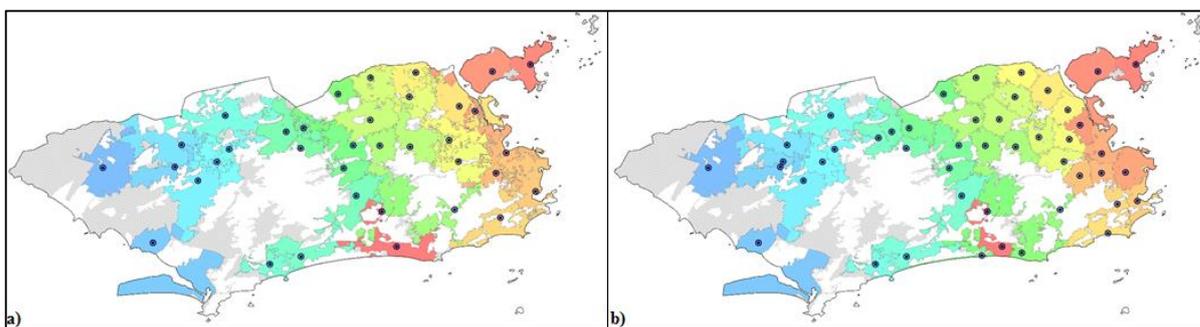


Figura 6: Áreas de cobertura do Cenário 2 (a) e do Cenário 7 (b).

Diferente do observado nos cenários anteriores, com os resultados dos Cenários 3 e 8 (200 locais disponíveis), representados na Figura 7, pode-se observar o incremento no número de setores censitários atendidos na região das AP 4 e 5. Com a nova disposição de bases, o Cenário 3 apresentou um aumento de 12,8% da população coberta e 8,4% de ocorrências atendidas, mesmo com a limitação de abertura de 36 bases. Para o Cenário 8, onde não havia limitação de abertura de bases, o aumento foi de 13,3% para a população coberta e 9,1% para as ocorrências. Já que no Cenário 8 foram abertas 56 novas bases, como era esperado, o tempo médio de resposta desse cenário foi cerca de 22% menor que do Cenário 3, onde foram abertas apenas 36 bases de despacho.

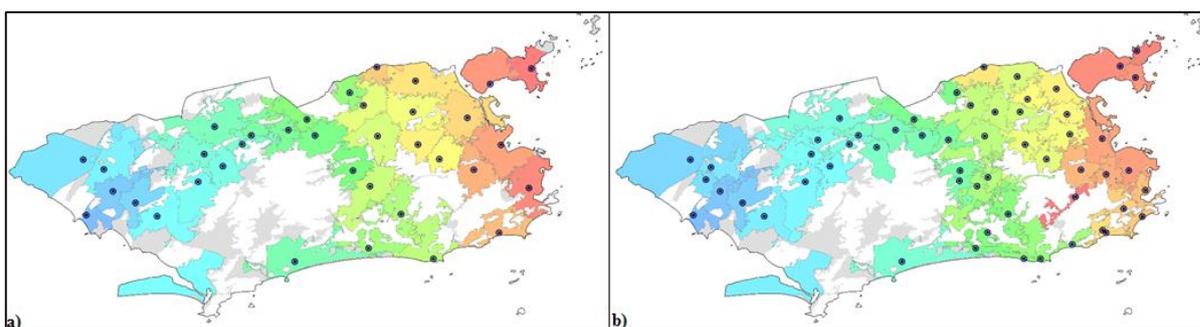


Figura 7: Áreas de cobertura do Cenário 3 (a) e do Cenário 8 (b).

Nos Cenários 4 e 9 (500 locais disponíveis), com os resultados apresentados na Figura 8, é possível notar que permanece positivo o incremento da população e do número de ocorrências atendidas, no entanto, os aumentos percentuais passaram a ser menos significativos que nos cenários anteriores. Um exemplo disso é que o Cenário 4 apresenta um aumento de apenas 2,2% da população atendida em relação ao Cenário 3, que contava com a mesma quantidade de bases e veículos utilizados. Já no Cenário 9, apesar dos aumentos de cobertura populacional e de ocorrências também permanecerem pouco relevantes, o número de bases utilizadas saltou para 65, frente às 56 bases utilizadas no Cenário 8. Apesar disso, percebe-se que não houve redução do tempo médio de resposta neste cenário, diferente do comportamento observado no Cenário 4, que reduziu em quase 4% seu tempo de resposta em relação ao Cenário 3.

Os Cenários 5 e 10 (1000 locais disponíveis) apresentam, como esperado, os melhores resultados de cobertura populacional e de ocorrências, ambos superiores à 98%. Apesar de seus percentuais de cobertura serem parecidos, o emprego de recursos ocorre de maneira distinta, já que enquanto o Cenário 5 utiliza apenas 36 bases de despacho, o Cenário 10 seleciona 59 bases para o atendimento da demanda (Figura 9). Contudo, com a maior utilização de recursos, o Cenário 10 apresenta um menor tempo médio de resposta aos chamados, no entanto, a limitação

no número de veículos utilizados (85 veículos) faz com que esse tempo já não sofra tanta variação, permanecendo próximo dos cinco minutos para ambos.

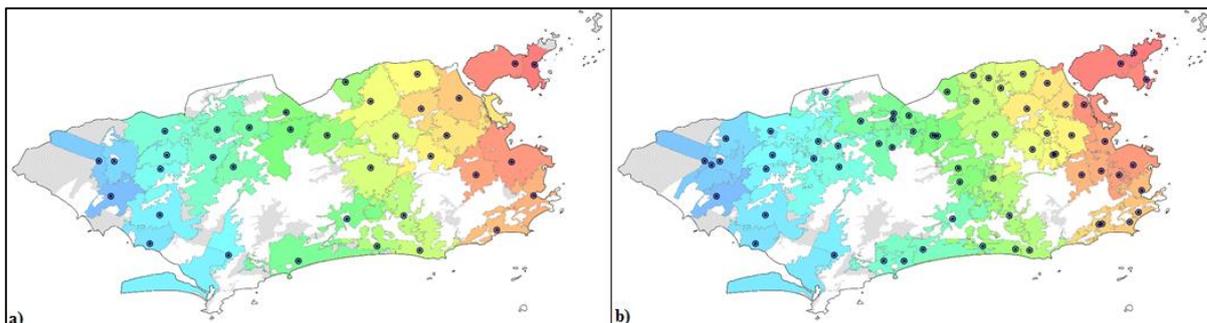


Figura 8: Áreas de cobertura do Cenário 4 (a) e do Cenário 9 (b).

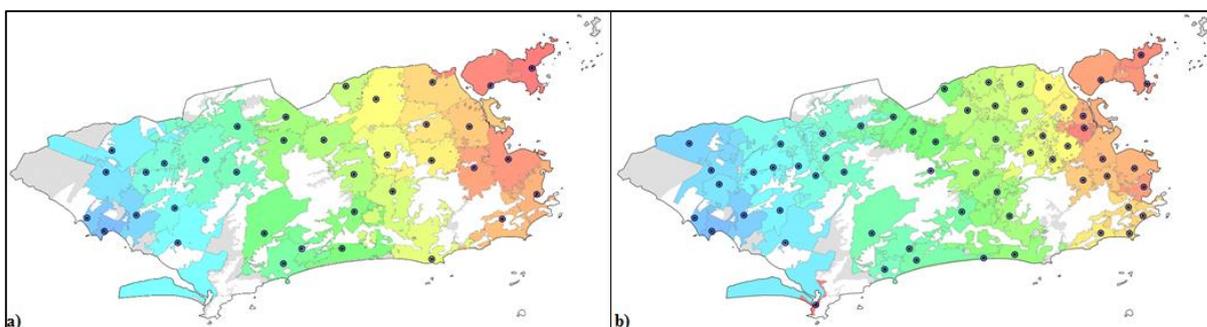


Figura 9: Áreas de cobertura do Cenário 5 (a) e do Cenário 10 (b).

É importante destacar que, para os dois últimos cenários (9 e 10), com o tempo máximo de execução definido (20 horas), os resultados encontrados não ótimos. Sendo assim, apesar dos ganhos observados no percentual de cobertura e tempos de resposta, soluções com menos recursos utilizados podem ser encontradas. Tal fato fica evidente quando os resultados dos Cenários 10 e 9 são comparados onde, o primeiro, ainda com *GAP* residual de 80,19%, mostra possível atendimento semelhante ao Cenário 9 com menos bases selecionadas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi apresentada uma avaliação dos possíveis impactos de um replanejamento das localizações de bases de despacho de veículos de resgate na cobertura e tempo de resposta do atendimento de emergência prestado pelos EMS. Para proposição dos cenários analisados, considerou-se o modelo matemático proposto por Ferrari *et al.* (2018) e sua aplicação com dados reais do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro.

Mediante aprofundamento teórico e, especialmente, a comparação de cenários, tornou-se possível responder algumas questões levantadas por este trabalho. A primeira delas aponta que a disposição das bases, aliada à distribuição dos veículos, são capazes de impactar significativamente no atendimento da população. Acredita-se que, quando a distribuição das bases ocorre de maneira mais próxima à distribuição populacional do município, o percentual de cobertura tende a ser maior, já que a maximização da população se mostra como objetivo mais relevante na função objetivo do modelo utilizado.

Quanto à utilização de um número maior de bases de despacho, nota-se que, apesar do aumento

verificado nos cenários em que tal fato ocorre, os ganhos acumulados são pouco relevantes quando se considera a quantidade de recursos que precisam ser empregados. Tal afirmação fica clara com a análise dos experimentos que apresentaram os melhores resultados (em termos de cobertura) e contemplam a abertura de um grande número de bases (mais de 50 bases abertas). No entanto, observou-se também que é possível obter resultados bastante satisfatórios com a abertura de 36 bases de despacho (mesma quantidade do cenário real atual). Um exemplo disso é que, enquanto no Cenário 9 a abertura de 65 bases reflete na cobertura de 98,3% da população, no Cenário 4, 97,7% da população do município é atendida com a abertura de 36 bases. Com isso, percebe-se que 29 bases adicionais seriam empregadas para cobrir pouco mais de 39 mil pessoas.

Contudo, o estudo mostrou que, quanto maior o número de bases selecionadas para utilização, menor o tempo médio de resposta nos cenários analisados. Este resultado pode ser observado ao comparar os pares de cenários correspondentes (Cenários 1-6, 2-7, 3-8, 4-9 e 5-10), onde os Cenários 1 a 5, que apresentam limitação no número de abertura de bases, possuem maiores tempos médios de resposta do que seus equivalentes Cenários 6 a 10, os quais podem selecionar para abertura quantas bases forem necessárias.

De maneira geral, no que se refere aos recursos computacionais, observa-se dois grandes saltos no tempo de processamento. O primeiro deles entre os Cenários 4 e 5, onde o Cenário 4 alcança o resultado ótimo em pouco mais de 36 minutos, enquanto o Cenário 5 precisa de mais de seis horas para tanto. O segundo salto é observado a partir do Cenário 8, que leva menos de 25 minutos para atingir o resultado ótimo, enquanto os cenários seguintes atingem o tempo limite de processamento (20 horas) sem obtê-lo.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se que seja realizado um estudo para definição de um procedimento preliminar para geração de pontos candidatos de forma não-aleatória. Acredita-se que, como os resultados do modelo indicam a existência de limitação computacional para obtenção de soluções ótimas de instâncias com quantidade superior a 1000 pontos candidatos, a aplicabilidade desse procedimento pode representar ganhos significativos nos resultados obtidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro na elaboração deste trabalho. Agradecem, ainda, ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro pela disponibilidade da base de dados utilizada na pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi-Javid, A.; Seyedi, P.; e Syam, S. S. (2017) A survey of healthcare facility location. *Computers & Operations Research*, v. 79, p. 223-263.
- Alsalloum, O. I. e Rand, G. K. (2006) Extensions to emergency vehicle location models. *Computer & Operations Research*, v. 33, p. 2725-2743.
- Aringhieri, R.; Bruni, M. E.; Khodaparastí, S.; e Van Essen, J. T. (2017) Emergency medical services and beyond: Addressing new challenges through a wide literature review. *Computers & Operations Research*, v. 78, p. 349-368.
- Bélanger, V.; Kergosien, Y.; Ruiz, A.; Soriano, P. (2016) An empirical comparison of relocation strategies in real-time ambulance fleet management. *Computers & Industrial Engineering*, v. 94, p. 216-229.
- Brotcorne, L.; Laporte, G.; Semet, F. (2003) Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, v. 147, p. 451-463.
- Caliper. (2008) *TransCAD - Transportation Workstation Software*, Versão 5.0. Caliper Corporation, Newton, USA.
- Chung, C.; Schilling, D.; Carbone, R. (1983) The capacitated maximal covering problem: a heuristic. *Anais do Proceedings of the Fourteenth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation*, Pittsburgh, p. 1423-1428.
- Church, R. e ReVelle, C. (1974) The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, v. 32, n. 1, p. 101-118.
- Current, J. e Storbeck, J. (1988) Capacitated covering models. *Environment and Planning B: Planning and Design*,

v. 15, p. 153-164.

- Daskin, M. S. (1983) A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution. *Transportation science*, v. 17, n. 1, p. 48-70.
- Dibene, J. C.; Maldonado, Y.; Vera, C.; de Oliveira, M.; Trujillo, L.; e Schütze, O. (2017) Optimizing the location of ambulances in Tijuana, Mexico. *Computers in biology and medicine*, v. 80, p. 107-115.
- Ferrari, T.; Camara, M. V. O.; Nassi, C. D.; Ribeiro, G. M.; Costa Junior, R. R.; Ribeiro Junior, C.; Bilate, A. (2018) Analysis of the location of rescue ambulance dispatch bases: a case study in Rio de Janeiro, Brazil. *Geographical Analysis*.
- Haghani, A. (1996) Capacitated maximum covering location models: formulations and solution procedures. *Journal of Advanced Transportation*, v. 30, n. 3, p. 101-136.
- Harewood, S. I. (2002) Emergency ambulance deployment in Barbados: a multi-objective approach. *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, n. 2, p. 185-192.
- IBM (2017). Ilog CPLEX Optimization Studio, Version 12.7. IBM Corporation, Armonk, USA.
- Ingolfsson, A. (2013) EMS planning and management. In *Operations Research and Health Care Policy* (p. 105-128). Springer, New York, NY.
- Jagtenberg, C. J.; van den Berg, P. L.; e van der Mei, R. D. (2017) Benchmarking online dispatch algorithms for Emergency Medical Services. *European Journal of Operational Research*, v. 258, n. 2, p. 715-725.
- KC, K.; Corcoran, J.; e Chhetri, P. (2018) Spatial optimisation of fire service coverage: a case study of Brisbane, Australia. *Geographical Research*, v. 56, n. 3, p. 270-284.
- Kergosien, Y.; Bélanger, V.; Soriano, P.; Gendreau, M.; Ruiz, A. (2015) A generic and flexible simulation-based analysis tool for EMS management. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 24, p. 7299-7316.
- Knight, V. A.; Harper, P. R.; Smith, L. (2012) Ambulance allocation for maximal survival with heterogeneous outcome measures. *Omega*, v. 40, p. 918-926.
- Leknes, H.; Aartun, E. S.; Andersson, H.; Christiansen, M.; e Granberg, T. A. (2017) Strategic ambulance location for heterogeneous regions. *European Journal of Operational Research*, v. 260, n. 1, p. 122-133.
- Liu, M.; Yang, D.; e Hao, F. (2017) Optimization for the Locations of Ambulances under Two-Stage Life Rescue in the Emergency Medical Service: A Case Study in Shanghai, China. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Maleki, M.; Majlesinasab, N.; Sepehri, M. M. (2014) Two new models for redeployment of ambulances. *Computers & Industrial Engineering*, v. 78, p. 271-284.
- Marín, A. (2011) The discrete facility location problem with balanced allocation of costumers. *European Journal of Operational Research*, v. 210, p. 27-38.
- McCormack, R.; e Coates, G. (2015) A simulation model to enable the optimization of ambulance fleet allocation and base station location for increased patient survival. *European Journal of Operational Research*, v. 247, n. 1, p. 294-309.
- Moeini, M.; Jemai, Z.; e Sahin, E. (2015) Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, v. 23, n. 3, p. 641-658.
- Nichol, G.; Thomas, E.; Callaway, C. W.; Hedges, J.; Powell, J. L.; Aufderheide, T. P.; Rea, T.; Lowe, R.; Brown, T.; Dreyer, J.; Davis, D.; Idris, A.; e Stiell, I. (2008) Regional variation in out-of-hospital cardiac arrest incidence and outcome. *Jama*, v. 300, n. 12, p. 1423-1431.
- Nickel, S.; Reuter-Oppermann, M.; e Saldanha-da-Gama, F. (2016) Ambulance location under stochastic demand: A sampling approach. *Operations Research for Health Care*, v. 8, p. 24-32.
- ReVelle, C. S.; Eiselt, H. A.; Daskin, M. S. (2008) A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, v. 184, p. 817-848.
- Schmid, V. (2012) Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, v. 219, n. 3, p. 611-621.
- Shahriari, M.; Bozorgi-Amiri, A.; Tavakoli, S.; e Yousefi-Babadi, A. (2017) Bi-objective approach for placing ground and air ambulance base and helipad locations in order to optimize EMS response. *The American journal of emergency medicine*, v. 35, n. 12, p. 1873-1881.
- Su, Q.; Luo, Q.; Huang, S. H. (2015) Cost-effective analyses for emergency medical services deployment: a case study in Shanghai. *International Journal of Production Economics*, v. 163, p. 112-123.
- Toregas, C.; Swain, R.; ReVelle, C.; e Bergman, L. (1971) The location of emergency service facilities. *Operations research*, v. 19, n. 6, p. 1363-1373.
- Ünlüyurt, T.; e Tunçer, Y. (2016) Estimating the performance of emergency medical service location models via discrete event simulation. *Computers & Industrial Engineering*, v. 102, p. 467-475.
- Yin, P. e Mu, L. (2012) Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles. *Applied Geography*, v. 34, p. 247-254.
- Zaffar, M. A.; Rajagopalan, H. K.; Saydam, C.; Mayorga, M.; e Sharer, E. (2016) Coverage, survivability or response time: A comparative study of performance statistics used in ambulance location models via simulation-optimization. *Operations research for health care*, v. 11, p. 1-12.