

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**Localização de equipamentos de mamografia no Brasil: avaliação
da rede de oferta e estudo de propostas para novos investimentos**

Coordenador: **Marcone Jamilson Freitas Souza**

OURO PRETO

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP

Relatório Final do Projeto CNPq, processo 428817/2018-1

Título do projeto de pesquisa:

Localização de equipamentos de mamografia no Brasil: avaliação da rede de oferta e estudo de propostas para novos investimentos

RESUMO

Este documento apresenta o relatório final do projeto de pesquisa aprovado pelo CNPq por meio do processo 428817/2018-1, com vigência no período 18 de fevereiro de 2019 a 31 de dezembro de 2022.

Palavras-chave:

Localização de Mamógrafos, Localização de Facilidades, Programação Linear Inteira Mista, Otimização Multiobjetivo, Roteamento de Veículos, Metaheurísticas.

SUMÁRIO

RESUMO	i
1 Dados do proponente e equipe	4
2 Resumo das atividades desenvolvidas	5
3 Introdução	8
4 Formulação de referência	9
5 Formulações para análise da má distribuição de equipamentos	11
5.1 Formulação do Cenário 1	11
5.2 Formulação do Cenário 2	11
6 Formulação para a proposta de novos investimentos	11
7 Resultados	12
7.1 Estimativa da configuração existente	12
7.2 Configuração existente x configurações dos cenários 1 e 2	13
7.3 Resultados da proposta para novos investimentos	15
7.4 Comparação gráfica entre a configuração existente e a proposta	17

1 Dados do proponente e equipe

A equipe do projeto é composta pelos seguintes pesquisadores professores:

1. Marcone Jamilson Freitas Souza (**coordenador**):

- Titulação: Doutor
- Cargo: Professor Emérito do Departamento de Computação da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), professor do quadro permanente dos programas de pós-graduação em Ciência da Computação da UFOP, Instrumentação, Controle e Automação de Processos em Mineração da UFOP/ITV e Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG.
- Bolsista de produtividade em pesquisa (PQ-1D) em Engenharia de Produção e Transportes
- Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6078945717558464>
- Possui mestrado e doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação pela COPPE/UFRJ. Atua na área de pesquisa operacional, com ênfase no estudo de métodos de solução de problemas de otimização combinatória.

2. Eduardo Camargo de Siqueira:

- Titulação: Doutor
- Cargo: Professor EBTT D III do Instituto Federal de Brasília (IFB), campus São Sebastião.
- Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1383558830607731>
- Possui mestrado e doutorado em Modelagem Matemática e Computacional pelo CEFET-MG. Atua na área de Pesquisa Operacional, com ênfase *machine learning*, inteligência computacional e métodos de solução de problemas de otimização multiobjetivo.

3. Janne Cavalcante Monteiro:

- Titulação: Doutora
- Cargo: Professora Associada do Departamento de Medicina da Universidade Federal de Rondônia (UNIR).
- Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9817693608900183>
- Possui mestrado e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atua na área de Saúde Coletiva, nos processos de trabalho e saúde do trabalhador com ênfase na atenção básica à saúde.

4. Maillene Rodrigues Lisboa

- Titulação: Doutora

- Cargo: Professora Adjunta do Departamento de Medicina da Universidade Federal de Rondônia (UNIR).
- Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3231416721419042>
- Possui doutorado em Ginecologia-Mastologia pela Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP. Especialista em Mastologia pela Sociedade Brasileira de Mastologia - SBM. Coordenadora das disciplinas de Saúde da Mulher. Atua também na área clínica e de diagnóstico e Tratamento das Patologias das Mamas.

5. Maria Amélia Lopes Silva:

- Titulação: Doutora
- Cargo: Professora EBT D IV do Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas da UFV, campus Florestal.
- Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1584173805850799>
- Possui mestrado e doutorado em Modelagem Matemática e Computacional pelo CEFET-MG. Atua na área de Pesquisa Operacional, com ênfase no estudo de métodos de solução, via metaheurísticas, de problemas de otimização combinatória.

6. Puca Huachi Vaz Penna:

- Titulação: Doutor
- Cargo: Professor Adjunto do Departamento de Computação da Universidade Federal de Ouro Preto.
- Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4851300394762688>
- Possui mestrado em Engenharia Mineral pela Universidade Federal de Ouro Preto e doutorado em Ciência da Computação pela Universidade Federal Fluminense. Atua na área de Pesquisa Operacional, com ênfase nos seguintes temas de pesquisa: Roteamento de Veículos, *Iterated Local Search*, Metaheurísticas.

7. Sérgio Ricardo de Souza:

- Titulação: Doutor
- Cargo: Professor Titular do Departamento de Computação do CEFET-MG.
- Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3677015295211434>
- Possui mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP. Atua na área de Pesquisa Operacional, com ênfase no estudo de métodos de solução, via metaheurísticas, de problemas de otimização combinatória.

2 Resumo das atividades desenvolvidas

A Tabela 1 resume a produção alcançada até o presente momento, e a compara com a almejada no projeto. Ressalta-se que nem todas as produções realizadas pela equipe estavam

disponíveis para serem inseridas no formulário específico disponibilizado na plataforma Carlos Chagas para o preenchimento deste relatório técnico-científico.

Tabela 1: Resumo da produção realizada

Item	Produção almejada	Produção realizada	Obs.
Artigos em periódicos	2	2	(1)
Artigos em eventos científicos	6	10	(2)
Dissertações de mestrado	1	2	(3)
Orientações de IC	15	5	(4)
Relatórios de Pesquisa	3	4	(5)
Trabalhos de Conclusão de Curso	0	2	(6)
Capítulo(s) de livro	0	1	(7)
Entrevista(s)	0	2	(8)

- (1) Foram submetidos dois artigos a periódicos: [Paiva et al. \(2023\)](#) e [de Campos et al. \(2023\)](#), o primeiro aceito na Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento (PODEs) e o segundo em análise na Operations Research for Health Care (ORHC).
- (2) Foram produzidos 10 artigos completos em eventos, sendo dois em conferências internacionais e outros oito em conferências nacionais: [Barbosa et al. \(2023\)](#), [de Assis et al. \(2022\)](#), [de Campos et al. \(2022\)](#), [de Campos et al. \(2020\)](#), [Rosa et al. \(2021\)](#), [Rosa et al. \(2020a\)](#), [de Assis et al. \(2021\)](#), [Rosa et al. \(2020b\)](#), [Souza et al. \(2019\)](#) e [Sá et al. \(2019\)](#).
- (3) Foram geradas duas dissertações de mestrado, [de Campos \(2020\)](#) e [Rosa \(2021a\)](#), sendo a primeira no programa de pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG e a segunda no de Ciência da Computação da UFOP. O projeto ainda conta com quatro orientações em andamento, sendo duas de mestrado (Romário dos Santos Lopes de Assis, lattes: <https://lattes.cnpq.br/0327627715414522>, orientado pelo coordenador deste projeto e pelos professores Eduardo Camargo de Siqueira e Maria Amélia Lopes Silva, e Thiago Giacheto de Araujo, lattes <http://lattes.cnpq.br/9757230134258792>, orientado pelo Professor Puca Huachi Vaz Penna e coorientado pelo coordenador deste projeto) e duas de doutorado (Marcos Vinícius Andrade de Campos, lattes: <http://lattes.cnpq.br/2103966273210204>, orientado pelo coordenador deste projeto e coorientado pelo Professor Sérgio Ricardo de Souza, e Rudivan Paixão Barbosa, lattes: <http://lattes.cnpq.br/0472632660041371>, orientado pelo coordenador deste projeto e coorientado pelo Professor Gilberto Miranda Júnior);
- (4) A quantidade de orientações almejada no projeto aprovado (15) não pôde ser cumprida pelas justificativas apresentadas a seguir. O CNPq aprovou o projeto, mas eliminou o financiamento de recursos humanos para o seu desenvolvimento. Desta forma, o projeto foi desenvolvido sem três dos bolsistas solicitados em cada um dos três anos previstos para o desenvolvimento do projeto. Por outro lado, no mesmo período, a FAPEMIG também deixou de financiar projetos de iniciação científica no Estado de Minas Gerais, o que reduziu sensivelmente o número de alunos de IC trabalhando no projeto. Em contrapartida,

foi gerada uma dissertação a mais do que a prometida e o projeto ainda conta com mais dois mestrandos e um doutorando em formação, conforme relatado no item anterior. Os seguintes alunos concluíram projetos de IC no período de vigência do projeto:

- (a) Manoel Victor Stilpen Moreira de Sá. Estudo do Problema de Localização de Mamógrafos na rede pública de saúde de Minas Gerais. 2019. Iniciação Científica. (Graduado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Marcone Jamilson Freitas Souza.
 - (b) Patrick Moreira Rosa. Heurísticas para o problema de localização de mamógrafos na rede pública de saúde de Minas Gerais. 2019. Iniciação Científica. (Graduado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto. Orientador: Marcone Jamilson Freitas Souza.
 - (c) Manoel Victor Stilpen Moreira de Sá. Formulações de programação matemática para localização de equipamentos de mamografia em Minas Gerais: avaliação da rede de oferta e estudo de propostas para novos investimentos. 2020. Iniciação Científica. (Graduado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Puca Huachi Vaz Penna. Coorientador: Marcone Jamilson Freitas Souza.
 - (d) Patrick Moreira Rosa. Roteamento de carretas de mamografia em Minas Gerais. 2020. Iniciação Científica. (Graduado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Ouro Preto. Orientador: Puca Huachi Vaz Penna. Coorientador: Marcone Jamilson Freitas Souza.
 - (e) Jéssica Natália Miranda Paiva. Roteamento de unidades móveis de mamografia. 2022. Iniciação Científica (Graduanda em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Ouro Preto. Orientador: Puca Huachi Vaz Penna. Coorientador: Marcone Jamilson Freitas Souza.
- (5) Foram gerados quatro relatórios de pesquisa, os quais estão abaixo listados:
- (a) 2023: Localização de equipamentos de mamografia no Brasil: avaliação da rede de oferta e estudo de propostas para novos investimentos. Relatório Técnico-Científico Final, <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/projects/CNPq-428817-1/RelatorioTecnicoFinal-CNPq-428817-1.pdf>;
 - (b) 2021: Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia em Minas Gerais, <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/projects/MULP/MMURP-RelatorioTecnico-PIP-2020-2021.pdf>;
 - (c) 2019: Estudo do problema de localização de mamógrafos na rede pública de saúde de Minas Gerais, <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Publicacoes/PROPP2019-RelatorioTecnicoMamografos-PIBITI.pdf> e

- (d) 2019: Heurísticas para o problema de localização de mamógrafos na rede pública de saúde de Minas Gerais, <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Publicacoes/PROPP2019-RelatorioTecnicoMamografos-PIP.pdf>.
- (6) Foram gerados dois trabalhos de conclusão de curso em Ciência da Computação no período, a saber: [de Sá \(2019\)](#) e [Rosa \(2021b\)](#).
- (7) Foi gerado um capítulo de livro, resultado da apresentação do trabalho [Souza et al. \(2020\)](#) na *7th International Conference on Variable Neighborhood Search*, realizada em Rabat, Marrocos, de 3 a 5 de outubro de 2019.
- (8) Para a divulgação social do projeto, foram dadas duas entrevistas. A primeira foi publicada na edição 80, páginas 44-46, da revista Minas Ciência (ISSN 1809-1881) sob o título “Prevenção otimizada”, disponível em <https://drive.google.com/file/d/11JC7G8ZXuXAdAv1MsbEZd60rWzFSXijk/view> e <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/projects/CNPq-428817-1/MFC-80-V3.pdf>. A segunda foi tema de uma reportagem publicada no site do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) após a defesa de dissertação de [de Campos \(2020\)](#). Nessa matéria foi destacado que o trabalho apontou o número de mamógrafos ideal para cada localidade de Minas Gerais, além de uma análise da aquisição de novos equipamentos. A reportagem relacionou o trabalho à temática do “Outubro Rosa” e está disponível em <https://www.ifmg.edu.br/portal/noticias/pesquisa-de-servidor-do-ifmg-aborda-distribuicao-de-mamografos-em-minas/>.

3 Introdução

Ao longo do projeto, foram desenvolvidas várias formulações de programação matemática para representar o problema. Cada uma delas mostra uma pequena variação do problema considerado. A formulação mais comumente encontrada na literatura para a localização e designação de equipamentos assume variáveis inteiras e binárias. No entanto, como mostrado em diversos trabalhos publicados pela equipe, iniciada em [Souza et al. \(2019\)](#), há ganho de produtividade na utilização dos equipamentos admitindo-se que a demanda por exames de mamografia da população alvo de uma cidade seja parcialmente atendida. Essa formulação é mais adequada ao problema tratado, dado que as cidades são organizadas em regiões de saúde. Então, nada mais natural que o equipamento seja compartilhado pelas cidades da região. Essa formulação, doravante denominada “formulação de referência” é apresentada na Seção 4.

Na Seção 5 são feitas alterações na formulação de referência para mostrar a má distribuição de equipamentos de mamografia no Brasil, fato já relatado em diversos outros estudos, como em [Amaral et al. \(2017\)](#), [Miranda & Patrocinio \(2018\)](#) e [Rodrigues et al. \(2019\)](#).

Na Seção 6 introduz-se um conjunto de restrições à formulação de referência para mostrar um cenário de aquisição de equipamentos mantendo-se a configuração existente de equipamentos em cada cidade. O objetivo dessa seção é mensurar o número máximo de

equipamentos a serem adquiridos para maximizar a cobertura de exames da população alvo em todas as unidades da federação brasileira.

A Seção 7 reporta os resultados obtidos com as formulações que analisam a má distribuição de equipamentos e a que propõe a aquisição de equipamentos para atender a demanda da população alvo. Os resultados deste estudo serão submetidos a publicação em um periódico especializado.

Dos estudos realizados pela equipe do projeto e já publicados e/ou submetidos a publicação, destacam-se os seguintes:

1. [Paiva et al. \(2023\)](#): Trabalho que faz um estudo de caso para o Estado de Rondônia. Apresenta-se uma proposta para novos investimentos em Rondônia levando-se em consideração as peculiaridades do Estado;
2. [de Campos et al. \(2023\)](#): Trabalho que apresenta uma formulação de programação multiobjetivo não-linear inteira mista e algoritmos evolucionários, baseados em NSGA-II e SPEA2, que visam à minimização de três objetivos: demanda descoberta, distância ponderada pelo número de usuários e inequidade de acesso aos exames. O trabalho faz um estudo de caso para todas as unidades federativas;
3. [Rosa \(2021b\)](#), [Rosa \(2021a\)](#) e [Rosa et al. \(2021\)](#): Trabalhos que analisam propostas para o roteamento de unidades móveis de mamografia, as chamadas MMUs (*Mobile Mammography Units*). O roteamento das MMUs é feito para atender à população alvo não suprida pelos mamógrafos fixos;
4. [Rosa et al. \(2020b\)](#): Trabalho que analisa a localização de mamógrafos no Estado de Minas Gerais sob duas perspectivas: 1) a obrigatoriedade ou não de os equipamentos serem localizados nas atuais microrregiões de saúde do Estado; 2) a aquisição gradativa de equipamentos para maximizar a cobertura por exames da população alvo. Este trabalho recebeu menção honrosa no Prêmio de Iniciação Científica do LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, em 2020.

4 Formulação de referência

A Tabela 2 apresenta a notação, os parâmetros e as variáveis auxiliares e de decisão da formulação desenvolvida.

A formulação de referência de programação inteira mista proposta é dada pelas Equações (1) a (11):

$$\max \sum_{i \in N} \sum_{j \in S_i} dem_j \cdot x_{ij} \quad (1)$$

Tabela 2: Parâmetros e variáveis de decisão

Parâmetros	
N	Conjunto de cidades
d_{ij}	Distância da cidade i a cidade j
dem_j	Demanda por mamografias na cidade j
cap	Capacidade anual de realização de mamografias de um equipamento
p	Número de mamógrafos a serem localizados
R	Distância máxima que uma mulher pode viajar
$Infra_i$	Parâmetro binário que assume o valor 1 se a cidade i tem infraestrutura hospitalar para sediar um mamógrafo e 0, caso contrário
S_i	Conjunto das cidades que distam no máximo R km da cidade i , isto é, $S_i = \{j \in N \mid d_{ij} \leq R \text{ and } d_{ji} \leq R\}$
Variáveis auxiliares	
z_i	Variável binária que assume o valor 1 se a cidade i hospeda algum equipamento e valor 0, caso contrário
x_{ij}	Variável contínua no intervalo $[0, 1]$ que indica a fração da demanda da cidade j que é atendida por mamógrafos instalados na cidade i .
y_i	Variável inteira que representa a quantidade de equipamentos instalados na cidade i

$$\text{s. a:} \quad \sum_{i \in S_j} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} y_i = p \quad (3)$$

$$\sum_{j \in S_i} dem_j \cdot x_{ij} \leq cap \cdot y_i \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$z_i \geq y_i/p \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$z_i \geq x_{ij} \quad \forall i, j \in N \quad (6)$$

$$x_{ii} = z_i \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$y_i = 0 \quad \forall i \in N \mid Infra_i = 0 \quad (8)$$

$$x_{ij} \in [0, 1] \quad \forall i, j \in N \quad (9)$$

$$y_i \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \quad (11)$$

A função objetivo (1) visa a maximização da cobertura da demanda por mamografias. As restrições (2) garantem que a demanda de cada cidade j , se coberta, seja atendida por mais de uma cidade que contenha um mamógrafo instalado e que, além disso, a soma dos atendimentos não exceda a sua demanda. A restrição (3) determina que todos os p equipamentos existentes precisam ser instalados. As restrições (4) garantem que a capacidade anual de realização de exames de cada mamógrafo seja respeitada. As restrições (5) forçam que z_i assumo o valor 1 caso pelo menos um equipamento esteja instalado na cidade i . As restrições (6) asseguram que a demanda de uma cidade j somente poderá ser coberta por

uma cidade i se houver um equipamento nessa cidade. As restrições (7) garantem que se uma cidade i sediar mamógrafos, toda a sua demanda precisa ser coberta pelos seus próprios equipamentos. As restrições (8) indicam que somente cidades com infraestrutura hospitalar podem sediar mamógrafos. Finalmente, as restrições (9), (10) e (11) impõem o domínio das variáveis de decisão.

5 Formulações para análise da má distribuição de equipamentos

São analisados, a seguir, dois cenários para analisar a má distribuição dos equipamentos de mamografia no Brasil. O primeiro, nomeado Cenário 1, admite que somente os equipamentos de gestão estadual e/ou dupla podem ser relocados. O segundo, nomeado Cenário 2, admite que todos os equipamentos, sejam eles de gestão municipal e/ou estadual e/ou dupla possam ser relocados.

5.1 Formulação do Cenário 1

Para impor que mamógrafos sob gestão municipal não sejam relocados, é necessário acrescentar à formulação de referência o conjunto de restrições (12):

$$y_i \geq pm_i \quad \forall i \in \mathcal{N} \quad (12)$$

no qual pm_i indica o número de mamógrafos existentes na cidade i que estão sob gestão municipal. Além disso, nesse cenário, as restrições (7) são removidas. Isso permite que os mamógrafos instalados na cidade i não tenham necessariamente que cobrir toda a demanda daquela cidade.

5.2 Formulação do Cenário 2

Para admitir que todos os equipamentos, sejam eles de gestão municipal, estadual e/ou dupla, possam ser livremente relocados, basta aplicar a formulação de referência, definida na Seção 4 e, assim como no Cenário 1, remover as restrições (7). Permite-se, assim, a livre relocação dos equipamentos, bem como as suas alocações de exames.

6 Formulação para a proposta de novos investimentos

A remoção de um mamógrafo de uma cidade para outra, seja ele de gestão municipal ou estadual e/ou dupla, é uma operação complexa, tanto do ponto de vista operacional quanto do ponto de vista político. Considerando essa premissa, o foco de estudo no projeto foi a análise de novos investimentos, ou seja, o objetivo foi definir a quantidade de equipamentos necessários, aonde instalá-los e estabelecer suas respectivas alocações, mantendo-se os equipamentos existentes nos locais aonde eles estão instalados.

Para impedir que todos os equipamentos, sejam eles de gestão municipal, estadual e/ou dupla, possam ser livremente relocados, é necessário adicionar, à formulação de referência definida na Seção 4, o conjunto de restrições (13):

$$y_i \geq pe_i \quad \forall i \in N \quad (13)$$

no qual pe_i indica o número de mamógrafos existentes na cidade i .

O conjunto de restrições (13) garante que a quantidade de mamógrafos existentes em uma cidade deve ser mantida, impedindo-se, portanto, sua movimentação para outra cidade.

Para investigar a quantidade necessária de equipamentos que precisaria ser adquirida para cobrir toda a demanda das cidades de cada unidade federativa brasileira, foi realizado um procedimento iterativo, detalhado na sequência.

Inicialmente executa-se a formulação de referência, dada pelas Equações (1) a (11), utilizando-se como parâmetro os valores definidos na instância. A solução resultante não representa incremento de mamógrafos em relação à solução existente. Na iteração seguinte, acrescenta-se uma unidade de mamografia e resolve-se a formulação novamente. Se o valor da função objetivo da solução resultante for maior que o valor da função objetivo da solução anterior, passa-se à próxima iteração adicionando-se mais um equipamento. O processo se repete até que a adição de um novo mamógrafo não afete a cobertura.

É importante ressaltar que ao final deste procedimento não há garantia de que toda a demanda esteja coberta. Isso ocorre porque existem cidades que não possuem infraestrutura hospitalar para sediar um mamógrafo e estão a mais de R km distantes da cidade mais próxima com infraestrutura para tal.

7 Resultados

Esta seção está organizada como segue. Inicialmente, na Subseção 7.1, estimamos a cobertura da configuração existente em todos os municípios brasileiros. Em seguida, na Subseção 7.2, comparamos os resultados da configuração existente com os dos cenários 1 e 2, definidos pelas formulações da Subseção 5.1 e 5.2, respectivamente. Na Subseção 7.3, apresentamos os resultados da proposta para novos investimentos. Por fim, na Subseção 7.4, faz-se uma comparação gráfica entre a configuração existente e a proposta com a aquisição de novos equipamentos.

7.1 Estimativa da configuração existente

Para estimar a demanda atendida na configuração existente em cada cidade, aplicamos a formulação de referência considerando que todos os equipamentos não podem ser movidos de onde estão instalados. No entanto, quando se aplicam as restrições (13) à formulação de referência, existe a possibilidade de gerarmos soluções ineficazes com a configuração existente. Este fato ocorre porque as restrições (7) assumem que, se uma cidade é sede de mamógrafos,

sua demanda precisa necessariamente ser totalmente coberta, o que nem sempre ocorre na configuração existente.

Para evitar essa situação, a estimativa da demanda atendida na configuração existente é obtida excluindo as restrições (7). Dessa forma, aceita-se que a demanda da cidade-sede possa ser coberta parcialmente, além de permitir que, mesmo sem ter a cobertura máxima, ela possa atender a outras cidades.

Chamamos a atenção para o fato de que a cobertura retornada pela aplicação da formulação à este cenário é uma estimativa otimista da demanda atendida. De fato, qualquer outra solução obtida respeitando-se as regras existentes não retornaria um valor maior do que o reportado. Por exemplo, se uma cidade tem um equipamento adquirido por doação obtida com recursos não públicos, a princípio, seus equipamentos atenderiam somente à sua população.

7.2 Configuração existente × configurações dos cenários 1 e 2

A Tabela 3 reporta os resultados da configuração existente em todas as unidades da federação brasileira e as confronta com os dos cenários 1 e 2, nos termos definidos nas Subseções 5.1 e 5.2, respectivamente. As quatro primeiras colunas apresentam a unidade da federação, a quantidade total de equipamentos existentes, a quantidade de equipamentos de gestão exclusivamente municipal e a demanda por exames de mamografia. As quatro colunas seguintes reportam a demanda atendida, o percentual de cobertura na unidade federativa, a taxa de utilização média dos equipamentos na estimativa da configuração existente e um link para o arquivo contendo a solução completa. Por sua vez, as próximas quatro colunas seguintes reportam os resultados considerando a realocação dos equipamentos de gestão estadual e/ou dupla (Configuração do cenário 1). Por fim, as quatro últimas colunas apresentam os resultados considerando a realocação de todos os equipamentos, inclusive os de administração municipal, conforme descrito na Subseção 5.2 (Configuração do cenário 2).

Tabela 3: Comparação entre a configuração existente e as configurações dos cenários 1 e 2.

UF # EqT # EqM	Demanda			Configuração existente				Configuração do cenário 1				Configuração do cenário 2			
			total	DA	Cob.	TU	SoC	DA	Cob.	TU	SoC	DA	Cob.	TU	SoC
AC	6	2	45531	31849	69,95%	78,55%	Arq	31849	69,95%	78,55%	Arq	31849	69,95%	78,55%	Arq
AL	52	47	236195	236195	100,00%	67,21%	Arq	236195	100,00%	67,21%	Arq	236195	100,00%	67,21%	Arq
AP	6	2	40916	30614	74,82%	75,50%	Arq	30614	74,82%	75,50%	Arq	35646	87,12%	87,91%	Arq
AM	76	38	217350	214789	98,82%	41,82%	Arq	217350	100,00%	42,32%	Arq	217350	100,00%	42,32%	Arq
BA	209	123	1100506	940667	85,48%	66,60%	Arq	1095369	99,53%	77,55%	Arq	1099904	99,95%	77,87%	Arq
CE	87	67	659229	474293	71,95%	80,67%	Arq	533466	80,92%	90,73%	Arq	587946	89,19%	100,00%	Arq
DF	18	0	228696	121644	53,19%	100,00%	Arq	121644	53,19%	100,00%	Arq	121644	53,19%	100,00%	Arq
ES	59	48	308912	267929	86,73%	67,20%	Arq	273171	88,43%	68,51%	Arq	308912	100,00%	77,48%	Arq
GO	100	96	509877	443083	86,90%	65,56%	Arq	459064	90,03%	67,93%	Arq	506138	99,27%	74,89%	Arq
MA	46	31	437638	242644	55,44%	78,05%	Arq	290439	66,37%	93,43%	Arq	310868	71,03%	100,00%	Arq
MT	58	52	238077	169362	71,14%	43,21%	Arq	185455	77,90%	47,31%	Arq	219549	92,22%	56,01%	Arq
MS	40	40	204894	141235	68,93%	52,25%	Arq	141235	68,93%	52,25%	Arq	191204	93,32%	70,73%	Arq
MG	347	284	1739085	1595953	91,77%	68,06%	Arq	1727996	99,36%	73,69%	Arq	1738251	99,95%	74,13%	Arq
PA	68	42	494894	342488	69,20%	74,53%	Arq	397776	80,38%	86,56%	Arq	424371	85,75%	92,35%	Arq
PB	93	89	300873	297440	98,86%	47,33%	Arq	300873	100,00%	47,87%	Arq	300873	100,00%	47,87%	Arq
PR	176	90	946162	807893	85,39%	67,92%	Arq	939955	99,34%	79,03%	Arq	939955	99,34%	79,03%	Arq
PE	115	50	724181	682165	94,20%	87,78%	Arq	720739	99,52%	92,74%	Arq	720739	99,52%	92,74%	Arq
PI	51	44	240218	173713	72,31%	50,40%	Arq	186945	77,82%	54,24%	Arq	213025	88,68%	61,81%	Arq
RJ	184	176	1544794	1140205	73,81%	91,70%	Arq	1160479	75,12%	93,33%	Arq	1243472	80,49%	100,00%	Arq
RN	48	33	255791	231868	90,65%	71,48%	Arq	253733	99,20%	78,22%	Arq	253733	99,20%	78,22%	Arq
RS	204	106	1017474	970831	95,42%	70,42%	Arq	1016972	99,95%	73,77%	Arq	1016972	99,95%	73,77%	Arq
RO	22	11	116820	92964	79,58%	62,53%	Arq	109841	94,03%	73,88%	Arq	110652	94,72%	74,42%	Arq
RR	5	1	28361	21095	74,38%	62,43%	Arq	21095	74,38%	62,43%	Arq	21095	74,38%	62,43%	Arq
SC	131	108	569392	552613	97,05%	62,42%	Arq	569392	100,00%	64,32%	Arq	569392	100,00%	64,32%	Arq
SP	516	393	3826393	3168360	82,80%	90,86%	Arq	3428741	89,61%	98,33%	Arq	3487128	91,13%	100,00%	Arq
SE	28	19	162305	154203	95,01%	81,49%	Arq	162305	100,00%	85,77%	Arq	162305	100,00%	85,77%	Arq
TO	23	11	96592	54121	56,03%	34,82%	Arq	70509	73,00%	45,36%	Arq	70509	73,00%	45,36%	Arq
Média					80,73%	68,18%			86,36%	72,99%			90,42%	76,49%	
[EqT] Número total de equipamentos existentes.								[EqM] Número de equipamentos municipais existentes.							
[DA] Demanda atendida.								[TU] Taxa média de utilização dos equipamentos.							
[Soc] Solução completa.								[Arq] Arquivo com a solução completa.							
[Config. do cenário 1] Permite realocização apenas dos mamógrafos de gestão estadual e/ou dupla.															
[Config. do cenário 2] Permite realocização de todos os mamógrafos, inclusive os de gestão municipal.															

Os resultados completos relativos à Tabela 3 estão disponíveis clicando-se [aqui](#).

Como se observa, para os Estados do Acre, Amapá e Distrito Federal, tanto a Configuração do cenário 1 quanto a do cenário 2 não foram capazes de melhorar a taxa de cobertura. Isso se justifica pelo baixo número de equipamentos existentes, que é insuficiente para cobrir a demanda da população alvo. Um caso interessante é o do Estado de Mato Grosso do Sul. Para a referida unidade da federação, a configuração do cenário 1 não melhorou a cobertura em relação à configuração existente, mantendo-se a taxa de cobertura em 68,93%. Porém, quando é analisado o Cenário 2, com liberdade total de realocização, a cobertura atinge 93,32%. A discrepância ocorre devido ao fato de que todos os mamógrafos desse Estado estão sob gestão municipal, resultando na ausência de realocização de equipamentos na Configuração do

cenário 1.

Por outro lado, em todas as outras unidades da federação, mesmo permitindo somente a realocação de equipamentos de gestão estadual e/ou dupla, há aumento da taxa de cobertura. Destaca-se, aqui, as instâncias relativas aos estados do Amazonas, Paraíba e Santa Catarina, que já possuem cobertura muito boa na configuração existente, mas com a Configuração do cenário 1 conseguem atender a toda a demanda. O aumento é mais significativo quando é permitida a realocação de todos os equipamentos, incluindo os de gestão municipal. Esse é o caso do Espírito Santo, em que a cobertura aumenta de 86,73% para 88,43% quando se permite mover apenas mamógrafos sob gestão estadual e/ou dupla, mas alcança-se a cobertura máxima quando é permitido realocar todos os equipamentos.

Esses resultados apresentados na Tabela 3 confirmam a má distribuição de equipamentos de mamografia no Brasil, como observado em vários trabalhos da literatura, como os de [Amaral et al. \(2017\)](#), [Miranda & Patrocinio \(2018\)](#) e [Rodrigues et al. \(2019\)](#).

7.3 Resultados da proposta para novos investimentos

A Tabela 4 apresenta uma proposta para novos investimentos. As quatro primeiras colunas apresentam a unidade da federação, a quantidade de equipamentos totais disponibilizadas, a quantidade de equipamentos de gestão exclusivamente municipal e a demanda por exames de mamografia. A quinta coluna (# Equip. novos) reporta a proposta de quantidade de equipamentos a serem adquiridos para atender a maior cobertura possível, independentemente da taxa de utilização dos equipamentos. Ou seja, a demanda remanescente não é possível de ser atendida dada a necessidade de se respeitar a distância de 60 km imposta e/ou a condição de infraestrutura hospitalar existente. As sexta, sétima e oitava colunas, “Demanda atendida”, “Cobertura” e “Taxa de cobertura”, mostram a demanda atendida, a taxa de cobertura e a taxa média de utilização global dos equipamentos com essa proposta de aquisição. As duas últimas colunas apresentam o link para as cidades prioritárias e a solução completa, respectivamente.

Tabela 4: Proposta para novos investimentos.

UF	# Equip. (Total)	# Equip. (Munic.)	Demanda total	# Equip. novos	Demanda atendida	Cobertura	Taxa de utilização	Cidades Prioritárias	Solução Completa
AC	6	2	45531	0	31849	69,95%	78,55%	Arquivo	Arquivo
AL	52	47	236195	0	236195	100,00%	67,21%	Arquivo	Arquivo
AP	6	2	40916	4	39559	96,68%	58,54%	Arquivo	Arquivo
AM	76	38	217350	4	217350	100,00%	40,20%	Arquivo	Arquivo
BA	209	123	1100506	64	1099904	99,95%	59,62%	Arquivo	Arquivo
CE	87	67	659229	32	650622	98,69%	80,90%	Arquivo	Arquivo
DF	18	0	228696	16	228696	100,00%	99,53%	Arquivo	Arquivo
ES	59	48	308912	13	308912	100,00%	63,49%	Arquivo	Arquivo
GO	100	96	509877	46	508803	99,79%	51,57%	Arquivo	Arquivo
MA	46	31	437638	48	428320	97,87%	67,43%	Arquivo	Arquivo
MT	58	52	238077	53	235510	98,92%	31,40%	Arquivo	Arquivo
MS	40	40	204894	23	198886	97,87%	46,71%	Arquivo	Arquivo
MG	347	284	1739085	74	1738251	99,95%	61,10%	Arquivo	Arquivo
PA	68	42	494894	46	484148	97,83%	62,84%	Arquivo	Arquivo
PB	93	89	300873	5	300873	100,00%	45,43%	Arquivo	Arquivo
PR	176	90	946162	39	939955	99,34%	64,69%	Arquivo	Arquivo
PE	115	50	724181	26	720739	99,52%	75,64%	Arquivo	Arquivo
PI	51	44	240218	16	213025	88,68%	47,05%	Arquivo	Arquivo
RJ	184	176	1544794	93	1544794	100,00%	82,52%	Arquivo	Arquivo
RN	48	33	255791	9	253733	99,20%	65,87%	Arquivo	Arquivo
RS	204	106	1017474	40	1016972	99,95%	61,67%	Arquivo	Arquivo
RO	22	11	116820	10	110816	94,86%	51,24%	Arquivo	Arquivo
RR	5	1	28361	0	21095	74,38%	62,43%	Arquivo	Arquivo
SC	131	108	569392	15	569392	100,00%	57,71%	Arquivo	Arquivo
SP	516	393	3826393	178	3826393	100,00%	81,59%	Arquivo	Arquivo
SE	28	19	162305	5	162305	100,00%	72,78%	Arquivo	Arquivo
TO	23	11	96592	7	70509	73,00%	34,78%	Arquivo	Arquivo

Os dados na Tabela 4 mostram a cobertura máxima possível de se obter fazendo investimento em aquisição de novos mamógrafos. Como mencionado no parágrafo anterior, em alguns estados a infraestrutura hospitalar e a restrição de distância limitam a possibilidade de cobertura. Nos estados do Acre, Alagoas e Roraima, a adição de novos equipamentos não melhora a cobertura por esse motivo. No Piauí e em Tocantins, os mamógrafos adicionais proporcionam um incremento na taxa de cobertura, porém as restrições mencionadas impedem que a taxa de cobertura atinja 90%.

Nos demais estados, o investimento em aquisição de novos equipamentos poderia aumentar as taxas de cobertura em valores superiores a 94%. Entretanto, esse ganho pode vir acompanhado de baixas taxas de utilização dos equipamentos, como acontece no Amazonas, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Paraíba. Nesses estados, observa-se uma cobertura muito boa (até mesmo total); porém, a taxa global de utilização dos equipamentos não alcança 50%. Uma alternativa para evitar essa baixa taxa de utilização dos equipamentos seria estabelecer um limite mínimo de utilização, como, por exemplo, 70%, para definir que novos equipamentos só sejam adicionados se a taxa de utilização estiver acima desse limiar.

Como limitação deste estudo, é importante ressaltar que tais resultados são apenas indicações baseadas no levantamento de dados realizados em dezembro de 2020 a partir de dados públicos fornecidos pelo DATASUS. A metodologia desenvolvida deve ser aplicada considerando-se a disponibilidade de operação dos equipamentos existentes em cada município, assim como da existência de efetiva infraestrutura para sediá-los.

7.4 Comparação gráfica entre a configuração existente e a proposta

As figuras disponibilizadas [aqui](#) ilustram, graficamente, a configuração existente e a proposta em cada uma das unidades da federação brasileira com a aquisição de equipamentos para alcançar a maior cobertura possível.

Referências

- Amaral, P., Luz, L., Cardoso, F., & Freitas, R. (2017). Distribuição espacial de equipamentos de mamografia no Brasil. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais (RBEUR)*, 19, 326–341. <https://doi.org/10.22296/2317-1529.2017v19n2p326>.
- de Assis, R. d. S. L., de Campos, M. V. A., Souza, M. J. F., Silva, M. A. L., de Siqueira, E. C., & de Souza, S. R. (2021). Um algoritmo iterated greedy search para o problema de localização de mamógrafos com atendimento parcial. In *Anais do LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - LIII SBPO* (p. 139778). SOBPAPO, online: Galoá: Campinas volume 53. Disponível em <https://proceedings.science/sbpo-series/sbpo-2021/papers/um-algoritmo-iterated-greedy-search-para-o-problema-de-localizacao-de-mamografos-com-atendimento-parcial>.
- de Assis, R. S. L., de Campos, M. V. A., Souza, M. J. F., Silva, M. A. L., de Siqueira, E. C., & de Souza, S. R. (2022). Um algoritmo variable neighborhood search para o problema de localização de mamógrafos com atendimento parcial. In *Anais do LIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional* (p. 152748). Juiz de Fora, Brazil volume 54. Disponível em <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2022/trabalhos/um-algoritmo-variable-neighborhood-search-para-o-problema-de-localizacao-de-mamo?lang=pt-br>. Acesso em 25 de novembro de 2022.
- Barbosa, R. P., Souza, M. J. F., & Miranda Junior, G. (2023). Mammography unit location: reconciling maximum coverage and budgetary constraints. In *Proceedings of the 25th International Conference on Enterprise Information Systems*. Prague, Czech Republic: ICEIS. Aceito para publicação. Disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/publications/BOMULAP-ICEIS-2023.pdf>.
- de Campos, M. V. A. (2020). *Formulações de programação matemática e um algoritmo heurístico para o problema de localização de mamógrafos*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional,

- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG Belo Horizonte. Disponível em <https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2919143&key=9740e930bbc5ea8d4c479145de635cd8>.
- de Campos, M. V. A., de Assis, R. S. L., Souza, M. J. F., Silva, M. A. L., de Siqueira, E. C., & de Souza, S. R. (2022). Algoritmos nsga-ii e spea2 para o problema multiobjetivo de localização de mamógrafos. In *Anais do LIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional* (p. 152742). Juiz de Fora, Brazil volume 54. Disponível em <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2022/trabalhos/algoritmos-nsga-ii-e-spea2-para-o-problema-multiobjetivo-de-localizacao-de-mamog?lang=pt-br>. Acesso em 25/11/2022.
- de Campos, M. V. A., de Assis, R. S. L., Souza, M. J. F., de Siqueira, E. C., Silva, M. A. L., & de Souza, S. R. (2023). Multi-objective mammography unit location-allocation problem: A case study, . Submetido a Operations Research for Health Care. Disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/publications/MOMULAP-ORHC.pdf>.
- de Campos, M. V. A., de Sá, M. V. S. M., Rosa, P. M., Penna, P. H. V., de Souza, S. R., & Souza, M. J. F. (2020). A mixed linear integer programming formulation and a simulated annealing algorithm for the mammography unit location problem. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems - ICEIS 2020* (pp. 428–439). INSTICC online: SciTePress volume 1. doi:[10.5220/0009420704280439](https://doi.org/10.5220/0009420704280439).
- Miranda, S., & Patrocínio, A. (2018). Distribuição de mamógrafos por macrorregião do Brasil. In *Anais do V Congresso Brasileiro de Eletromiografia e Cinesilogia e X Simpósio de Engenharia Biomédica* (pp. 433–436). Ribeirão Preto, Brazil: Associação Brasileira de Física Médica. <https://dx.doi.org/10.29327/cobecseb.78881>.
- Paiva, J. N. M., Rosa, P. M., Penna, P. H. V., Monteiro, J. C., Lisboa, M. R., & Souza, M. J. F. (2023). Alocação de mamógrafos em Rondônia: estudo de caso. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, . Aceito para publicação em 19/01/2023. Disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Publicacoes/PODES-2023-MULP-Rondonia.pdf>.
- Rodrigues, D. C. N., Freitas-Junior, R., Rahal, R. M. S., da Silveira Corrêa, R., Peixoto, J. E., Ribeiro, N. V., Ferreira, N. C., & Soares, L. R. (2019). Difficult access and poor productivity: Mammography screening in Brazil. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 20, 1857–1864. <https://doi.org/10.31557/APJCP.2019.20.6.1857>.
- Rosa, O. A. S. (2021a). *Algoritmos heurísticos para o Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Ouro Preto Ouro Preto. Disponível em <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/14549>.
- Rosa, O. A. S., Rosa, P. M., Paiva, J. N. M., Penna, P. H. V., & Souza, M. J. F. (2021). Um algoritmo heurístico baseado em iterated greedy para o problema de roteamento de unidades móveis de mamografia. In *Anais do LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*

- *LIII SBPO* (p. 139491). SOBRAPO, online: Galoá: Campinas volume 53. Disponível em <https://proceedings.science/sbpo-series/sbpo-2021/papers/um-algoritmo-heuristico-baseado-em-iterated-greedy-para-o-problema-de-roteamento-de-unidades-moveis-de-mamografia>.
- Rosa, O. A. S., Rosa, P. M., Penna, P. H. V., & Souza, M. J. F. (2020a). Um algoritmo construtivo para o problema de roteamento de unidades móveis de mamografia. In *Anais do LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - LII SBPO* (p. 139778). SOBRAPO, João Pessoa: Galoá: Campinas volume 52. Disponível em <https://proceedings.science/sbpo-series/sbpo-2020/papers/um-algoritmo-construtivo-para-o-problema-de-roteamento-de-unidades-moveis-de-mamografia>.
- Rosa, P. M. (2021b). *Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia em Minas Gerais*. Trabalho de conclusão de curso (ciência da computação) Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto Ouro Preto. Disponível em https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3003/6/MONOGRAFIA_RoteamentoUnidadesM%C3%B3veis.pdf.
- Rosa, P. M., de Sá, M. V. S. M., Paiva, J. N. M., Penna, P. H. V., & Souza, M. J. F. (2020b). Análise da localização de mamógrafos em Minas Gerais. In *Anais do LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - LII SBPO* (p. 127627). SOBRAPO, João Pessoa: Galoá: Campinas volume 52. Menção honrosa no Prêmio de Iniciação Científica do LII SBPO. Disponível em <https://proceedings.science/sbpo-series/sbpo-2020/papers/analise-da-localizacao-de-mamografos-em-minas-gerais>.
- Souza, M. J. F., Penna, P. H. V., Moreira de Sá, M. V. S., & Rosa, P. M. (2020). A vns-based algorithm for the mammography unit location problem. In R. Benmansour, A. Sifaleras, & N. Mladenović (Eds.), *Variable Neighborhood Search: 7th International Conference, ICVNS 2019, Rabat, Morocco, October 3–5, 2019, Revised Selected Papers* chapter 3. (pp. 37–52). Cham, Switzerland: Springer volume 12010 of *Lecture Notes in Computer Science*. (1st ed.). DOI: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-44932-2_3.
- Souza, M. J. F., Penna, P. H. V., de Sá, M. V. S. M., Rosa, P. M., Monteiro, J. C., & Lisboa, M. R. (2019). Localização de mamógrafos: formulações e estudo preliminar de caso de Rondônia. In *Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - LI SBPO* (p. 107698). SOBRAPO, Limeira: Galoá: Campinas volume 51. Disponível em <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2019/trabalhos/localizacao-de-mamografos-formulacoes-e-estudo-preliminar-de-caso-de-rondonia?lang=pt-br>.
- de Sá, M. V. S. M. (2019). *Estudo do problema de localização de mamógrafos na rede pública de saúde de Minas Gerais*. Trabalho de conclusão de curso (ciência da computação) Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto Ouro Preto. Disponível em https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2348/1/MONOGRAFIA_EstudoProblemaLocaliza%C3%A7%C3%A3o.pdf.

Sá, M. V. S. M., Rosa, P. M., Paiva, J. N. M., Souza, M. J. F., & Penna, P. H. V. (2019). Localização de mamógrafos: um estudo de caso do estado do Espírito Santo. In *Anais do XXVI Simpósio de Engenharia de Produção - XXVI SIMPEP*. UNESP: Bauru volume 26. Disponível em 11nq.com/ZwrSq.