

# UM ESTUDO SOBRE A COLETA DE RESÍDUOS RECICLÁVEIS VIA TÉCNICAS DE PESQUISA OPERACIONAL.

Juliana Verga Shirabayashi (UFPR - Jandaia do Sul) E-mail: juverga@gmail.com

Antonio Henrique Meira (UFPR) E-mail: antoniorick1997@gmail.com

Janete de Paula Ferrareze Silva (UFPR) E-mail: jpfmat@gmail.com

Wesley Vagner Inês Shirabayashi (UFPR) E-mail: wesleyvagner@gmail.com

**Resumo:** A geração de resíduos sólidos a nível nacional é crescente, e tornam-se cada vez mais necessária melhoria na gestão das cadeias de coleta. A integração dos conhecimentos de Pesquisa Operacional e Logística apresentam boas estruturas para aprimoramentos em sistemas que envolvem coleta ou distribuição, além disso com os métodos computacionais existentes, é possível a resolução com resultados próximos ao ótimo. A coleta dos resíduos sólidos pode ser modelada conforme um Problema de Roteamento de Veículos. Este problema possui várias aplicações e métodos para resolução, podendo ser classificados entre exatos e heurísticos. Para a obtenção dos dados e solução, a linguagem de programação *Python*, associada com a linguagem de programação *Julia* permite um bom desenvolvimento, devido aos pacotes livres de otimização, de obtenção, e tratamento de dados. No presente trabalho, estudou-se a otimização das rotas de coleta de recicláveis na cidade de Mandaguari, localizada no estado do Paraná. Foram estudadas duas abordagens para modelagem do problema: no primeiro modelo, foram utilizadas as zonas atuais de coleta empregadas pelo município, já no segundo modelo, foram desenvolvidas novas zonas a fim de otimizar o custo total. Os resultados obtidos pelas duas abordagens foram comparados com o praticado atualmente e foram promissores, mostrando grande aplicabilidade, resultando em melhorias de 18,13% para o primeiro modelo e 20,60% para o segundo. Demonstra-se, assim, alta aplicabilidade para os problemas de Pesquisa Operacional na gestão da coleta de resíduos recicláveis com os métodos utilizados.

**Palavras-chave:** Pesquisa Operacional, Otimização, Resíduos Recicláveis, Métodos Heurísticos.

**Abstract:** National solid waste generation is increasing, and improvements in the management of the entire collection chain are becoming increasingly necessary. The integration of Operational Research and Logistics knowledge presents good structures for improvement in systems involving collection or distribution, and with existing computational methods, resolution with near-optimal results is possible. Solid waste collection can be modeled according to a Vehicle Routing Problem, which has several applications and methods for resolution, and can be classified between exact and heuristic. For data solution and retrieval, the Python programming language associated with the Julia programming language allows for good development due to the free optimization, retrieval, and data handling packages. In the present work, we studied the optimization of recyclable collection routes in the city of Mandaguari, located in the state of Paraná. In the present work two approaches for problem modeling were studied, in the first model the current collection zones used by the municipality were used, while in the second model new zones were developed in order to optimize the total cost. The results obtained by the two approaches were compared with the current one and were promising, showing great applicability, resulting in improvements of 18.13% for the first model and 20.60% for the second one. High applicability to Operational Research problems in the management of recyclable waste collection with the methods used is demonstrated.

**Keywords:** Operational Research, Optimization, Recyclable Waste Heuristic Methods.

## 1. Introdução

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) é crescente em todo mundo (ZHANG; HUANG; HEB, 2011). Com o crescimento de geração de resíduos por pessoa, novas políticas públicas e métodos de gestão devem ser adotados, a fim de reduzir impactos socioambientais (ABRELPE, 2017).

A utilização de métodos científicos para solucionar problemas reais e melhorar a qualidade de vida da população é vantajosa a todos, principalmente tratando-se de problemas de grande complexidade e que envolvam problemas de alto impacto social.

O estudo de modelos de coletas e otimização dos custos se torna uma oportunidade, e a união do estudo da Logística com a Pesquisa Operacional permite grandes avanços para propor soluções para tal problema. Possíveis abordagens para a resolução do problema de coleta de resíduos são o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) junto ao Problema de Caixeiro Viajante (PCV).

Segundo Bing et al (2015, Apud Eriksson et al., 2005), a coleta total dos resíduos recicláveis garante um melhor uso dos recursos naturais, e um menor impacto ambiental e econômico. Porém, segundo Abrelpe (2017), a taxa de recolhimento continua sendo baixa no cenário atual brasileiro, pois estima-se que de todo plástico produzido diariamente no país, 92,8% não são reciclados, e destes, 40,9% são despejados em locais inadequados.

Também, a partir dos estudos de Rodrigues et al.(2016) os custos de coleta chegam a 35,8% de todos os custos empregados em toda cadeia de tratamento de RSU.

Diante dessa problemática, o presente trabalho visa estudar e propor soluções otimizadas nos processos de coleta de resíduos recicláveis da cidade de Mandaguari, situada no norte do estado do Paraná, através de técnicas da Pesquisa Operacional.

## 2. Breve panorama da coleta de resíduos urbanos

O gerenciamento logístico da Coleta de Resíduos Urbanos (RSU) gera preocupação nos municípios por todo o mundo, devido principalmente, a um crescimento na geração de resíduos sólidos, onerando o orçamento municipal com a gestão das cadeias de coleta (ZHANG; HUANG; HEB, 2011).

Métodos de otimização são pouco utilizados para a geração de melhorias em tais coletas. Tal problema ocorre, em muitos casos, pela falta de informação dos órgãos responsáveis quanto à existência desses métodos, devido a baixas divulgações a respeito desse assunto. Além disso, os softwares conhecidos que prestam tais serviços são de alto investimento inicial, causando resistência quanto a sua aplicação, nos casos onde já existe certo interesse sobre o assunto (GUERRERO; MAAS; HOGLAND, 2013).

A geração de RSU no país, no ano de 2017 foi de 78,4 milhões de toneladas, com um crescimento de 1% em relação ao ano de 2016. Esta taxa está acima do percentual do crescimento populacional no mesmo período, que foi de 0.75% (ABRELPE, 2017). No GRÁFICO 1, têm-se o comparativo da taxa acumulada de crescimento da geração de resíduos sólidos urbanos (em vermelho), comparada com a do crescimento populacional (em verde), e vê-se uma distorção significativa entre as taxas. Esta diferença é preocupante no ponto de vista social, ambiental e até mesmo financeiro. Neste contexto, crescem os desafios quanto à gestão das coletas e destinações dos resíduos, onde melhorias, ou até mesmo inovações deverão ser implementadas a fim de atender a crescente demanda.

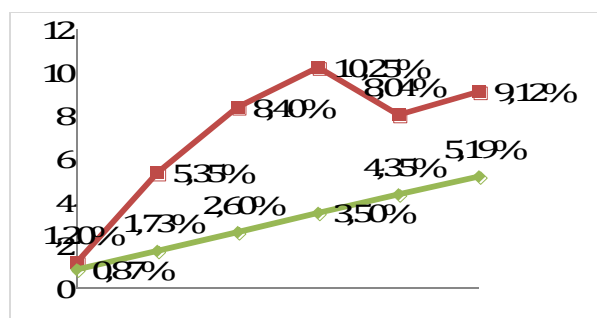


Gráfico 1- taxa de crescimento de geração de RSU versus crescimento populacional.

Cada habitante brasileiro gera cerca de 380 Kg de RSU por ano, e a média de custo para coleta deste é de R\$ 124,80 por habitante no mesmo período. A cidade com o maior custo da gestão de RSU no país é a capital São Paulo, com um total de R\$ 190,80 gastos por habitante anualmente. Destes, R\$ 68,35 são gastos apenas no processo de coleta, que correspondem cerca de 40% do montante total. Dessa forma, uma redução de custos nos processos de coleta, pode trazer reduções consideráveis nos custos totais de toda gestão de RSU (RODRIGUES et al, 2016).

No mundo, alguns dos maiores produtores de resíduo urbano são o Canadá e Estados Unidos, com, em média, 941 kg/habitante ao ano. Vale ressaltar que, embora os países mais desenvolvidos economicamente sejam responsáveis pelas maiores quantidades de gerações de resíduos no mundo, não é apenas a questão econômica que define esta quantidade. Fatores como a cultura, as tecnologias e as políticas públicas do país também são relevantes a serem considerados (WASTE ATLAS, 2019).

O Brasil apresenta um índice de cobertura de coleta de 91,2%. A porcentagem pode parecer alta, porém estima-se que, considerando-se apenas as áreas urbanas, pouco mais de 1,5 milhão de pessoas não possuem acesso à coleta.

Ao analisar a qualidade geral da cadeia de tratamento do RSU no país, segundo a Abrelpe (2017), 40,9% destes resíduos coletados ainda são destinados a locais inadequados. Da porcentagem que não é sequer coletada, não foram encontrados registros formais de destinação, e estimam-se cerca de 570 milhões de toneladas por ano.

Ainda, do total de resíduos gerado no país, embora 30% possua grande potencial de reaproveitamento, apenas 3% são reciclados. Ao comparar com países com maior desenvolvimento na área, como Alemanha, Espanha e Portugal têm-se índices de, respectivamente, 65%, 30% e 26% dos resíduos sendo reciclados. Além disso, tais países têm o índice de cobertura de 100%, coletando todo lixo gerado nas residências e tratando aqueles que não podem ser reciclados em sua totalidade em locais adequados (BING et al, 2015).

No geral, 35.2% dos municípios brasileiros ainda não possuem coletas seletivas, nem sequer programas para conscientização da população. E, mesmo naqueles que possuem as coletas, a aderência da população à campanha ainda é baixa (ABRELPE, 2014). Nos Gráficos 2 e 3, têm-se um comparativo dos recicláveis gerados e do montante de recicláveis coletados. Pode-se observar que a proporção ainda é bem pequena.

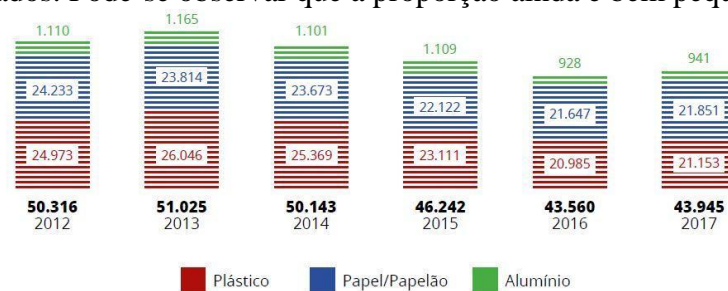


Gráfico 2: quantidade de resíduos recicláveis gerados no Brasil de 2012 a 2017 (T/dia)



Gráfico 3- quantidade de resíduos recicláveis coletados no Brasil de 2012 a 2017(T/dia).

Vê-se que, além da proporção coletada ser baixa, nos momentos em que houve aumentos de geração, o aumento na coleta não foi proporcional a tal crescimento. Tais dados evidenciam a ineficiência nas coletas, apontando a necessidade na ampliação dessa rede, juntamente com a otimização das já existentes. Tal otimização possibilita a liberação de recursos para que maiores quantidades sejam coletadas, e assim, recebendo melhores destinações.

Dessa forma, há uma necessidade real de pesquisa e otimização nas cadeias de coleta de resíduos sólidos, bem como programas de conscientização da população acerca da importância da reciclagem.

### 3. Metodologia de solução

O problema da coleta de resíduos recicláveis pode ser visto como um problema de roteamento de veículos quando consideramos a capacidade do caminhão coletor, janelas de tempo, dentre outros. Outro viés para tal problema é pensar nas rotas dos caminhões coletores, sendo nesse caso, uma variante do problema do caixeiro viajante. Ambos problemas são descritos de forma breve a seguir.

#### 3.1 Problema do caixeiro viajante

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um dos métodos mais estudados na PO, pois é considerado de simples entendimento e possui uma ampla gama de aplicabilidade, nos mais variados problemas. Por tal motivo, é extensivamente estudado, mesmo que a sua solução exata seja árdua em casos de grandes instâncias.

O PCV consiste em, havendo uma série de pontos, traçar uma rota capaz de passar em todos os pontos apenas uma vez, e voltar ao ponto de início, com o menor custo possível. Por exemplo, na FIGURA 1, adaptado para o estudo das coletas de RSU, o ponto inicial é o ponto de despejo, e os pontos de coleta são as localidades onde o caminhão de coleta deve passar. Salienta-se que em casos pequenos como este a complexidade é baixa, mas quando se trata de um município, por exemplo, a complexidade aumenta consideravelmente devido à quantidade de pontos.

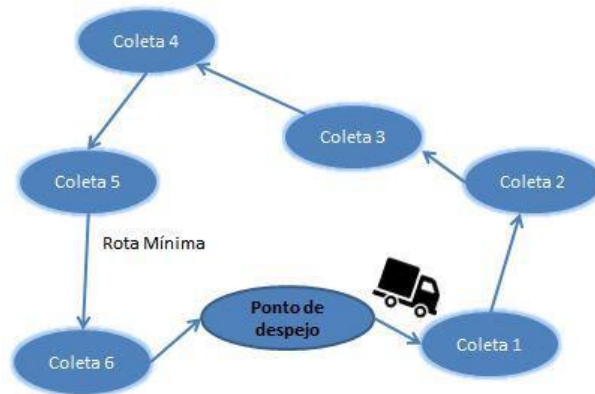


Figura 1: modelo simples de PCV para coleta de RSU.

A seguir, apresenta-se a modelagem matemática do PCV descrita em (1) – (5). É a partir desta modelagem que os algoritmos e métodos de solução são criados.

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \forall j \in N \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in N \tag{3}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, i, j = 1, \dots, n \tag{4}$$

$$x_{ij} = \{0,1\}, i, j = 1, \dots, n \tag{5}$$

A função objetivo (1) busca minimizar o somatório das distâncias entre as cidades da rota. As restrições (2) - (3) garantem que cada cidade  $i \in N$  será visitada apenas uma vez. A restrição (4) garante que não haverá sub-rotas e a restrição (5) define  $x_{ij}$  como variável binária.

### 3.2 Problema de roteamento de veículos

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) é um dos problemas que possuem vasta aplicação na logística, devido sua alta versatilidade e possibilidade de adaptação. O problema consiste em, basicamente, buscar a programação ideal para que todos os pontos de certa demanda existente sejam satisfeitos, utilizando-se da mínima quantidade de recursos necessários, de maneira a minimizar o custo total (MUNARI; TWAN; SPLIET, 2017).

Quanto à aplicabilidade do problema no caso específico das coletas de RSU, genericamente, há um conjunto de pontos de coletas que devem ser atendidos por determinado conjunto de caminhões, dada certa periodicidade em cada região da cidade. Nesse problema, busca-se a divisão da região de coleta da forma mais efetiva possível, a fim de criar a melhor programação entre os caminhões. Busca-se ainda, garantir a cobertura total da coleta, a partir do uso adequado dos recursos correntes e a minimização dos custos totais com a coleta (SOUZA, 2013). A FIGURA 2 mostra um exemplo simples do PRV, aplicado a coleta dos RSU, onde cada caminhão segue sua rota determinada, passando pelos pontos de recolhimento. Para problemas de dimensões maiores, como a coleta real de um município, por exemplo, tem-se grandes quantidades de pontos a serem

percorridos, que podem ser as ruas, as esquinas, as bandeiras, ou até mesmo as casas de um município.

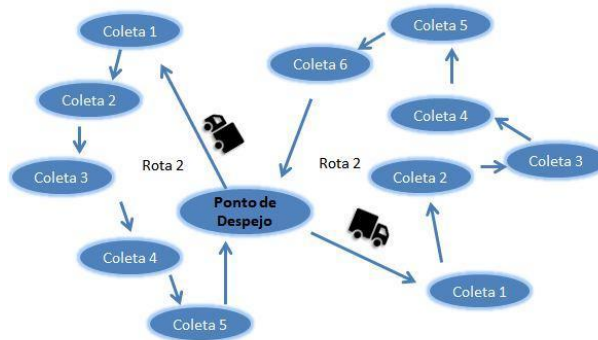


Figura 2- modelo simples de roteamento de veículos para coleta de RSU.

A modelagem matemática do PRV é descrita em (6) – (12), de acordo com MUNARI et al (2017) .

$$\min z = \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{n+1} c_{ij} x_{ij} \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = 1, j \neq i, i = 1, \dots, n \tag{7}$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ih} - \sum_{j=1}^{n+1} x_{hj} = 0, i \neq h, j \neq h, h = 1, \dots, n \tag{8}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} \leq K \tag{9}$$

$$y_j \geq y_i + q_j x_{ij} - Q(1 - x_{ij}), i, j = 0, \dots, n + 1 \tag{10}$$

$$d_i \leq y_i \leq Q, i = 0, \dots, n + 1 \tag{11}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, i, j = 0, \dots, n + 1 \tag{12}$$

A função objetivo (6) busca minimizar as distâncias dentro das rotas, já a restrição (7) garante que cada ponto seja visitado exatamente uma vez. A restrição (8) garante o funcionamento dentro dos arcos, garantindo que se um veículo chega a um determinado nó  $h \in N$  , onde  $N$  é o conjunto de todos os nós, deve-se sair do nó; já a restrição (9) limita o número máximo de rotas para  $K$ , o número de veículos. As restrições (10) e (11) asseguram que a capacidade dos veículos não seja excedida. Por fim, a restrição (12) garante que a variável de decisão seja binária (MUNARI; TWAN; SPLIET, 2017).

#### 4. Estudo de caso

O estudo foi realizado na ACAMAN (Associação dos Catadores de Mandaguari), que realiza a coleta de resíduos recicláveis da cidade de Mandaguari-PR, no norte do estado do Paraná. O município conta com 34.281 habitantes (IBGE, 2018), e possui economia forte, com uma grande quantidade de pequenas e médias empresas.

A coleta dos recicláveis é feita quatro vezes por semana, na segunda, terça, quinta e sexta-Feira, onde é dividida também por quatro setores da cidade, onde cada



setor é visitado duas vezes por semana, sendo coletada por dois caminhões. A cobertura não possui restrições pois atualmente consegue-se atingir a demanda com o modelo atual.

No presente estudo, busca-se otimizar as rotas atuais da coleta de resíduos na cidade de Mandaguari, comparando o modelo atual com o modelo otimizado. Foram analisados dois cenários, aquele onde se mantêm as zonas atuais, para fins de simplificação, evitando preocupações como adaptações da população às mudanças nos dias das coletas, e aquele onde são criadas novas zonas, a fim de observar o melhor cenário possível.

No cenário atual, de acordo com os dados fornecidos pela empresa, tem-se uma média de 791,9 km percorridos todo mês para a coleta dos resíduos calculados sobre o primeiro semestre de 2018. Sabendo que mudanças significativas não ocorreram no período, tal média será utilizada como comparativo de melhoria.

Na FIGURA 3, apresenta-se os pontos de intersecções das ruas da cidade. No presente trabalho considera-se como ponto de coleta as esquinas (intersecções entre ruas) para facilitação da resolução e também para aproximar-se à realidade.

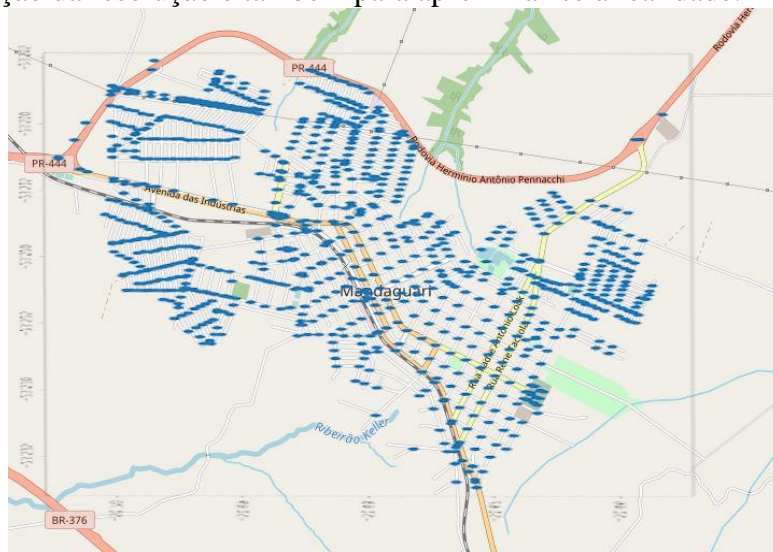


Figura 3- pontos de intersecções das ruas da cidade.

Atualmente, no município, a coleta é feita em formato de bandeiras, onde parte dos colaboradores vão à frente do caminhão, coletando os resíduos e formando um pequeno estoque em determinados pontos para que o caminhão colete, a fim de reduzir o movimento do caminhão. Os coletores levam o resíduo para as bandeiras mais próximas.

Notou-se durante o trabalho grande dificuldade de obter-se os dados dos caminhos utilizados atualmente pela equipe de operação da coleta, devido principalmente, a falta de padronização das rotas, que acabam variando de forma não controlada, então, para comparativo será utilizado apenas uma média de custos em quilômetros do modelo atual e uma possível melhoria.

Vale salientar que, devido ao alto volume de dados, para a obtenção dos pontos das esquinas foi necessário um refinamento manual, devido à quantidade de pontos duplicados ou fora da realidade.

Na FIGURA 4, vê-se o modelo do município dividido entre as zonas atuais da cidade.

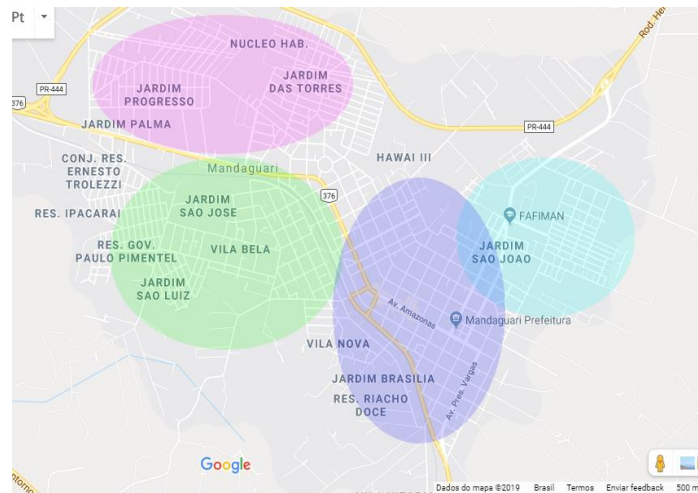


Figura 4 – zonas atuais da cidade.

No presente estudo, devido às características locais e necessidades da gestão do município, realizou-se um estudo com as mesmas zonas utilizadas atualmente, que representam alguns benefícios e desvantagens, descritos na TABELA 1.

TABELA 1- pontos positivos e negativos das divisões.

Pontos positivos	Pontos negativos
Facilita a adequação da população ao novo modelo (sem impactos na cultura atual, não serão alterados os dias de coleta)	Roteamento pode estar longe do ótimo global
Facilita a gestão do município, sem gastos com novas divulgações das novas zonas de coleta	
Facilita o trabalho dos coletores, que já trabalham com os mesmos modelos atuais	

Fonte: O Autor (2019).

É necessário um teste de roteamento, com a utilização de novas zonas, para testar a proximidade do modelo criado conforme o problema, com um ótimo local calculado computacionalmente.

Desta forma têm-se dois modelos de resolução: o primeiro utilizando as zonas atuais da cidade e minimizando as rotas dentro de cada zona, respeitando as restrições do problema; e o segundo, de forma a criar novas zonas com o objetivo de chegar a uma melhoria do modelo como um todo.

#### 4.1 Modelo 1 – ZONAS ATUAIS

A divisão dos pontos de acordo com as zonas atuais foi feita manualmente, de acordo com o formato atual, disponibilizado pela empresa, e observado na FIGURA 5. O mesmo é utilizado para conscientizar a população dos dias e bairros da coleta de recicláveis.



CONHEÇA A ROTA DA COLETA SELETIVA EM MANDAGUARI.	
DIAS DA SEMANA	BAIRRO
Segundas e quintas-feiras	Jardim Palma, Vila Dizolina, Ernesto Trolezzi, Ipacaray, Paulo Pimentel, Sumaré, Nova América, Tancredo Neves, Vila Verde, Ouro Verde, Esplanada, Vila Bela, São José, Mônaco, Vila Nova, Riacho Doce, São Marcos, Conj. Mandaguari, Brasília
Terças e sextas-feiras	Popular I, Planalto, Padre Max Kauffmann, Progresso I e II, Oásis, Morumbi, Jardim das Torres, América, Delgado, Lorena, Imperial, Jardim do Sol, Cristina I, II e III, Gleba Rib. Vitória, Roque Pedroni, Parque Industrial II, Jardim Paraná, Centro/Ginásio de Esportes
Terças e sextas-feiras	Centro/Ginásio de Esportes, Brasil, Havai, Jardim Brianezzi, Parque Independência, Itália, Bela Vista, Cavenaghi, São João
Segundas e quintas-feiras	Centro/Praça Miquelotte, Madrid, Jardim Recanto, Jardim Pinheiro Boa Vista, Jardim da Mata, Jardim Primavera, Novo Horizonte, Social, Alípio Costa, Parque Industrial III, Vila Vitória

Figura 5- zonas atuais.

Na FIGURA 6, têm-se a representação visual das rotas de coleta que foram otimizadas, respeitando as zonas utilizadas atualmente na cidade de Mandaguari.

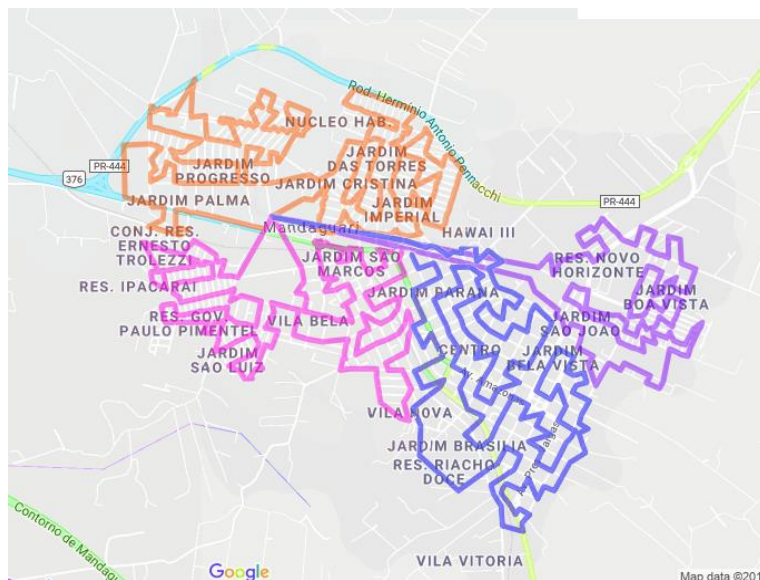


Figura 6- rotas com as zonas atuais.

Na TABELA 2, pode ser observada a quilometragem empregada na nova rota de coleta, utilizando as zonas atuais.

Tabela 2- quilometragem da nova rota.

Clusters	Custo (Km)
1	21,117
2	17,377
3	15,182
4	20,863

Fonte: O Autor (2019).

Então, utilizando o modelo atual, onde cada zona é atendida pelo menos duas vezes por semana, têm-se a quilometragem mensal de 647,743 km/mês, utilizando fator de aproximação com 4,345 semanas/Mês.

#### 4.2 Modelo 2 – NOVAS ZONAS

Uma forma simples de divisão de um grupo de coordenadas em áreas de designação de rotas, é a utilização de uma heurística de mineração de dados, o *k-means*. O *k-means* é um método de clusterização que consiste em dividir um número *n* de dados em *k* partições, a fim de formar grupos por características mais próximas entre si, no presente caso, a distância entre eles. O problema de clusterização é um problema considerado NP-Difícil, porém existem heurísticas que convergem ao ótimo em um tempo relativamente curto. Para facilitar a utilização, neste trabalho foi usado um pacote de clusterização suportado pela linguagem Júlia, uma linguagem nova, rápida, que vem ganhando muita aceitação na área da PO devido seu grande suporte a problemas de otimização.

Para os casos nos quais se desconsidera a capacidade de carga dos veículos, o *k-means* atua com êxito. Para os casos em que a carga é considerada, Problema de Roteamento de Veículos com Capacidade (PRVC) temos que adequar o algoritmo, ou buscar outras soluções heurísticas.

A partir do momento em que se têm as divisões para cada área de designação de rotas, pode-se dividir nossa primeira matriz de distância em vários grupos de acordo com cada cluster. Estas matrizes secundárias serão importantes para a próxima etapa da heurística de resolução do Problema do Caixeiro Viajante.

Para a obtenção de um modelo mais próximo do ótimo, foi realizada uma análise para encontrar a melhor maneira de dividir a cidade em clusters. O método utilizado visa criar as zonas de modo a otimizar a distância entre os pontos do cluster e seu ponto médio. Obtém-se então, a divisão apresentada na FIGURA 7, onde os clusters e as rotas estão otimizadas.

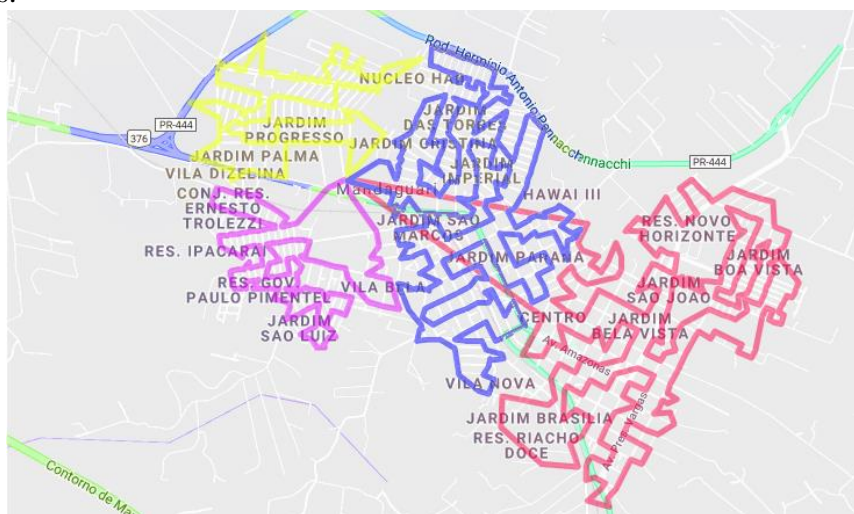


Figura 7- novas zonas.

Na TABELA 3, apresenta-se a quilometragem empregada na nova rota, utilizando as zonas otimizadas.

Tabela 3 – quilometragem obtida com as zonas otimizadas.

Clusters	Custo (Km)
1	10,996
2	10,035
3	28,431
4	22,824

Fonte: O Autor (2019).

Utilizando o modelo obtido, onde cada zona é atendida pelo menos duas vezes por semana, obtém-se um custo mensal de 628,165 km/Mês, utilizando fator de aproximação com 4,345 semanas/Mês. Na TABELA 4, são apresentadas as melhorias dos modelos

obtidos, em comparação com a média de custo fornecida pela empresa de coleta de resíduos sólidos recicláveis.

Tabela 4 – melhorias obtidas.

Modelo	Custo em KM	Varição do Atual
Modelo Atual	791,2	
Modelo I	647,743	18,13%
Modelo II	628,165	20,60%

FONTE: O Autor (2019).

Comparando as soluções obtidas através do Modelo I e do Modelo II, observa-se boa redução na quantidade de quilômetros rodados, que gera uma economia considerável em termos de gastos com a coleta. Além disso, acarreta economias com manutenção de veículos e colabora com o meio ambiente, pois ao reduzir a rota, emitem-se menos poluentes.

## 5. Considerações finais

A aplicação de técnicas de PO desafia pesquisadores a desenvolverem novas abordagens e métodos, a fim de buscar soluções otimizadas de problemas complexos de forma eficiente.

A partir da solução obtida, pode ser constatada uma redução do custo empregado nas rotas de coleta de resíduos recicláveis em ambas as abordagens. Vale salientar que as percentagens atingidas podem não ser obtidas na prática devido às exigências, restrições e características não abordadas pelo modelo.

No modelo I vê-se uma redução de aproximadamente 18% dos custos de coleta, já no modelo II obtemos uma redução aproximadamente de 21%. Houve baixa variação do modelo II para o modelo I, onde a única característica distinta são as zonas aplicadas em cada um deles. Isso pode ser explicado devido a, principalmente, a cidade ser distribuída em bairros de pequeno porte, facilitando a orientação e divisão de zonas, sem a necessidade de estudos aprofundados.

Observa-se também que, a baixa diferença entre os resultados obtidos nos modelos gera maior disposição na aplicação do modelo I, continuando com as mesmas zonas e melhorando as rotas. Leva-se em consideração, principalmente, as questões de simplificação, reduzindo possíveis resistências a mudanças, por parte dos coletores e habitantes.

Neste estudo, as capacidades dos veículos coletores não foram consideradas, pois segundo os relatos junto à ACAMAN, a mesma raramente é excedida.

Também vale ressaltar que, pelo alto volume de dados, existe grande dificuldade em seu tratamento. Isto gera a necessidade de um tempo maior para o refinamento, principalmente dos dados de entrada, como as coordenadas, pois pequenos erros podem gerar soluções finais com baixa confiabilidade.

Conclui-se com uma boa redução dos custos empregados na coleta de resíduos sólidos recicláveis da cidade de Mandaguari-PR, dando oportunidades para estudos posteriores com cidades de portes maiores e com maiores restrições.

## Referências

ABRELPE, 2012 a 2017. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais*. Disponível em: < <http://abrelpe.org.br/panorama>>. Acesso 22 de Abril, 2020.

**BING, X., BLOEMHOF, J.M., RAMOS, T.R.P., BARBOSA-POVOA, A.P., WONG, C.Y., VORST, J.G.A.J.** *Research challenges in municipal solid waste logistics management.* Waste Management. Vol. 48 (1), p. 220-232, 2016.

**GUERRERO, L.A., MAAS, G., HOGLAND, H.** *Solid waste management challenges for cities in developing countries.* Waste management. Vol. 33 (1), p. 220-232, 2013.

**MUNARI, P., DOLLEVOET, T., SPLIET, R.** *A generalized formulation for vehicle routing problems, 2017.* Disponível em:  
<[https://www.researchgate.net/publication/303840066\\_A\\_generalized\\_formulation\\_for\\_vehicle\\_routing\\_problems/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/303840066_A_generalized_formulation_for_vehicle_routing_problems/citation/download)>

**RODRIGUES, W., FILHO, L. N.L., PEREIRA, R. S.** *Análise dos determinantes dos custos de resíduos sólidos urbanos nas capitais estaduais brasileiras.* urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana, Curitiba, Vol. 8, n. 1, p. 130-141, 2016.

**SILVA, A. C. S, FILHO, V. J. M.** *Sistemas de roteirização e programação de veículos.* Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, 21(2), 223-232, 2001.

**TIWARI, N. K., SANDILYA, S.K.** *Operational Research.* New Delphi: Prentice-Hall, 2006.

**WASTE ATLAS. (2019).** *Acesso em 03 de junho de 2019, disponível em WASTE ATLAS:* <http://www.atlas.d-waste.com/>

**ZHANG, M., Huang, G. H. , HE, L.** *An inexact reverse logistics model for municipal solid waste management systems.* Journal of environmental management. Vol. 92(3). 522-530, 2010. DOI: [10.1016/j.jenvman.2010.09.011](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.011) .