



OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS: meta-heurística GRASP-VND aplicada na otimização da localização industrial e na redução da emissão de carbono

Gabriel Lopes Lima (Universidade Federal de Pernambuco)
gabriel.lima@ufpe.br

Eugenio Afonso de Souza Fischetti (Universidade Federal de Pernambuco)
e.a.s.fischetti@random.org.br

Sóstenes Luiz Soares Lins (Universidade Federal de Pernambuco)
sostenes@cin.ufpe.br

Decisões sobre o investimento na instalação de uma nova indústria apresentam desafios no planejamento estratégico da escolha de sua localização. Ainda, os custos de transportes são dependentes da distância entre a indústria e os clientes, ou seja, uma instalação localizada em um ponto estratégico terá um menor custo de transporte. Os custos com transporte representam significativa parcela dos custos de uma organização, com isso a literatura tem voltado esforços a fim de mitigar esses custos. o objetivo deste trabalho é implementar uma meta-heurística GRASP-VND para o roteamento de múltiplos veículos com diferentes cidades como origem, a fim de encontrar a cidade com as menores distâncias e emissões de CO₂ para a localização industrial de uma empresa de produtos domissanitários no estado de Rondônia. Além disso, o presente artigo calcula o nível de emissão de CO₂ dos veículos de cada um dos roteamentos gerados, visto que este fator deve ser levado em consideração pois o setor de transporte é um dos maiores emissores desse poluente. A metodologia proposta retornou resultados robustos e capazes de orientar o tomador de decisão, visto que soluções iniciais geradas pelo GRASP foram promissoras e a VND foi capaz de eficientemente refinar as soluções de roteamento.

Palavras-chave: Localização industrial, Roteamento de veículos, GRASP-VND, Otimização de distâncias, Emissão de CO₂.

1. Introdução

Decisões sobre o investimento na instalação de uma nova indústria apresentam desafios no planejamento estratégico para a realização da escolha da localização dessa instalação (PEREIRA, LIMA, STAMM, 2019). Um dos fatores de grande influência na escolha da localização são os custos com a distribuição logística *business-to-business*, dos produtos para os revendedores. Os custos de transportes são dependentes da distância entre a indústria e os clientes, ou seja, uma instalação localizada em um ponto estratégico terá um menor custo de transporte.

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (2017), o transporte de cargas por vias rodoviárias representa mais de 60% da distribuição de cargas entre todos os modais disponíveis no Brasil. Livato e de Souza (2010) ainda afirmam que os custos de transporte representam aproximadamente 6,9% do produto interno bruto brasileiro e 60% dos custos logísticos de uma organização, com esses valores percentuais aumentando a cada ano. Assim os custos com transporte frequentemente direcionam esforços e interesses para a redução dos mesmos, pois o sucesso de qualquer organização está estreitamente relacionado com a otimização dos transportes (CHOPRA, MEINDL, 2015).

Outro fator importante relacionado ao setor de transporte é o grande impacto ambiental provocado pelo mesmo, pois apenas ele é responsável por mais de 20% do total global das emissões de CO₂; dessas emissões o modal rodoviário é responsável por mais de 70% delas (IEA, 2012). Estes fatos revelam ainda mais a grande necessidade do desenvolvimento de técnicas de otimização do roteamento nas frotas de veículos das organizações.

Estudos como o de Xie e Li (2020), Wei e Liu (2020) e Ansu e Anjaneyulu (2020) que exploram essa temática a fim de mitigar os custos de transporte têm se tornado cada vez mais frequentes. Dentre as estratégias de redução de custo, a aplicação do Problema do Roteamento de Veículos (PRV) está presente em grande parte delas. À exemplo de Gunawan (2021) que utilizou os fundamentos do PRV para propor um algoritmo meta-heurístico capaz de reduzir os custos de transporte. Os custos de transporte podem ser reduzidos de 5% até 20% com a aplicação de métodos de otimização eficientes (TOTH e VIGO, 2002).

O PRV trata-se de um problema onde um número de k veículos com capacidade Q devem visitar um conjunto de n clientes, a fim de atenderem suas respectivas demandas, e para isso, usando rotas combinadas para minimizar a distância percorrida. Matematicamente, conforme estabelece Laporte (1992), o PRV ainda pode ser definido como um grafo $G = (V, A)$, onde V é um conjunto de vértices que representam as cidades, com o depósito localizado no vértice 0,

e A um conjunto de arestas. A cada aresta (i, j) , com $i \neq j$, existe uma matriz associada de distâncias não negativa $C = (C_{ij})$ (CHRISTOFIDES, MINGOZZI e TOTH, 1979). Mohammed et al. (2017) afirma que existem algumas condições para que o PRV seja satisfeito, primeiro cada rota começa e termina no depósito, segundo cada cidade é visitada somente uma única vez por somente um veículo e por fim a demanda total de cada rota não pode exceder a capacidade do veículo.

O PRV é NP-Difícil, ou seja, um problema no qual não se conhece um método exato que encontre uma solução ótima em tempo polinomial. Com isso, os métodos meta-heurísticos surgem a fim de diminuir o tempo de processamento dos problemas de grandes instâncias, entretanto, como consequência, os métodos heurísticos se limitam na busca por uma solução satisfatória para o problema, que pode ser ou não a solução ótima (DRÉO et al., 2006; SIARRY e MICHALEWICZ, 2007; XIAO e KONAK, 2017).

A meta-heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) destaca-se por ser um método constituído por heurísticas construtivas acompanhado de uma busca local (FEO e RESENDE, 1989; SOHRABI et al., 2019; CRAVO e AMARAL, 2019). Há métodos híbridos mais eficientes, como a incorporação do *Variable Neighborhood Descent* (VND) na fase de busca local. O VND é um método de busca local proposto por Mladenović e Hansen (1997), que utiliza diferentes operadores de vizinhança para explorar o espaço de soluções, substituindo a solução corrente por uma nova apenas se houver melhoria (HANSEN et al., 2017).

Assim, o objetivo deste trabalho é implementar uma meta-heurística GRASP-VND para o roteamento de múltiplos veículos com diferentes cidades como origem, a fim de encontrar a cidade com as menores distâncias e emissões de CO₂ para a localização industrial de uma empresa de produtos domissanitários no estado de Rondônia.

2. Materiais e métodos

2.1. Método de pesquisa

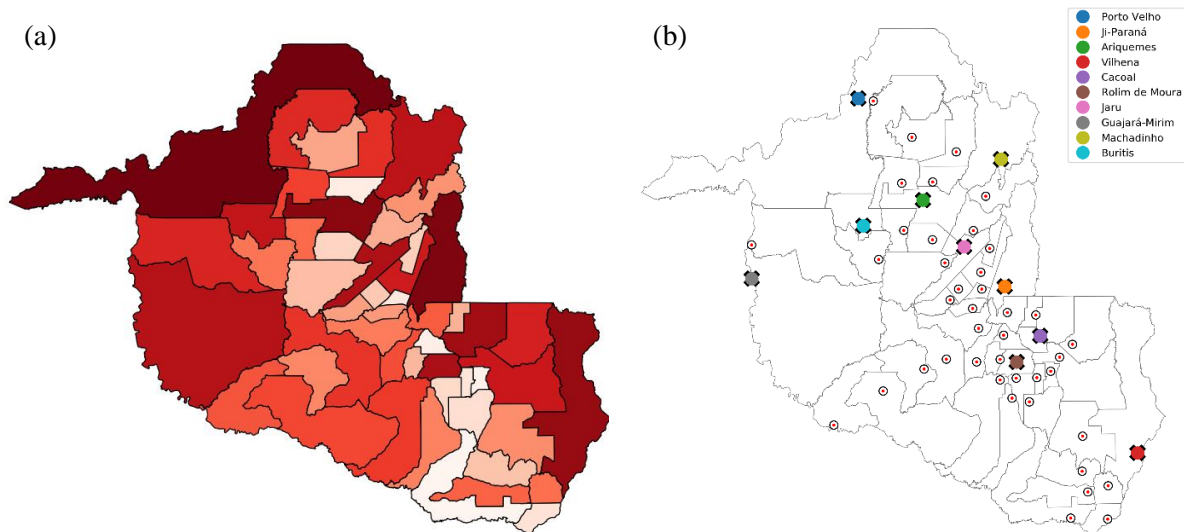
A classificação desta pesquisa quanto a natureza é de caráter aplicado, pois é gerado conhecimento para a aplicação prática voltada para a solução de um problema específico. Quanto a abordagem é classificada como quantitativa, pois as variáveis são todas de escala numérica. Quanto ao objetivo proposto classifica-se como do tipo experimental, pois será feita uma experimentação da cidade que tem os melhores valores de distância e os menores índices de emissão de carbono utilizando a técnica do problema do roteamento de veículos capacitado em uma instância de dados reais (GIL, 2019).

Esta pesquisa ainda por trazer algoritmos será o tipo de pesquisa em computação que visa a apresentação de algo presumivelmente melhor, que segundo Wazlawick (2020) visa o desenvolvimento de um método novo ou incremental, realizando um extenso trabalho de comparação, definindo bem o método usado para implementar e realizar os experimentos.

2.2. Cenário

O cenário de aplicação desta pesquisa é a escolha da melhor cidade no estado de Rondônia para a localização industrial de uma empresa de produtos domissanitários. Visando assim realizar a escolha da localização através da otimização das rotas de três caminhões do modelo atego 2426, nas 52 cidades do estado, sendo definido como origem/depósito as dez cidades mais populosas do estado (IBGE, 2013), na Figura 1(a) é apresentada uma escala que varia do branco (cidade menos populosa) até o vermelho escuro (cidade mais populosa) das cidades do estado.

Figura 1 - Cidades mais populosas do estado de Rondônia



Fonte: Autores (2021)

As cidades mais populosas definidas como origem são primeiramente a capital Porto Velho situada no norte do estado, seguida por Ji-Paraná, Ariquemes, Cacoal, Rolim de Moura, Jaru, Machadinho D'Oeste e Buritis situadas no centro-leste, Guajará-Mirim situada no oeste e Vilhena situada no sudeste do estado, a Figura 1(b) ilustra as localizações geométricas das 52 cidades do estado com destaque nas dez mais populosas.

2.3. Etapas da implementação

A implementação do algoritmo foi dividida em três etapas, na primeira etapa foram coletados os dados das instâncias para serem aplicadas no problema de roteamento de veículos capacitado

como número de cidades, número de veículos, distâncias entre as cidades, capacidade dos veículos e as demandas das cidades. Na segunda etapa foi implementada uma meta-heurística híbrida GRASP-VND ajustada para a solução do PRV. Na terceira etapa foram realizados os experimentos computacionais.

2.3.1. Instâncias

O PRV tem $n = 52$, que é o número de clientes/cidades que formam as rotas, $k = 3$, que é a quantidade de veículos que realizam a distribuição dos produtos percorrendo as rotas. Para as distâncias entre as cidades foi inicialmente gerada uma matriz base com as distâncias calculadas pelo *software maps* da Google, que traça o trajeto mais curto entre as cidades avaliando todas as estradas e rodovias, essa matriz é composta por 52 linhas e colunas com uma relação de 2652 valores de distância entre as cidades.

A partir desta matriz de distâncias base foram geradas outras 10 matrizes, uma para cada cidade das mais populosas, adicionando uma linha e coluna 0, representando a origem/depósito, assim foram calculados todos os valores da distância desta origem para as outras 52 cidades. Quanto a capacidade dos veículos, os três caminhões utilizados pela indústria estudada são do modelo Atego 2426, segmento dos semipesados 6x2, fabricado pela Mercedes-Benz, esses caminhões tem o baú com 8,5 metros de comprimento, 2,4 metros de altura e 2,7 metros de largura, com uma capacidade de 55 m³ de volume e 23 toneladas de carga.

A indústria tem um mix de produção com quatro produtos sendo eles detergente, desinfetante, água sanitária e sabão em pó, com a produção visando a demanda de uma fatia de 4% do mercado. Onde a demanda por produto é dada pela unidade média consumida por uma família, sendo as unidades médias dos produtos três para detergente, dois para desinfetante, um para alvejante e dois para sabão em pó. A indústria utiliza dois tipos de embalagens de caixa, uma com as dimensões de 22cm x 22cm x 25cm com a capacidade de embalar 16 unidades de detergente e 9 unidades de desinfetante e alvejante. E outra caixa com 40cm x 24cm x 24cm de dimensões, com a capacidade de embalar 24 unidades de sabão em pó.

Assim a demanda de cada cidade foi calculada dividindo a população de cada cidade por quatro que é a média de integrantes em uma família, multiplicado pela taxa de 4% da fatia do mercado e pela demanda de cada produto por família, feito isso tem-se a demanda em unidades de produto para cada cidade, para a demanda em volume de carga basta dividir a quantidade de produtos pela capacidade das caixas e multiplicar pelas dimensões da mesma.

Os cálculos das emissões de gás carbônico (CO₂) foram realizados conforme a equação $ECO_2 = k * FECO_2 * D_{ma}$, onde ECO_2 é a emissão de carbono anual, k é o número de veículos da frota, $FECO_2$ é o fator de emissão de CO₂ para veículos de carga a diesel, sendo utilizado nesta pesquisa o fator de 770 g/km, e D_{ma} que é a distância média anual percorrida pelos veículos.

2.3.2. GRASP VND

A meta-heurística implementada utiliza na sua etapa de construção a clássica Lista de Candidatos Restrita (LCR) e um parâmetro α que controla a abordagem gulosa e aleatória do processo. Assim, de maneira que seja respeitada a capacidade dos veículos, o procedimento se encerra quando todas as cidades estiverem em uma rota. Na etapa de busca local é utilizado o método de refinamento VND. O pseudocódigo da meta-heurística implementada para definição de rotas segue representada na Tabela 1.

Tabela 1 – GRASP VND

Algoritmo GRASP - VND (nós, arestas, itermax, $g(\cdot)$, $f(\cdot)$, α, $N(\cdot)$, opviz.)	
1:	$s = \emptyset$
2:	$f_{melhor} = 0$
3:	Para (iter = 1, ..., itermax):
4:	Para (cada veículo):
5:	Inicialize uma lista de candidatos C
6:	Enquanto (C $\neq \emptyset$):
7:	$g(t_{min}) = \min\{g(t) \mid t \in C\}$
8:	$g(t_{max}) = \max\{g(t) \mid t \in C\}$
9:	$LCR = \{t \in C \mid g(t) \leq g(t_{min}) + \alpha(g(t_{max}) - g(t_{min}))\}$
10:	Selecione um dos nós que pertence a lista C aleatoriamente ($t \in LCR$)
11:	$s = s \cup \{t\}$
12:	Atualizar a lista C
13:	k = 1
14:	Enquanto k \leq OpViz:
15:	Buscar o melhor vizinho $s' \in N^{(k)}$
16:	Se ($f(s') > f(s_{melhor})$):
17:	$s = s'$
18:	k = 1
19:	Senão:
20:	k = k + 1
21:	Se ($f(s) > f_{melhor}$):
22:	$s_{melhor} = s$
23:	$f_{melhor} = f(s)$
24:	Retorne s

Fonte: Adaptado Souza (2011)

A utilização do VND torna o algoritmo capaz de explorar diferentes espaços de soluções com a utilização sequencial de operadores de vizinhança, que buscam realizar mudanças de troca entre os conjuntos de destinos presentes na solução corrente. Foram utilizados onze operadores, cinco para melhoria intra-rotas, sendo eles *or-opt1*, *or-opt2* e *or-opt3*, que consiste em retirar uma, duas ou três cidades de uma posição para inserção em outra posição. *Swap*, onde a troca é feita entre duas cidades não adjacentes e *2-opt* que remove dois arcos de uma rota e insere dois novos arcos na mesma rota, e seis operadores para melhoria entre-rotas de veículos, que são de *shift (1,0)*, *shift (2,0)*, *shift (3,0)* que consiste na transferência de um, dois ou três cidades de uma rota para outra rota, finalmente a *swap (1,1)*, *swap (2,2)* e *swap (3,3)* que consiste na troca de um, dois ou três cidades em uma rota com cidades de outra rota.

3. Resultados e discussões

A meta-heurística proposta foi implementada em *Python 3* e executada em um computador com processador *Intel Core i7*, 8GB de memória instalada (RAM), sistema operacional *Windows 10* de 64bits. O algoritmo foi rodado 30 vezes para cada um dos 10 casos sendo consideradas as melhores respostas para análise, segue representado na Tabela 2 os valores de média, melhor e desvio padrão encontrados para as distâncias e o tempo computacional de execução do algoritmo.

Tabela 2 – Resultados das distâncias e tempos das instâncias

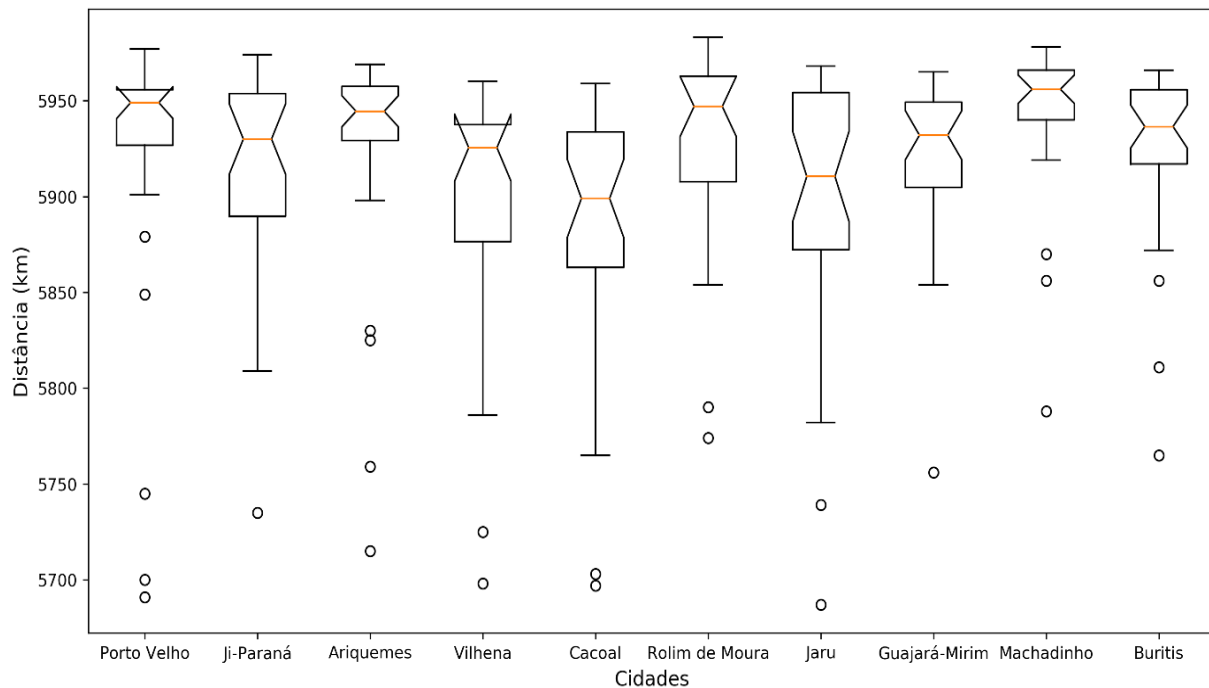
Cidade	Distância			Tempo		
	Média	Melhor	Dp	Média	Melhor	Dp
Porto Velho	5920.1	5691	74,9	6.012	6,387	1.512
Ji-Paraná	5915.1	5735	53,0	6.871	6,658	1.770
Ariquemes	5923.1	5715	60,2	7.973	7,701	2.140
Vilhena	5896.8	5698	64,4	8.970	8,582	2.043
Cacoal	5883.4	5697	69,3	9.246	9,568	2.059
Rolim de Moura	5928.9	5774	51,1	9.084	13,199	2.164
Jaru	5900.1	5687	66,8	9.833	7,309	2.732
Guajará-Mirim	5921.9	5756	42,4	9.258	10,920	2.152
Machadinho D'Oeste	5944.1	5788	39,9	9.166	10,025	2.134
Buritis	5924.4	5765	46,3	9.160	8,192	3.179

Fonte: Os autores (2021)

As cidades que têm as melhores distâncias de transporte são respectivamente: Jaru com 5687 km, a capital do estado Porto Velho com 5691 km e Cacoal com a distância de 5697 km percorridos pela frota de veículos. Já os municípios que tiveram as piores distâncias foram:

Machadinho D’Oeste, Rolim de Moura e Buritis com 5788, 5774 e 5765 km respectivamente. Mesmo Porto Velho, Cacoal e Jaru estando entre as melhores cidades, são também as que apresentam os maiores valores de desvio padrão 74,9, 69,3 e 66,8 respectivamente, essa dispersão é melhor visualizada nos gráficos boxplot na Figura 2.

Figura 2 – Boxplot resultados das distâncias

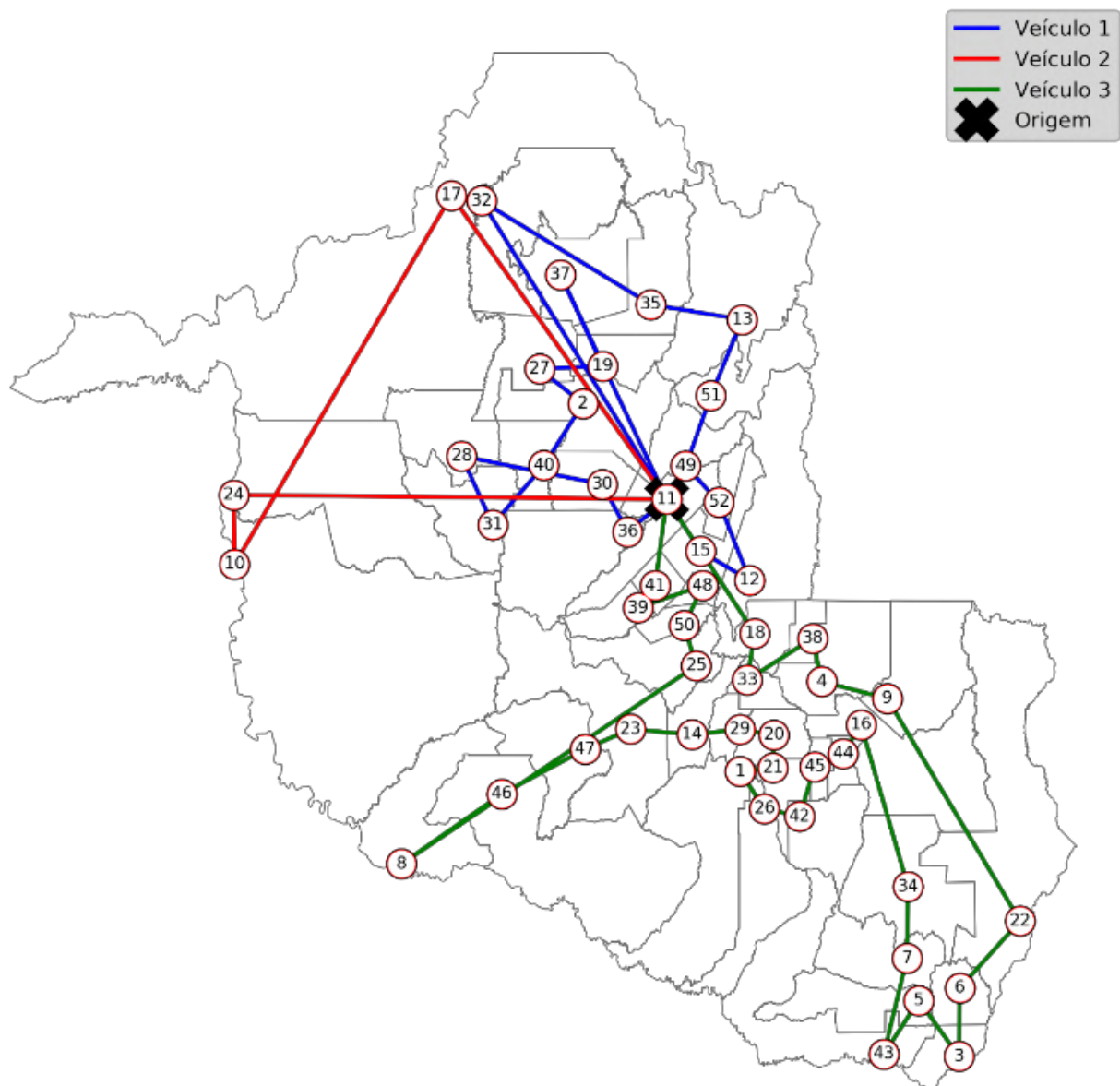


Fonte: Os autores (2021)

Analisando as dispersões e os *outliers* (valores discrepantes) dessas cidades, a cidade de Porto Velho tem uma baixa amplitude interquartílica, ou seja, mais de 80% das vezes que o algoritmo foi executado os resultados se concentraram próximos da média de 5920,1 km, apesar da baixa amplitude os dados se tornam mais dispersos devido mais de 15% dos resultados serem *outliers*, sendo um desses a segunda melhor distância geral do experimento. Já Cacoal e Jaru apresentam grandes amplitudes interquartílicas, tendo assim uma maior dispersão dos resultados, essas variabilidades interquartílicas se dão devido o método GRASP-VND ser uma meta-heurística que trabalha com aleatoriedade, havendo a possibilidade de diferentes resultados executando o mesmo algoritmo, devido, principalmente, a diversificação da geração de soluções iniciais. Os *boxplots* ainda mostram que os melhores resultados do algoritmo são *outliers*, ou seja, execuções que a GRASP gerou uma solução inicial mais promissora e a VND foi eficiente no processo de refinamento do roteamento. É possível visualizar também uma relação de cidades como Porto Velho, Ariquemes, Guajará-Mirim, Machadinho D’Oeste e Buritis que tem uma pequena amplitude interquartílica, concentrando os resultados em roteamentos com distâncias

mais longas, isso devido o algoritmo ficar preso em ótimos locais, salvo em algumas situações de *outliers*. Já cidades como Ji-Paraná, Vilhena, Cacoal e Jaru apresentam dispersões com maiores amplitudes interquartílicas, com resultados dispersos, ou seja, na exploração do algoritmo as localizações dessas cidades levaram a uma maior diversificação de roteamentos. A Figura 3 a seguir apresenta o melhor roteamento de veículos, que é a escolha de Jaru como localização industrial.

Figura 3 – Melhor roteamento de veículos com Jaru como localização industrial

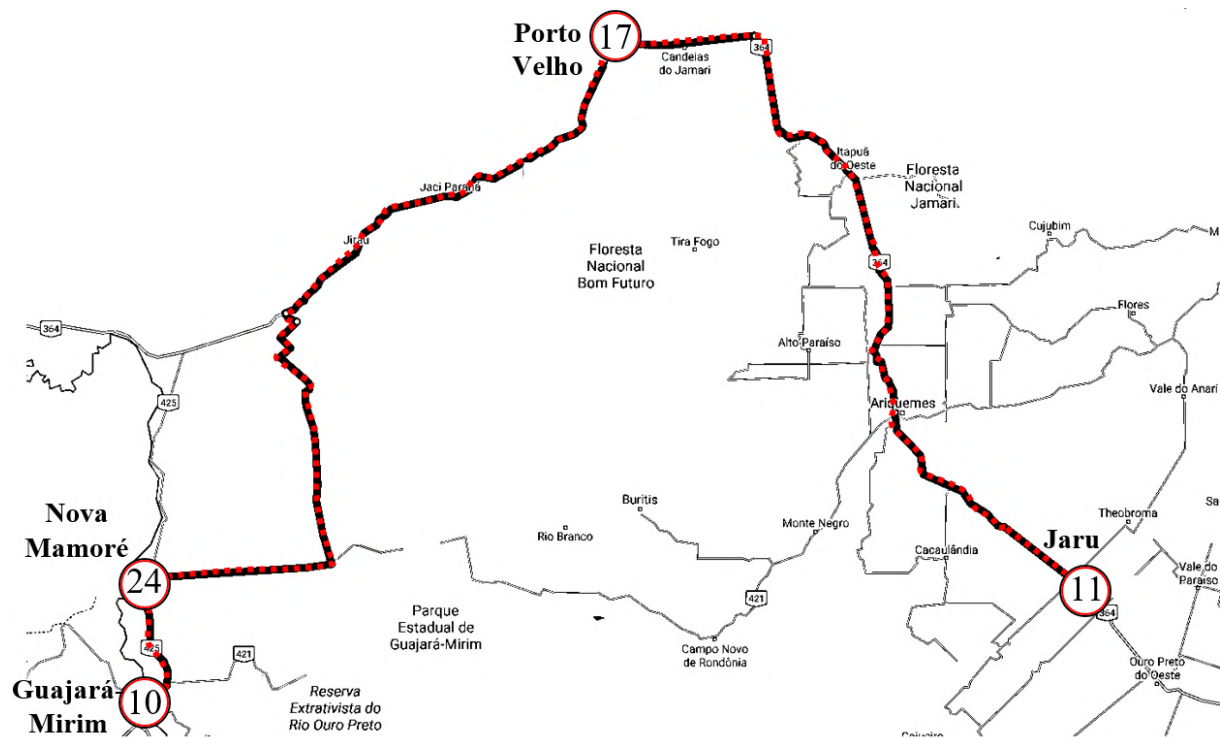


Fonte: Os autores (2021)

A posição central da cidade de Jaru é fundamental no melhor roteamento obtido, pois o ordenamento das rotas se torna mais preciso nas direções tomadas pelos veículos, evitando

assim cruzamento entre-rotas, contribuindo para uma distância final percorrida menor e mais otimizada possível, onde as distribuições das demandas mais ao norte são executadas pelo primeiro e segundo veículo e as demandas das cidades mais ao sul ficam no encargo do terceiro veículo. Vale ainda ressaltar que os cruzamentos intra-rotas no primeiro e segundo veículo são naturais, pois, as distâncias utilizadas na otimização não foram euclidianas, ou seja, uma reta de distância mínima entre as coordenadas das cidades, mas sim as distâncias de percursos reais que a frota deve traçar nas rodovias do estado. A Figura 4 a seguir apresenta o percurso real traçado pelo segundo veículo na distribuição da demanda de três cidade com Jaru sendo a localização industrial.

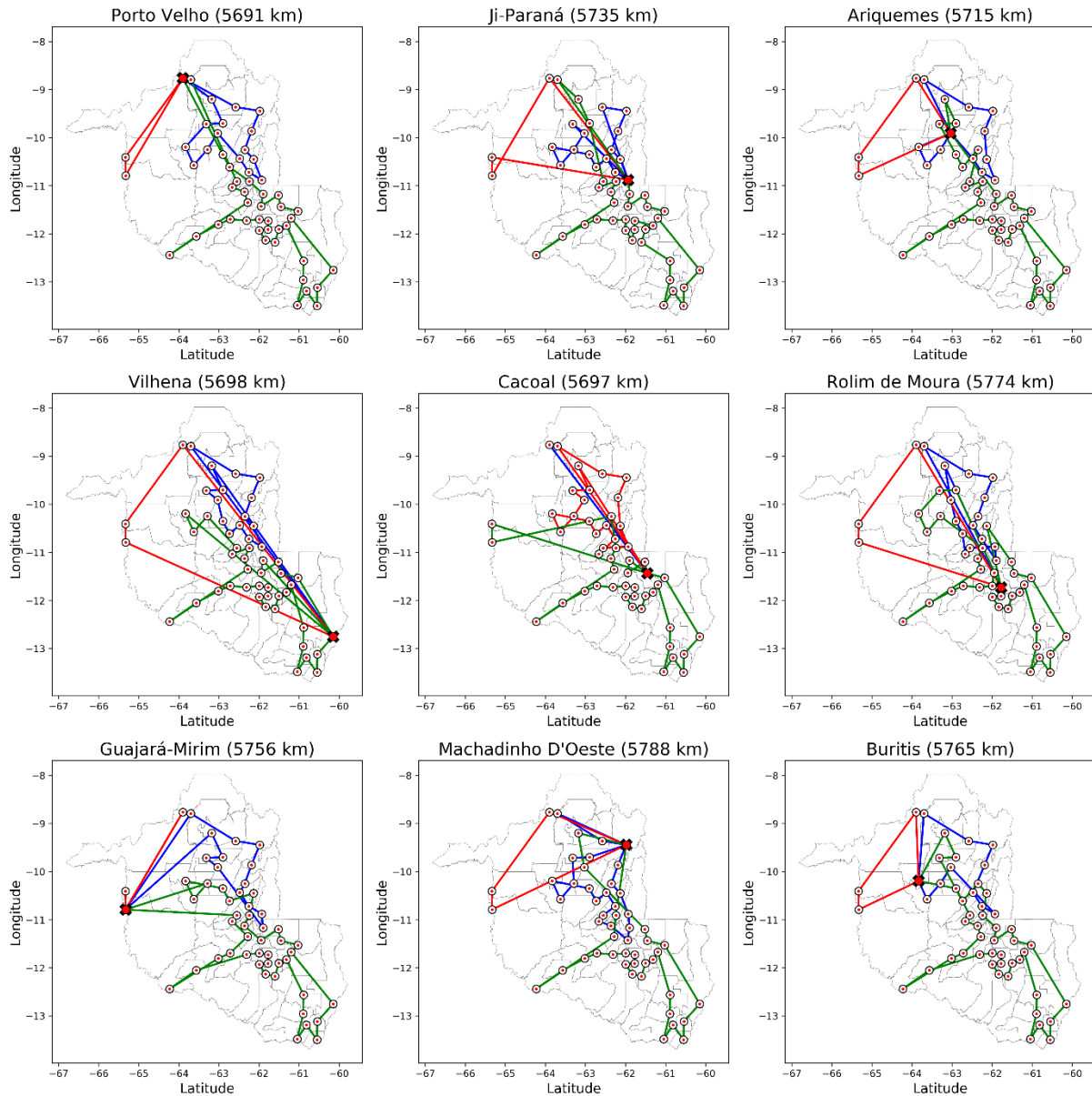
Figura 4 –Roteamento nas rodovias do segundo veículo com Jaru como localização industrial



Fonte: Os autores (2021)

A rota traçada pelo segundo veículo é 11 – 17 – 10 – 24 – 11, onde o veículo sai carregado da indústria em Jaru, segue a estrada para Porto Velho onde é realizado o maior descarregamento de demanda do estado e segue para Guajará-Mirim e Nova Mamoré, nesta cidade o veículo está descarregado e seu destino é a indústria em Jaru, mas para retornar o veículo deve passar pelo mesmo percurso em que veio, subindo novamente para a capital Porto Velho, para só então poder descer para a indústria em Jaru. Os demais roteamentos para localização industrial nas demais cidades são apresentadas na Figura 5 a seguir.

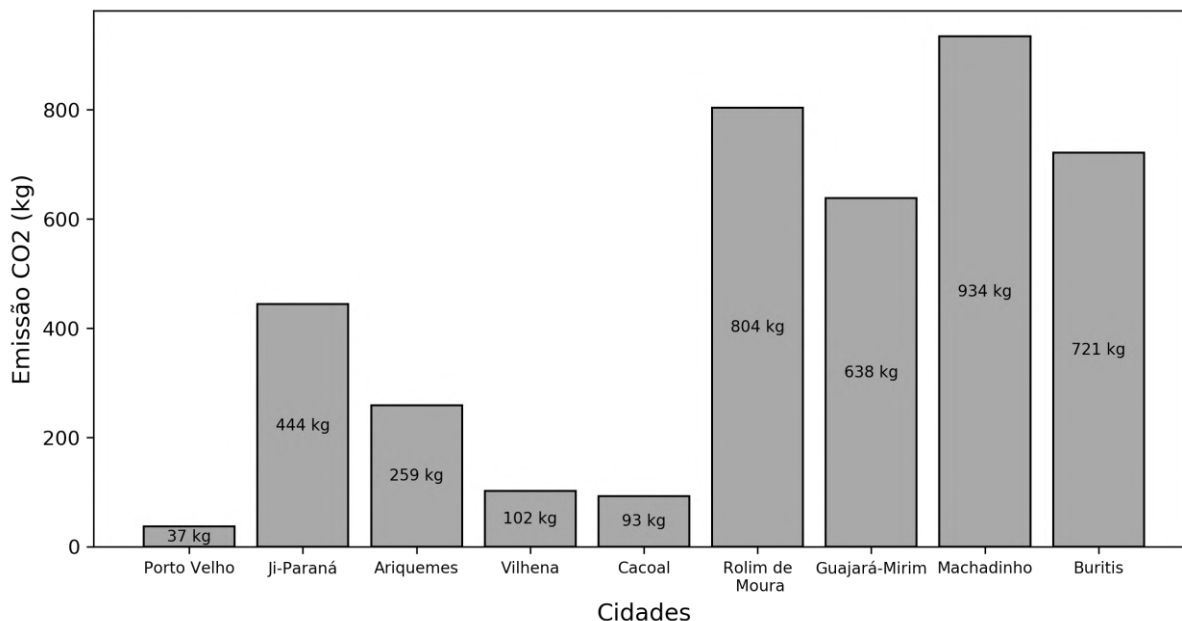
Figura 5 – Roteamentos de veículos com as demais cidades como localização industrial



Fonte: Os autores (2021)

Os roteamentos dos veículos apesar de diferentes localizações como origem seguem padrões muito parecidos como o primeiro veículo que tem uma distribuição mais focada nos municípios no centro-norte do estado, o segundo veículo que na maior parte dos casos realizou a distribuição para Porto Velho, Nova Mamoré e Guajará-Mirim e por fim o terceiro veículo que realiza a distribuição para as cidades localizadas no centro-sul do estado. Com esses roteamentos e a escolha de Jaru como a localização industrial há uma emissão anual de 52,547 toneladas de gás carbônico, que é a menor emissão possível dentre as dez cidades analisadas para a implantação da indústria. A Figura 6 mostra o quanto em kg são reduzidos na emissão de carbono anual escolhendo Jaru como localização industrial em relação as outras cidades.

Figura 6 – Relação da redução da emissão de carbono anual na escolha de Jaru como localização industrial



Fonte: Os autores (2021)

As cidades que têm maior impacto na emissão de CO₂ se fossem escolhidas como localização industrial ao invés de Jaru são Guajará-Mirim, Buritis, Rolim de Moura e Machadinho D'Oeste que teriam um aumento de 638 kg até quase uma tonelada de emissão. Já municípios como Porto Velho, Cacoal e Vilhena teriam impactos menores na emissão de CO₂, podendo ser realizado o *tradeoff* no momento do planejamento estratégico da empresa com outros fatores que impactam na escolha da localização.

4. Considerações finais

Pelo exposto, o presente estudo evidenciou a importância do desenvolvimento de análises capazes de mitigar os custos de transporte, uma vez que esse representa significativa parcela dos custos totais de uma empresa. Para isso, assim como diversos trabalhos, utilizou-se a aplicação do PRV como estratégia capaz de minimizar as distâncias das rotas programadas aos veículos e, conseqüentemente, os custos de transporte.

Ainda, viu-se que a otimização das rotas dos veículos além de serem capazes de diminuir os custos de transporte, também podem acarretar na diminuição da emissão CO₂ na atmosfera. Este é um fator que deve ser levado em consideração quando se busca decidir a melhor localização da instalação de uma empresa, uma vez que o setor de transporte é um dos maiores emissores desse poluente.

Nesse contexto, comprovou-se que a meta-heurística desenvolvida neste trabalho foi capaz de apresentar a melhor cidade para se aportar a instalação de uma empresa de produtos domissanitários no estado de Rondônia sob duas perspectivas: (1) minimização das distâncias e (2) minimização da emissão de CO₂. Assim, sob essas óticas, destaca-se as cidades de Jaru e Porto Velho com 5687 km e 5697 km percorridos pela frota de veículos, respectivamente.

Ainda, quando se insere a concepção ambiental na tomada de decisão, vê-se que ao escolher Jaru como cidade destino da instalação da empresa há a não emissão de 37 kg de CO₂ por parte da segunda rota menos poluente (Porto Velho). Porém, quando comparada a Machadinho D'Oeste com 934 kg a mais de emissão de CO₂, percebe-se a importância que o critério de roteamento dos transportes dos produtos possui sob o ponto de vista ambiental.

Por fim, para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação da metodologia em outros contextos a fim de diversificar os objetos de estudo explorados. Além disso, incertezas podem ser atribuídas aos parâmetros e simulações, à exemplo da Monte Carlo, podem ser aplicadas.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

REFERÊNCIAS

ANSU, V; ANJANEYULU, M. V. L. R.. **Mode choice of food transport considering heterogeneity among shippers using the latent class analysis**. European Transport-Trasporti Europei, v. 80, 2020

CHOPRA, S.; MEINDL, P.. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operação**. 6. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2015.

CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A.; TOTH P. **The Vehicle Routing Problem**. Combinatorial Optimization UMI, 1979.

Confederação Nacional de Transportes - **Transporte é o maior segmento do setor de serviços**
<<https://www.cnt.org.br/analises-transporte>>. Acesso em: 26 de mai. 2021, 2017

CRAVO, G. L.; AMARAL, A. R.S. **A GRASP algorithm for solving large-scale single row facility layout problems**. Computers & Operations Research, v. 106, p. 49-61, 2019.

DRÉO, J.; PÉTROWSKI, A.; SIARRY, P, TAILLARD, E. **Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies**. Springer Sci. Bus. Media, 2006.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. **A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem.** Operations research letters, v. 8, n. 2, p. 67-71, 1989.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GUNAWAN, A. *et al.* **A matheuristic algorithm for the vehicle routing problem with cross-docking.** Applied Soft Computing. v. 103, 2021.

HANSEN, P.; MLADENOVIĆ, N.; TODOSIJEVIĆ, R.; HANAFI, S. **Variable neighborhood search: basics and variants.** EURO Journal on Computational Optimization, v. 5, n. 3, p. 423-454, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. **Metodologia do Censo Demográfico 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2013 (Série Relatórios Metodológicos, v. 41).

IEA. **CO2 emissions from fuel combustion - highlights.** IEA Statistics. International Energy Agency - 2012 Ed., 2012.

LAPORTE, G. **The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms.** European journal of operational research, v. 59, n. 3, p. 345-358, 1992.

LIVANATO, M.; DE SOUZA, A. P. M. **Gestão de custos logísticos na cadeia de suprimentos: um estudo sobre o custo de transporte de cargas.** Anais do XXX ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção), 2010.

PEREIRA, J. A. M.; LIMA, J. F.; STAMM, C. **Um estudo da teoria da localização e das políticas públicas: algumas evidências do caso da região oeste do Paraná.** Desenvolvimento Regional: Processos, Políticas e Transformações Territoriais, Santa Cruz do Sul, 2019.

SIARRY, P.; MICHALEWICZ, Z. **Advances in metaheuristics for hard optimization.** Springer Science & Business Media, 2007.

SOHRABI, S.; ZIARATI, K.; KESHTKARAN, M.. **A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for the Orienteering Problem with Hotel Selection.** European Journal of Operational Research, v. 283, n. 2, p. 426-440, 2020.

SOUZA, M. J. F. **Inteligência Computacional para Otimização.** Notas de Aula - Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em:
<<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>>. Acesso em: 20 de mai 2021. 2011.

TOTH, P.; VIGO, D. **The Vehicle Routing Problem.** Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM, Philadelphia, 2002.

WAZLAWICK, R.S. **Metodologia de pesquisa para Ciência da Computação,** 3.ed.. São Paulo: GEN LTC.

2020.

WEI, R.; LIU, C. **Research on carbon emission reduction in road freight transportation sector based on regulation-compliant route optimization model and case study.** Sustainable Computing-Informatics & Systems, v.28, 2020.

XIAO, Y.; KONAK, A. **A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem.** Journal of Cleaner Production, v. 167, p. 1450-1463, 2017.

XIE, F.; LI, Z. **An Iterative Solution Technique to Minimize the Average Transportation Cost of Capacitated Transportation Problem with Bounds on Rim Conditions.** Asia-Pacific Journal Of Operational Research, v. 37, 2020.