

## **Análise da localização de mamógrafos em Minas Gerais**

**Patrick Moreira Rosa, Manoel Victor Stilpen Moreira de Sá, Jéssica Natália Miranda Paiva,  
Puca Huachi Vaz Penna, Marcone Jamilson Freitas Souza**

Departamento de Computação – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, CEP 35.400-000, Ouro Preto (MG), Brasil  
{patrick.moreira, manoel.stilpen,  
jessica.paiva}@aluno.ufop.edu.br, {puca, marcone}@ufop.edu.br

### **RESUMO**

Este trabalho sintetiza o relatório de iniciação científica relativa ao estudo do Problema de Localização de Mamógrafos em Minas Gerais, Brasil. Neste problema, há um conjunto de localidades que demandam exames de mamografia e uma quantidade limitada de mamógrafos para atendê-las. O objetivo é decidir aonde instalar os aparelhos para que a cobertura de exames seja máxima. Para tratá-lo, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira e um algoritmo baseado em *Variable Neighborhood Search*. Para testar esses métodos, realizamos três experimentos. Inicialmente, comparamos as soluções apresentadas pelos métodos exato e heurístico. Posteriormente, analisamos as soluções do modelo matemático, com e sem restrições de microrregião de saúde. Finalmente, analisamos a aquisição gradativa de equipamentos para atingir a maior quantidade possível de exames. Os resultados mostraram que é possível uma distribuição mais racional de equipamentos e que a atual divisão das localidades em microrregiões não é a ideal.

**PALAVRAS CHAVE.** Localização de mamógrafos, Localização de facilidades, Aplicações de pesquisa operacional.

**Tópicos:** PO na Área de Saúde, Meta-heurísticas

### **ABSTRACT**

This work summarizes the scientific initiation report on the study of the Mammography Unit Location Problem of the Minas Gerais, Brazil. In this problem, there is a set of cities that demand mammography screenings and a limited number of mammography units to serve them. The goal is to decide where to install mammography units to maximize the coverage for screenings. We developed an integer linear programming model and a Variable Neighborhood Search based algorithm for treating it. We realized three experiments to test these solution methods. First, we compared the solutions presented by the exact and heuristic methods. Posteriorly, we compared the mathematical model solutions with and without restrictions of health microregion. Lastly, we analyze the gradual acquisition of equipment to achieve as many screenings as possible. The results showed that a more rational distribution of equipment is possible and that cities' current division in microregions is not ideal.

**KEYWORDS.** Mammography Unit Location, Facility Location, Operations Research Applications.

**Paper topics:** OR in Health Area, Metaheuristics

## 1. Introdução

Entre as mulheres, o câncer de mama é o mais frequentemente diagnosticado e a principal causa de morte por câncer [Bray et al., 2018]. Apenas no Brasil, este tipo de câncer levou 17572 mulheres ao óbito em 2018, o que representa 3,02% das mortes de mulheres [INCA, 2018].

O rastreamento do câncer de mama por meio do exame de mamografia é o principal meio de detecção precoce desta doença [Xavier et al., 2016]. Em seus estudos, Witten e Parker [2018] destacam que o descobrimento precoce da neoplasia por meio do rastreamento foi capaz de reduzir a taxa de mortalidade de câncer de mama em pelo menos 30%. Ainda segundo esses autores, quando o câncer é diagnosticado nos estágios iniciais, a taxa de sobrevivência pode ser maior que 95%.

No Brasil, o Ministério da Saúde (MS) orienta que as mulheres de 50 a 69 anos devem realizar a mamografia bianualmente [Brasil, 2017]. Além disso, estima-se que, por indicação diagnóstica, 8,9% delas precisam realizar o exame anualmente, totalizando 58,9% das mulheres nessa faixa etária. Estima-se, também, que 20% das mulheres entre 40 e 49 devem realizar o exame anualmente, sendo 10% por indicação diagnóstica e 10% por outras indicações.

Amaral et al. [2017] avaliaram a rede de oferta de mamógrafos no Brasil. Desconsiderando a questão geográfica dos mamógrafos, eles observaram que havia um excesso de 147,9% de oferta desses equipamentos no Brasil na época do estudo. Porém, quando foram analisados somente os mamógrafos à disposição do Sistema Único de Saúde (SUS), esse excesso é de 11,1%. Eles estudaram também o atendimento à restrição de distância máxima de 60 km entre pacientes e equipamentos, imposta pelo MS. Considerando essa restrição e os mamógrafos disponíveis pelo SUS, há um grande desequilíbrio: algumas regiões têm excesso de oferta e outras, excesso de demanda. Assim, eles concluem que há necessidade de buscar um maior equilíbrio na distribuição espacial dos equipamentos do SUS, visando a um acesso igualitário à saúde de todos os cidadãos.

Visando a contribuir nessa temática, o presente artigo trata o Problema de Localização de Mamógrafos (PLM) no Brasil. Neste trabalho, faz-se um resumo das atividades exclusivas de iniciação científica iniciadas em agosto de 2018 e ainda em curso na Universidade Federal de Ouro Preto. Inicialmente, propomos um modelo de programação linear inteira para o PLM, formulado como um Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC) [Church e ReVelle, 1974], com restrições adicionais. Este último problema é NP-difícil [Garey e Johnson, 1979], o que justifica o desenvolvimento de métodos heurísticos. Dessa forma, desenvolvemos também um algoritmo baseado na meta-heurística *Variable Neighborhood Search* – VNS [Hansen e Mladenović, 1997] como método alternativo para tratar o PLM. Nesse VNS, exploramos o espaço de soluções por meio de movimentos de realocação de equipamentos. Esse movimento consiste em remover de uma localidade um mamógrafo subutilizado e realocá-lo para uma localidade que permita uma utilização maior desse equipamento. A busca local do VNS utiliza esse movimento com a estratégia *first improvement*. A fase de perturbação do algoritmo consiste em remover todos os mamógrafos e ligações de  $k$  localidades da solução e, em seguida, alocá-los em localidades que não possuam esses equipamentos e tenham infraestrutura para recebê-los.

Testamos os métodos de solução em instâncias relativas ao estado de Minas Gerais, que é a maior da federação brasileira, com 853 localidades. Três experimentos foram analisados. No primeiro, comparamos os resultados do método heurístico com os do exato. No segundo, comparamos os resultados do modelo matemático, com e sem a imposição de vinculação de uma localidade à sua microrregião de saúde. Por fim, analisamos no terceiro experimento a aquisição gradativa de

equipamentos de mamografia, considerando ou não o atendimento à restrição de microrregião de saúde. Essa aquisição foi feita até que não fosse mais possível aumentar a cobertura de exames. Nesse último experimento, o objetivo foi avaliar a quantidade de equipamentos necessários para cobrir o maior número possível de exames.

Como os métodos de solução desenvolvidos estão devidamente descritos em trabalhos já publicados [de Sá et al., 2019; Souza et al., 2019, 2020], apresentamos aqui apenas uma síntese dos resultados alcançados até então relativos à aplicação dos métodos nas instâncias de Minas Gerais.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 descrevemos o PLM. Os resultados dos experimentos são apresentados na Seção 3. Por fim, as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros são exibidos na Seção 4.

## 2. Caracterização do Problema

O PLM aqui tratado possui as seguintes características:

- (a) Existe um conjunto  $N$  de  $n$  localidades candidatas a sediar mamógrafos e um conjunto de  $p$  mamógrafos disponíveis para atender a demanda de exames das mulheres que residem nessas localidades, com  $p < n$ ;
- (b) Cada mamógrafo possui uma capacidade  $cap$  anual de realização de exames;
- (c) Cada localidade  $j$  possui uma demanda anual  $dem_j$  de mulheres na faixa de idade indicada para realizar o rastreamento, ou seja, 58,9% de mulheres com idades entre 50 e 69 anos e 20% de mulheres entre 40 e 49 anos, de acordo com a recomendação atual do Ministério da Saúde do Brasil;
- (d) As mulheres que residem na localidade  $j$  devem se deslocar, no máximo,  $R$  quilômetros (km) até os hospitais onde estão instalados os aparelhos de mamografia. Aqui consideramos que a distância máxima  $R$  deve ser respeitada tanto na ida quanto na volta do atendimento;
- (e) Apenas localidades com infraestrutura hospitalar são candidatas a sediar um equipamento de mamografia. Neste trabalho consideramos que uma localidade é candidata a sediar um equipamento de mamografia se ela tiver, pelo menos, a demanda de  $dem_{Min}$  exames de mulheres na faixa de idade indicada para realizar o exame;
- (f) Uma localidade deve ser totalmente atendida ou não atendida;
- (g) Cada localidade  $i$  só pode ser atendida por outra localidade  $j$  que esteja em sua microrregião de saúde, isto é,  $micro_i = micro_j$ , sendo  $micro_i$  e  $micro_j$  os códigos das microrregiões de saúde das localidades  $i$  e  $j$ , respectivamente.

O objetivo é decidir onde instalar as unidades de mamografia para maximizar a cobertura por exames de mamografia.

## 3. Resultados

O modelo de programação matemática implementado é o publicado em Souza et al. [2020], acrescido das restrições de vinculação de uma localidade à sua respectiva região de saúde. Para resolvê-lo, utilizou-se o *solver* Gurobi, versão 8.0.0, com as configurações padrões, exceto pelo parâmetro  $MIPGap$ , definido com o valor  $10^{-6}$ . Isso foi necessário para adequar a ordem de grandeza dos valores da função objetivo com a execução do modelo. Já o algoritmo heurístico VNS proposto foi implementado na linguagem de programação C++. Os testes foram realizados em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i5-7200U, CPU @2.50GHz×4, com 8 GB de memória RAM sob o sistema operacional Ubuntu, versão 18.04.

Para testar os métodos, foram utilizadas 8 instâncias relativas ao estado de Minas Gerais, sendo que a primeira delas abrange todo o estado e as demais são cenários criados a partir dela. As demandas de cada localidade foram obtidas usando-se dados do censo do IBGE de 2010, projetadas para o ano de 2020. As distâncias entre as cidades foi obtida por meio da API do *Google Maps*, considerando-se deslocamento por carro. Consideramos que um aparelho de mamografia é capaz de realizar 5069 exames anuais [INCA, 2015].

Foram realizados três experimentos: 1) Comparação dos resultados do VNS com os do Gurobi; 2) Comparação de resultados impondo-se ou não as restrições de vinculação de uma localidade à sua microrregião de saúde e 3) Análise da aquisição gradativa de novos equipamentos de mamografia até que se alcance a maior cobertura possível.

Para o primeiro experimento, a ferramenta Irace [López-Ibáñez et al., 2016] foi utilizada para calibragem automática dos parâmetros do algoritmo heurístico VNS.

A Tabela 1 mostra as características das instâncias e os resultados da comparação de desempenho entre o algoritmo VNS e o modelo matemático implementado com o Gurobi, sem considerar a existência de microrregiões de saúde. Na Coluna 1, “Inst.”, é exibido o número da instância. A segunda coluna, “# Locais”, mostra a quantidade total de localidades e a terceira (“# Infr.”), mostra a quantidade de localidades que possuem infraestrutura hospitalar. A quarta coluna (“# Equip.”) exibe a quantidade de mamógrafos disponíveis na instância. As colunas 5, 6 e 7 se referem aos resultados retornados pelo otimizador Gurobi em cada instância e exibem, respectivamente, o *upper bound* (ub) da cobertura de exames, a cobertura efetiva de exames retornada pelo otimizador em no máximo uma hora de execução, bem como o tempo demandado pelo otimizador, em segundos. Por fim, as quatro últimas colunas dizem respeito aos resultados gerados pelo VNS; no caso, a melhor cobertura, a média dos resultados de cobertura de 10 execuções do algoritmo, o desvio padrão desses resultados e o tempo médio de execução, respectivamente. Valores marcados em negrito representam o melhor valor obtido para a instância comparando os dois métodos.

Tabela 1: Resultados Gurobi × VNS

Inst.	# Locais	# Infr.	# Equip.	Gurobi			VNS			
				ub	Melhor	Tempo (s)	Melhor	Média	DP	Tempo (s)
1	853	516	326	1638493	<b>1632455</b>	3600,00	1628758	1627528	925,60	389,80
2	853	516	286	1449734	1448860	3600,00	<b>1449267</b>	1449172	69,63	820,50
3	853	516	247	1252043	1251824	3600,00	<b>1252040</b>	1252037	1,57	2987,10
4	853	516	208	1054352	1054334	3600,00	<b>1054352</b>	1054352	0,00	902,10
5	142	73	55	221140	<b>221140</b>	0,94	<b>221140</b>	221140	0,00	8,00
6	142	73	46	221140	<b>221140</b>	102,17	220811	219906	557,38	5,00
7	142	73	37	187553	187544	3600,00	<b>187550</b>	187548	1,65	62,90
8	142	73	28	141932	<b>141932</b>	2,95	<b>141932</b>	141932	0,00	63,20

De acordo com a Tabela 1, na Instância 1, que representa a instância real do estado de Minas Gerais, nenhum dos dois métodos foi capaz atingir a solução ótima. Contudo, a solução obtida por ambos os métodos é capaz de realizar uma quantidade consideravelmente maior de exames quando comparada com a alocação real do estado, que é de 1151092 exames.

Ao considerarmos a capacidade de atendimentos que os 326 mamógrafos podem realizar,

que é de 1667701 exames, obtivemos nessa instância uma taxa de utilização global desses equipamentos de 97,9% e 97,7% nos métodos exato e heurístico, respectivamente, enquanto que na alocação atual, essa taxa de utilização é de apenas 69%. Tendo em vista que a demanda do estado é de 1727131 exames e a má alocação dos mamógrafos existentes, verifica-se a necessidade de compra de novos aparelhos de mamografia para que a cobertura do estado seja maior.

Considerando o melhor resultado produzido, o VNS foi capaz de alcançar a solução ótima em 3 instâncias (4, 5, 8) e produziu soluções melhores que o Gurobi em outras 4 instâncias (2, 3, 4 e 7). Em relação aos resultados médios, o VNS só não superou o Gurobi em duas instâncias (1 e 6). Além disso, ele requereu um menor tempo de processamento.

Com relação ao segundo experimento, aplicou-se o modelo exato considerando-se dois cenários na instância real do estado (instância 1). No primeiro deles, que impõe a vinculação de uma localidade à sua microrregião de saúde, obteve-se uma cobertura de 1587792 exames; enquanto que no segundo cenário, em que não se impõe tal restrição, obteve-se uma cobertura de 1633358 exames. Com base nesses resultados, percebe-se que ao adicionar a restrição de que uma localidade só pode atender outras localidades se, e somente se, elas pertencerem à mesma microrregião de saúde, tem-se uma cobertura de quase 50000 exames a menos em relação ao cenário menos restritivo. Isso é um indício de que a divisão atualmente existente por microrregião de saúde em Minas Gerais pode não ser a ideal.

As Figuras 1 e 2 mostram parte da alocação obtida pela aplicação do modelo nos dois cenários em uma mesma região do Estado de Minas Gerais nesse segundo experimento. A Figura 1 mostra o resultado da aplicação da formulação proposta impondo-se as restrições de vinculação às regiões de saúde. A Figura 2, por sua vez, mostra o resultado da aplicação da formulação não se impondo essa limitação. As localidades marcadas com o círculo vermelho à esquerda de cada figura representam aquelas que receberam mamógrafos, e as arestas azuis mostram as ligações de atendimento dessas localidades. Por outro lado, as localidades marcadas com o círculo vermelho à direita de cada figura representam aquelas que ficaram sem atendimento.

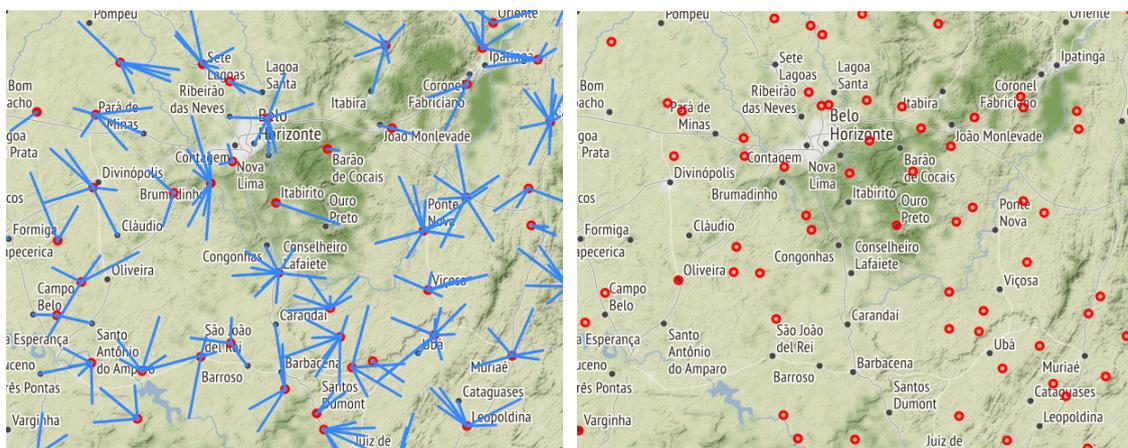
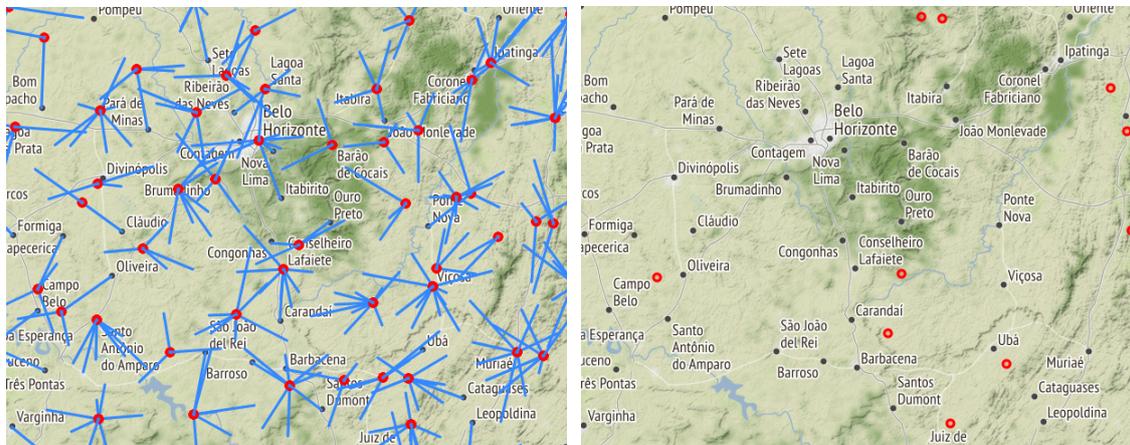


Figura 1: Exemplo de alocação **com** microrregiões de saúde



(a) Localidades **com** atendimento

(b) Localidades **sem** atendimento

Figura 2: Exemplo de alocação **sem** microrregiões de saúde

Analisando-se essas figuras, é possível notar claramente a diferença de cobertura pela densidade de arestas nas imagens. Isso ocorreu porque na formulação de Souza et al. [2020] permite-se que uma localidade vincule-se a qualquer outra que esteja em um raio de  $R$  km, enquanto na formulação deste trabalho cada localidade só pode vincular-se a outra que esteja na mesma microrregião de saúde, e no mesmo raio de cobertura.

Por fim, apresentamos a seguir, os resultados do terceiro experimento. Nesse experimento analisamos cenários de aquisição gradativa de equipamentos de mamografia até que não seja mais possível aumentar a demanda por exames. Cada cenário consiste em realizar uma execução do modelo matemático somando-se aos 326 mamógrafos existentes, quantidades gradativas de equipamentos, começando-se de uma unidade. Dessa forma, é possível obter a quantidade de mamógrafos necessária para que haja a maior cobertura possível.

A Figura 3 ilustra a cobertura de exames nos dois cenários ao adquirir novos aparelhos. Nessa figura, o eixo horizontal representa a quantidade de mamógrafos adquiridos e o eixo vertical,

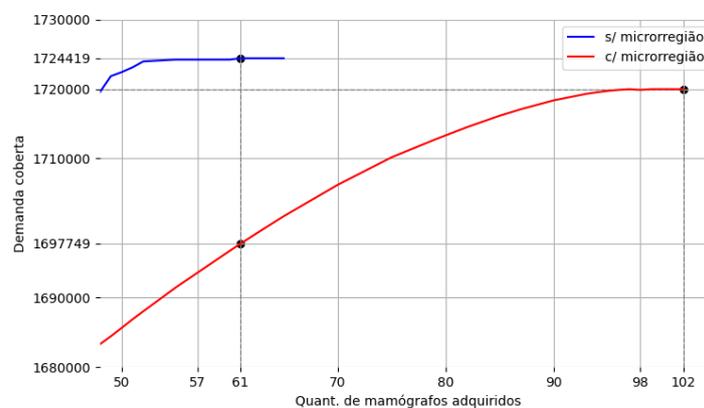


Figura 3: Crescimento de atendimento ao adquirir novos aparelhos

a demanda coberta. A linha na cor azul representa o resultado do modelo sem restrição de microrregião e a linha na cor vermelha, o resultado com essa restrição. Uma região plana na figura indica que não há acréscimo de cobertura com a adição de mais equipamentos.

Como pode ser observado na Figura 3, com uma mesma quantidade adicional de mamógrafos o modelo sem a restrição de vinculação de uma localidade a uma microrregião consegue atender a uma demanda muito maior de exames. Enquanto 61 equipamentos a mais são necessários para realizar 1724419 exames no cenário sem restrição de microrregião com uma taxa de utilização de 87,9%, são exigidos 97 mamógrafos a mais no cenário com restrição de microrregião para realizar 1719977 exames com uma taxa de utilização de 80,2%.

#### 4. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo relatar o trabalho de iniciação científica relativa ao PLM. Para resolvê-lo, foi proposto um modelo de programação linear inteira e um algoritmo baseado na meta-heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS).

Para testar os métodos propostos, foram utilizadas 8 instâncias relativas ao Estado de Minas Gerais e realizados três experimentos. No primeiro deles, verificou-se a capacidade do método heurístico em obter soluções de boa qualidade rapidamente. No segundo experimento, utilizou-se apenas o modelo matemático para comparar o resultado da cobertura de exames considerando dois cenários: com e sem as restrições de microrregião de saúde. Pelos resultados encontrados, pode-se verificar que o modelo sem a restrição de microrregião de saúde possibilita uma cobertura maior de atendimentos. Isso se deve ao fato de que o conjunto de soluções viáveis no primeiro cenário é menor do que no segundo cenário, que permite a livre ligação de uma localidade a outra, mesmo que não esteja na sua microrregião de saúde.

No terceiro experimento analisou-se a aquisição gradativa de novos mamógrafos somados aos 326 equipamentos atualmente disponíveis no SUS para verificar qual seria a maior cobertura possível. Os resultados mostraram que no modelo sem microrregião de saúde foram necessários 61 equipamentos a mais para atender a 1724419 exames, que correspondem a 99,82% de toda a demanda de Minas Gerais, com uma taxa de utilização de 87,9% dos equipamentos. Por outro lado, no modelo com microrregião, esse número aumentou para 97 equipamentos a mais para uma cobertura máxima de 1719977 exames, que representa 99,57% da demanda total do estado, com uma taxa de utilização de 80,2%. Também é possível verificar que à medida que o número de mamógrafos aumenta, a taxa de utilização destes cai nos dois cenários analisados, conforme esperado. Isso indica que esse procedimento de adquirir mamógrafos até suprir toda a demanda é ineficiente, na medida em que não se aproveita toda a capacidade de atendimento dos mamógrafos. Além disso, mesmo com a aquisição de novos equipamentos, não foi possível obter 100% de cobertura do estado. Isso ocorreu devido ao fato de existirem localidades sem infraestrutura hospitalar para sediar mamógrafos ou que estejam localizadas em regiões muito distantes dos centros hospitalares. Assim, é necessário avaliar alternativas para garantir o acesso ao exame de mulheres que residem nessas localidades mais afastadas e/ou com pouca demanda. Dessa forma, como trabalhos futuros já em andamento, pretende-se roteirizar unidades móveis de mamografia para atender a essas localidades e, assim, aumentar a cobertura do Estado.

#### Agradecimentos

Os três primeiros autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto pelas bolsas institucionais de iniciação científica. Os dois últimos autores agradem ao CNPq (processos

428817/2018-1 e 303266/2019-8), FAPEMIG (processo PPM-CEX 676/17), CAPES e à Universidade Federal de Ouro Preto pelo apoio ao desenvolvimento da presente pesquisa.

### Bibliografia

- Amaral, P., Luz, L., Cardoso, F., e Freitas, R. (2017). Distribuição espacial de equipamentos de mamografia no Brasil. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 19(2):326–341.
- Brasil (2017). Critérios e parâmetros assistenciais para o planejamento e programação de ações e serviços de saúde no âmbito do Sistema Único de Saúde. Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Regulação, Avaliação e Controle de Sistemas. Disponível em <https://bit.ly/2t6WvjG>. Acessado em 06/04/2020.
- Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., e Jemal, A. (2018). Global cancer statistics 2018: Globocan estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, 68(6):394–424.
- Church, R. e ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in regional science*, 32(1):101–118.
- de Sá, M. V. S. M., Rosa, P. M., Paiva, J. N. M., Penna, P. H., e Souza, M. J. F. (2019). Localização de mamógrafos: um estudo de caso do estado do Espírito Santo. In *XXVI Simpósio Brasileiro de Engenharia de Produção*, Bauru. Disponível em <https://rb.gy/wfafbg>. Acessado em 06/04/2020.
- Garey, M. R. e Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., New York.
- Hansen, P. e Mladenović, N. (1997). Variable neighborhood search for the p-median. *Location Science*, 5(4):207–226.
- INCA (2015). Revisão do parâmetro para cálculo da capacidade de produção de um mamógrafo simples. Disponível em <https://bit.ly/2ZrgvJU>. Acessado em 06/04/2020.
- INCA (2018). Atlas on-line de mortalidade. Disponível em <https://rb.gy/urodwe>. Acessado em 23/04/2020.
- López-Ibáñez, M., Dubois-Lacoste, J., Cáceres, L. P., Birattari, M., e Stützle, T. (2016). The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration. *Operations Research Perspectives*, 3:43–58.
- Souza, M. J. F., Penna, P. H. V., Stilpen, M., Rosa, P. M., Monteiro, J. C., e Lisboa, M. R. (2019). Localização de mamógrafos: formulações e estudo preliminar de caso de Rondônia. In *LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, volume 2, Limeira. Galoá: Campinas. Disponível em <https://bit.ly/39sozia>. Acessado em 06/04/2020.
- Souza, M. J. F., Penna, P. H. V., Moreira de Sá, M. V. S., e Rosa, P. M. (2020). A vns-based algorithm for the mammography unit location problem. In Benmansour, R., Sifaleras, A., e Mladenović, N., (eds), *Variable Neighborhood Search: 7th International Conference, ICVNS 2019, Rabat, Morocco, October 3–5, 2019, Revised Selected Papers*, volume 12010 of *Lecture Notes in Computer Science*, chapter 3, p. 37–52. Springer, Cham, Switzerland.
- Witten, M. e Parker, C. C. (2018). Screening mammography recommendations and controversies. *Surgical Clinics of North America*, 98(4):667–675.
- Xavier, D. R., de Oliveira, R. A. D., de Matos, V. P., Viacava, F., e de Campos Carvalho, C. (2016). Cobertura de mamografias, alocação e uso de equipamentos nas regiões de saúde. *Saúde em Debate*, 40(110):20–35.