

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO

Alan Gonçalves Fonseca

**Caracterização e avaliação do potencial de otimização da etapa de coleta de
resíduos sólidos domiciliares: Estudo de caso do município de Muriaé - MG**

Juiz de Fora
2024

Alan Gonçalves Fonseca

Caracterização e avaliação do potencial de otimização da etapa de coleta de resíduos sólidos domiciliares: Estudo de caso do município de Muriaé - MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Ambiente Construído.

Orientador: Dr. Samuel Rodrigues Castro

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Fonseca, Alan Gonçalves.

Caracterização e avaliação do potencial de otimização da etapa de coleta de resíduos sólidos domiciliares: Estudo de caso do município de Muriaé - MG / Alan Gonçalves Fonseca. -- 2024.

133 p. : il.

Orientador: Samuel Rodrigues Castro

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2024.

1. Gerenciamento de resíduos. 2. RSU. 3. Otimização. 4. Roteirização. 5. Frota de coleta. I. Castro, Samuel Rodrigues, orient.

Alan Gonçalves Fonseca

Caracterização e avaliação do potencial de otimização da etapa de coleta de resíduos sólidos domiciliares: Estudo de caso do município de Muriaé - MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Ambiente Construído.

Aprovada em 14 de outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Dr. Samuel Rodrigues Castro - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Otavio Eurico de Aquino Branco
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dra. Tatiana Tavares Rodriguez
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dra. Gisele Vidal Vimieiro
Centros Federais de Educação Tecnológica



Documento assinado eletronicamente por **Samuel Rodrigues Castro, Professor(a)**, em 15/10/2024, às 09:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gisele Vidal Vimieiro, Usuário Externo**, em 15/10/2024, às 12:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Tavares Rodriguez, Professor(a)**, em 15/10/2024, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Otávio Eurico de Aquino Branco, Professor(a)**, em 25/10/2024, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufff (www2.ufff.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1997497** e o código CRC **BF71728A**.

Dedico este trabalho aos meus pais e minha família que me inspiram e me auxiliaram na realização...

AGRADECIMENTOS

“Prefiram a minha instrução à prata, e o conhecimento ao ouro puro, pois a sabedoria é mais preciosa do que rubis; nada do que vocês possam desejar compare-se a ela.” (Provérbios 8.10-13)

Agradeço a conclusão dessa etapa ao meu orientador Dr. Samuel Castro, por sempre estar ao meu lado, pela parceria, sororidade, apoio, amizade e empatia.

À minha família, meus pais pelo carinho e incentivo. Minha irmã Gabriela pelo amor e cuidado.

À autarquia Departamento de Saneamento Urbano de Muriaé, pelo apoio e incentivo. Em especial, ao Diretor da Divisão de Águas e Esgoto João Ciribelli, a Diretora Geral Maria da Consolação e a todo o Setor Técnico, pela parceria da caminhada.

À família Fardim, por me acolherem em Juiz de Fora com tanto conforto, motivação e cuidado.

Ao estagiário Brenner Braz, por ter sido um apoio nas atividades de campo e levantamento de dados, com atenção e comprometimento.

À Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte, por prontamente me auxiliarem com dúvidas e materiais para que pudesse compreender a coleta de RSU na capital de Minas Gerais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído (PROAC) e à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo ensino gratuito e de excelência. Sem dúvidas vocês são agentes públicos de extrema relevância para a pesquisa científica brasileira.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar)

RESUMO

O aumento populacional, industrial e econômico intensifica os desafios na gestão de resíduos sólidos urbano, especialmente nos grandes centros urbanos, gerando preocupação acerca de temas como sustentabilidade, logística reversa e economia circular. A má gestão dos resíduos sólidos traz impactos negativos para o meio ambiente e a saúde pública, gerando problemas como poluição e doenças transmitidas por vetores. A coleta de resíduos sólidos é uma das etapas mais relevantes do gerenciamento de RSU representando até 70% dos custos totais da gestão de resíduos. Uma coleta eficiente é essencial para o desenvolvimento sustentável das cidades, e a escolha dos métodos de coleta deve considerar aspectos ambientais, tecnológicos, sociais e econômicos. O trabalho tem por objetivo caracterizar a coleta de resíduos sólidos domiciliares de Muriaé-MG, onde o serviço é coordenado pelo Departamento de Limpeza Urbana do DEMSUR, evidenciando um potencial de otimização. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi realizado um levantamento via *web* busca de dados, planos, leis e trabalhos científicos sobre coleta de resíduos sólidos urbano. Concomitante, foi realizado o levantamento de dados junto ao Departamento Municipal de Saneamento Urbano de Muriaé, com tratamento e compilação de todas as informações. Os resultados apontaram uma eficiência média de 75% do sistema de coleta de resíduos domiciliares do município. Se tratando da representatividade financeira da etapa de coleta, o potencial de otimização representa uma economia considerável para a administração pública local. Espera-se que as informações e indicadores levantados no presente estudo subsidiem a otimização e a tomada de decisão para a prestação de serviços de coleta de resíduos com maior qualidade e eficiência, promovendo medidas mais sustentáveis nos serviços públicos e permitindo uma economia financeira para atendimento às várias demandas.

Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos. RSU. Otimização. Roteirização. Frota de coleta.

ABSTRACT

Population growth, industrialization, and economic development intensify the challenges associated with urban solid waste management, particularly in large urban centers, raising concerns regarding sustainability, reverse logistics, and the circular economy. Inadequate solid waste management results in adverse environmental and public health impacts, including pollution and vector-borne diseases. Among the stages of urban solid waste (USW) management, waste collection represents one of the most significant, accounting for up to 70% of total management costs. Efficient waste collection is critical to the sustainable development of cities, and the selection of collection methods must integrate environmental, technological, social, and economic considerations. This study aims to characterize household solid waste collection in Muriaé, Minas Gerais, Brazil, where services are managed by the Urban Cleaning Department of DEMSUR, emphasizing optimization opportunities. The research methodology involved a web-based survey of relevant data, plans, legislation, and scientific studies on urban solid waste collection. Additionally, data were collected from the Municipal Department of Urban Sanitation in Muriaé, followed by processing and compilation of all information. The findings revealed an average efficiency of 75% in the household waste collection system within the municipality. Given the financial relevance of the collection stage, optimization efforts present a significant opportunity for cost savings in local public administration. The information and indicators provided in this study are expected to support the optimization and decision-making processes, enhancing the quality and efficiency of waste collection services. Furthermore, the study advocates for sustainable public service measures, contributing to financial savings while addressing diverse municipal demands..

Keywords: Waste management. MSW. Optimization. Routing. Collection fleet.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Linha do tempo do arcabouço legal | 25 |
| Figura 2 – Taxa de cobertura de coleta de RSU no Brasil | 33 |
| Figura 3 – Parâmetros para roteirização | 43 |
| Figura 4 - Aterro sanitário de Muriaé-MG | 66 |
| Figura 5 – Reunião com colaboradores DEMSUR | 68 |
| Figura 6 – Rotas de coleta de RSD em Muriaé | 76 |
| Figura 7 – Determinação do 3º quartil das coletas | 80 |
| Figura 8 – Teste estatístico de comparações múltiplas das eficiências das coletas . | 83 |
| Figura 9 – Coleta de RSD por dia da semana (tonelada)..... | 85 |
| Figura 10 - Teste estatístico de comparações múltiplas para resíduos coletados por rotas | 90 |
| Figura 11 - Teste estatístico de comparações múltiplas para resíduos coletados por rotas. | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Índices FUNASA..... | 72 |
| Tabela 2 – Índices IBRAOP..... | 72 |
| Tabela 3 – Informações das rotas de coleta de RSD | 74 |
| Tabela 4 - Dados da coleta de RSD e indicadores de Muriaé - MG..... | 81 |
| Tabela 5 – Indicadores geral da coleta de RSD de Muriaé-MG | 83 |
| Tabela 7 – Quantidade de RSD e eficiência por frequência de coleta | 84 |
| Tabela 8 – Dimensionamento de frota para coleta de RSD | 87 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ANA | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico |
| ACV | Análise de Ciclo de Vida |
| AECV | Análise Econômica de Ciclo de Vida |
| ACVS | Análise de Ciclo de Vida Social |
| CO2 | Dióxido de Carbono |
| DLU | Departamento de Limpeza Urbana |
| DEMAE | Departamento Municipal de Águas e Esgotos |
| DEMLURB | Departamento Municipal de Limpeza Urbana |
| DEMSUR | Departamento Municipal de Saneamento Básico |
| ETLP | Estação de Tratamento de Lixiviados e Percolados |
| FUNASA | Fundação Nacional de Saúde |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| NMSB | Novo Marco do Saneamento Básico |
| PEAD | Polietileno de Alta Densidade |
| PEOF | Posto de Entrega de Óleo de Fritura |
| PERE | Posto de Entrega de Resíduos |
| PEV | Posto de Entrega Voluntária |
| PGRCC | Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PLANARES | Plano Nacional de Resíduos Sólidos |
| PLANASA | Plano Nacional de Saneamento |
| PLANSAB | Plano Nacional de Saneamento Básico |
| PMGIRS | Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos |
| PMSB | Planos Municipais de Saneamento Básico |
| PNRS | Política Nacional dos Resíduos Sólidos |
| PPP | Parcerias Público-Privadas |
| RCC | Resíduos da Construção Civil |
| RECICLA+ | Certificado de Crédito de Reciclagem |
| RIDE | Região Integrada de Desenvolvimento |

| | |
|--------|--|
| RM | Região Metropolitana |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| SERIPA | Serviço Regional de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos |
| SEPA | Agência de Proteção Ambiental da Suécia |
| SESP | Serviço Especial de Saúde Pública |
| SLU | Superintendência de Limpeza Urbana |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica |
| SINIR | Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos |
| SNIS | Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos |
| UDCs | Unidades de Destino Certo |
| UFM'S | Unidade Fiscal Municipal |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 OBJETIVOS | 19 |
| 1.1.1 Objetivo geral | 19 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 19 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 20 |
| 2.1 GESTÃO DE RSU NO BRASIL..... | 20 |
| 2.2 ARCABOUÇO LEGAL..... | 25 |
| 2.3 COLETA DE RSU | 33 |
| 2.3.1 Belo Horizonte | 38 |
| 2.3.2 Porto Alegre | 39 |
| 2.3.4 Ipatinga | 41 |
| 2.4 LOGÍSTICA DA COLETA | 42 |
| 2.4.1 Roteirização | 42 |
| 2.4.2 Eficiência da coleta de RSU | 48 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 61 |
| 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA | 61 |
| 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO: MURIAÉ-MG | 62 |
| 3.3 GERENCIAMENTO DE RSU EM MURIAÉ - MG | 63 |
| 3.4 COLETA NO MUNICÍPIO: LEVANTAMENTO DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO | 67 |
| 3.5 INDICADORES DE OPERAÇÃO | 69 |
| 3.5.1 Eficiência mássica de coleta | 69 |
| 3.5.2 Dimensionamento da frota | 71 |
| 3.6 TRATAMENTO DE DADOS | 73 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 74 |

| | |
|---|------------|
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROTAS E VEÍCULOS | 74 |
| 4.2 EFICIÊNCIA MÁSSICA DE COLETA..... | 79 |
| 4.3 DIMENSIONAMENTO DA FROTA..... | 86 |
| 4.4 DETALHAMENTO DE R2, R8 E R12..... | 89 |
| 5 CONCLUSÃO | 93 |
| REFERÊNCIA | 96 |
| ANEXO I..... | 112 |
| ANEXO II..... | 119 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o IBGE (2022), o Brasil apresenta crescimento populacional em relação aos últimos anos e projeta aumento demográfico para os próximos. Apenas no ano de 2047, com uma população estimada em 233.233.670 habitantes, projetou-se o início do processo de declínio populacional.

À medida que os grandes centros urbanos se tornam mais complexos e diversificados em termos populacionais, a gestão dos resíduos sólidos urbanos emerge como um dos principais desafios para governos e sociedade civil, especialmente nos países em desenvolvimento, onde o planejamento adequado ainda é deficiente. Este problema está intimamente relacionado aos conceitos de sustentabilidade e, mais recentemente, a temas como logística reversa, mineração urbana, simbiose industrial e economia circular, tornando-se uma preocupação crescente para governos, técnicos, pesquisadores e organizações da sociedade civil (Rodrigues *et al*, 2019).

Ferrão e Moraes (2021) reforçam a análise do aumento do volume de Resíduos Sólidos Urbano (RSU), gerado pelo grande crescimento populacional, industrial e econômico, salientando que uma gestão inadequada traz impactos negativos para o meio ambiente além de problemas de saúde pública (doenças relacionadas a insetos, roedores) e diferentes formas de poluição.

Segundo Godecke e Walerko (2015), a gestão inadequada de resíduos sólidos impacta negativamente as três dimensões da sustentabilidade: social, econômica e ambiental. No âmbito social, contribui para a proliferação de vetores de doenças; no econômico, gera custos elevados de gestão; e no ambiental, provoca poluição do solo, da água e do ar, além de emissões de gases de efeito estufa, que intensificam o aquecimento global. Entretanto, Rodrigues *et al*. (2019) destacam que, sob a perspectiva econômica, esses custos podem gerar empregos e renda, especialmente para populações em situação de vulnerabilidade social.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b), regulamentada pelo Decreto Federal nº 7.404/2010 (Brasil, 2010a) (que foi revogado e substituído pelo Decreto Federal 10.936/2022), foi um marco legal na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos no país e, dentre muitas inovações estabelecidas, estimula a implantação da coleta seletiva,

preferencialmente por meio do estabelecimento de contratos de prestação de serviços com cooperativas de catadores constituídas por pessoas físicas de baixa renda, conforme descrito no artigo 36, dentre outros regulamentos para gerenciamento de RSU (Brasil, 2010b).

Entre as diversas atividades envolvidas na gestão de resíduos urbanos, a coleta é uma das mais significativas, tanto em termos de custo quanto pelos impactos potenciais na qualidade do ambiente urbano, podendo representar até 70% dos custos totais da gestão de resíduos (Hempe; Nogueira, 2012; Di Maria; Micale; Morettini, 2016). A coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) em um sistema integrado é crucial para o desenvolvimento sustentável dos centros urbanos.

Os sistemas tradicionais de gestão de resíduos municipais dependem da coleta e armazenamento de resíduos em lixeiras até sua coleta e transporte por uma agência local de gestão de resíduos (Farré *et al.*, 2021). A coleta de RSU é um processo complexo, no qual problemas com prestadores de serviço ou falhas no equipamento podem causar grandes transtornos para a sociedade (Velloso *et al.*, 1997). Além disso, os trabalhadores envolvidos na coleta estão expostos a diversos riscos: físicos, mecânicos, ergonômicos e biológicos (Velloso *et al.*, 1997).

Cabe aos gestores municipais a responsabilidade de escolher o tipo de coleta, transporte e destino final adequado para os resíduos. Esses serviços podem ser oferecidos pelo próprio município ou por meio da contratação de empresas através de licitação. A administração dessas atividades requer cuidados na escolha das melhores alternativas do ponto de vista ambiental, social e econômico (Ferrão; Moraes, 2021). Dessa forma, a gestão sustentável de RSU necessita de métodos de avaliação ambiental adequados que apontem a viabilidade das estratégias de gestão de resíduos sólidos urbanos (Ripa *et al.*, 2016).

Atualmente, diferentes tipos de sistemas de coleta de RSU estão sendo implementados em cidades modernas. As decisões de investimento em novos métodos de coleta devem ser justificadas em termos de viabilidade ambiental, tecnológica, social e econômica (Laurieri *et al.*, 2020).

No município de Muriaé-MG, o órgão responsável pelo gerenciamento de RSU é a autarquia denominada Departamento de Municipal de Saneamento Básico

de Muriaé (DEMSUR). Dentro do DEMSUR, a coleta de RSU e limpeza urbana é coordenada pelo Departamento de Limpeza Urbana (DLU).

O município conta com coletas diurnas e noturnas, sendo realizadas por caminhões compactadores em sua maioria, direcionando os RSU para o aterro sanitário de Muriaé, que se localiza a um raio de 6 km do núcleo populacional. Todos os RSU que chegam ao aterro sanitário são pesados, buscando ter um controle do aterro e dados para tomadas de decisão pela diretoria do DEMSUR. Com esses dados e outras informações levantadas, este trabalho realizará a análise da coleta dos RSU de Muriaé, levantando as seguintes questões: quais as características da coleta de RSU? Existem rotas em excesso? Existem rotas sobrecarregadas e outras “folgadas”? As coletas de RSU estão sendo realizadas de forma eficiente em relação a logística? Quais dados podem indicar essas análises? É possível reduzir o número de caminhões? O que poderia ser feito para ter uma gestão mais eficiente?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem por objetivo geral caracterizar a coleta convencional de Resíduos Sólidos Domiciliares na cidade de Muriaé, a partir de dados e informações obtidos *in loco*, no aterro sanitário do município, e junto ao Departamento de Limpeza Urbana do DEMSUR, com vistas à identificação de possíveis melhorias e otimização.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, cita-se:

- Descrever e examinar as rotas atuais de coleta convencional, identificando pontos críticos.
- Compilar dados levantados sobre a coleta de RSD, chegando a indicadores do serviço.
- Realizar análise comparativa, tendo como base outros sistemas de coleta encontrados na literatura e Municípios.
- Propor possíveis ações de melhoria na logística da coleta de RSD que podem reduzir custos e melhorar a qualidade da etapa coleta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GESTÃO DE RSU NO BRASIL

A população mundial tem aumentado continuamente a um ritmo acelerado, atingindo mais de 7 bilhões de pessoas na era atual. Este crescimento populacional é acompanhado por um aumento significativo na geração de resíduos, tornando a gestão ambientalmente adequada essencial para mitigar os problemas advindos. Logo, a gestão de RSU é uma preocupação global à medida que as populações urbanas continuam a crescer e os padrões de consumo permanecem inalterados (Spot *et al.*, 2023).

O gerenciamento de RSU tem se tornado um tema central em diversas áreas de estudo, emergindo como um dos grandes desafios para as cidades. Os RSU incluem resíduos gerados por atividades domésticas, varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, além de outros serviços de limpeza urbana. Com o passar do tempo, esses resíduos sofreram alterações quantitativas e qualitativas; entretanto, a gestão desses resíduos não acompanhou as evoluções tecnológicas na produção. As consequências desse descompasso são significativas tanto para o meio ambiente quanto para a saúde pública (Spot *et al.*, 2023).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 define a gestão integrada de resíduos sólidos urbanos como o conjunto de ações direcionadas a encontrar soluções para esses resíduos. Essas ações devem considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com a participação da sociedade e baseadas no princípio do desenvolvimento sustentável (Brasil, 2010b).

A Lei Nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b), que instituiu a PNRS, apresenta de forma fragmentada seis elementos funcionais que demonstram as fases do gerenciamento, sendo eles: a coleta, o transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Sendo instituída, em 2020, a Atualização do Marco do Saneamento Básico (AMSB), estabelecido pela Lei nº 14.026/2020 (Brasil, 2020), a gestão dos resíduos sólidos ganhou destaque sendo um dos principais pilares do saneamento básico, ao lado do abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, e drenagem e manejo das águas pluviais.

Nesse contexto, é relevante destacar que, apesar de os resíduos sólidos serem considerados uma parte integrante do saneamento básico, a regulamentação desse setor pelos municípios brasileiros ainda é bastante limitada. Em 2022, somente 411 dos 5.568 municípios no Brasil possuíam agências reguladoras específicas para resíduos sólidos. Logo, a instituição da AMSB e a Agência Nacional de Águas (ANA) como órgão responsável pelo processo de estabelecimento das normas de referência sobre o serviço de saneamento, torna-se essencial para promover a maturidade regulatória em nível nacional, por meio da padronização da governança das agências, redução das assimetrias e fortalecimento dos mecanismos (Vilarinho, 2023).

Segundo o SNIS (2022), o Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos brasileiro, no ano de 2022, apresentou uma massa coletada de RSU de 63,8 milhões de toneladas por ano, o que representa uma média de 0,98 kg/hab.dia. Em relação a coleta seletiva, apresenta 32,2% dos municípios fornecendo o serviço, que envolve cerca de 39 mil catadores.

Antes da coleta do RSU pelo município, os resíduos são acondicionados em locais públicos. Porém, de acordo com o artigo 28 da Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b), a responsabilidade pelos resíduos gerados recai sobre os próprios geradores, e não, inicialmente, sobre a administração municipal. Contudo, o armazenamento adequado dos resíduos domiciliares até a coleta é crucial para a saúde pública e o bem-estar social, segundo o que dispõe o código de postura dos municípios. O armazenamento inadequado pode atrair animais que rasgam e destroem os sacos ou outros recipientes, espalhando resíduos nas vias públicas, comprometendo a qualidade sanitária e dificultando a coleta (Portugal *et al.*, 2024).

Portanto, é fundamental que a administração pública oriente a população para o correto armazenamento dos resíduos domiciliares até a passagem do caminhão coletor. Isso ajuda a preservar as condições sanitárias dos logradouros públicos, em conformidade com o artigo 169 da Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1998, online), que estabelece que "a saúde é direito de todos e dever do Estado, garantido mediante políticas sociais e econômicas que visem à redução do risco de doença e de outros agravos".

Sobre acondicionamento para coleta seletiva, também, os consumidores são obrigados a acondicionar de forma diferenciada os resíduos sólidos gerados,

disponibilizando os resíduos reutilizáveis e recicláveis para coleta, conforme art. 35 da lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b). O artigo 8º, §1º, do Decreto nº 10.936/2022 (Brasil, 2022a, online) informa que a separação de resíduos deve ocorrer, no mínimo, entre resíduos secos e orgânicos, e deve ser "progressivamente estendida à separação dos resíduos secos em suas parcelas específicas", de acordo com as metas estabelecidas nos planos de resíduos sólidos. De acordo com o artigo 9º do mesmo decreto, cabe aos municípios definir os procedimentos para o acondicionamento adequado e a disponibilização dos resíduos sólidos destinados à coleta seletiva. Além disso, conforme o artigo 35, parágrafo único, da Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b, online), os municípios podem instituir incentivos econômicos para os consumidores que participarem dessa coleta. A falta de segregação dos resíduos pela população, quando a coleta seletiva for implementada pelo titular do serviço público de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, pode configurar uma infração ambiental, conforme tipificado no artigo 62, inciso XIII, do Decreto nº 6.514/2008 (Brasil, 2008), com as alterações introduzidas pelo Decreto nº 10.936/2022 (Brasil, 2022a).

Outra questão a ser observada na limpeza urbana e na coleta de RSU é o esforço físico excessivo ao qual os trabalhadores são submetidos, o que pode causar diversas lesões corporais nos garfis. Além disso, esses trabalhadores enfrentam exposição a agentes biológicos e a vários tipos de acidentes, incluindo atropelamentos, cortes e escoriações (Velloso *et al.*, 1997). Para proteger esses trabalhadores, é imperativo que a gestão municipal exija a distribuição de equipamentos de proteção individual (Souto, 2024). Tal medida é respaldada pelo artigo 166 do Decreto-Lei nº 5.452/1943, que obriga a distribuição gratuita de EPIs a todos os trabalhadores, garantindo sua proteção adequada (Brasil, 1943).

De acordo com Souto (2024), a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), na maioria dos municípios, não é realizada de maneira adequada, resultando em diversos problemas nas operações de manejo dos resíduos e da limpeza pública. Um dos problemas mais graves é a destinação inadequada desses resíduos em vazadouros a céu aberto, conhecidos como lixões. Além disso, os lixões apresentam sérios problemas sociais, devido à presença de catadores de materiais recicláveis que trabalham em condições desumanas e insalubres.

A presença, ainda, de lixões constitui um risco significativo para as operações dos aeródromos, pois atraem fauna, especialmente urubus, que ameaçam a

segurança durante pousos e decolagens. De acordo com o Serviço Regional de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (SERIPA), até mesmo os aterros sanitários regulares devem ser construídos à um raio de 9 km de aeródromos (Brasil, 2011). Além disso, o gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos leva à contaminação do solo e dos recursos hídricos por metais pesados e agentes patogênicos. Isso resulta na degradação do solo e dos mananciais hídricos, além de favorecer a disseminação de diversas doenças (Souto, 2024).

Destaca-se que a destinação inadequada dos resíduos, já predominante nos grandes centros urbanos, é ainda mais acentuada nos pequenos municípios. Nesses locais, os mecanismos de reciclagem, reaproveitamento, reuso e compostagem são práticas menos utilizadas, prevalecendo práticas inadequadas, como a incineração e o uso de aterros não preparados adequadamente para o recebimento de resíduos sólidos (De Alencar; Trevizan, 2023).

Sobre os RSU que não são direcionados para local correto e acabam sendo escoados pelas águas pluviais, em 2018, foi instituído, em parceria entre a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) e a Agência de Proteção Ambiental da Suécia (SEPA), o programa "Lixo Fora D'Água" com o objetivo de contribuir para o planejamento de ações destinadas a identificar e resolver os desafios relacionados aos resíduos sólidos urbanos e viabilizar soluções práticas para os municípios brasileiros (Spoti *et al.*, 2023). Inicialmente implementado na cidade de Santos-SP, o programa focou em ações pioneiras de monitoramento, prevenção e combate ao lixo nos rios e no mar, expandindo posteriormente para 11 municípios brasileiros, além de áreas no Caribe, Costa Rica, Colômbia e República Dominicana (ABRELPE, 2021).

No âmbito estadual, em 2003, foi implementado o programa "*Minas sem Lixões*" pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), com o propósito de promover melhorias na disposição de resíduos sólidos urbanos no estado. Essa política pública foi criada para apoiar os municípios no cumprimento das normas de gestão adequada de resíduos sólidos urbanos, conforme estabelecido pelo Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) (Magalhães, 2017).

No que diz respeito a balanço financeiro, de acordo com o SNIS (2022), existem 2.226 municípios que realizam algum tipo de cobrança em relação à

prestação de serviços de manejo de RSU e limpeza pública, que representa 44% dos municípios brasileiros. Porém, essas cobranças cobrem, em média, cerca de 53,8% dos custos pelos serviços. Durante o ano de 2022, o Brasil apresentou despesas de 30,16 bilhões de reais com a gestão de RSU.

A sustentabilidade econômico-financeira dos serviços de limpeza urbana é uma questão crucial, considerando que, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), os custos desses serviços podem representar até 20% do orçamento municipal. O artigo 29 da Lei nº 11.445/2007 (Brasil, 2007), com as alterações introduzidas pela Lei nº 14.026/2020 (Brasil, 2020), determina que a sustentabilidade econômico-financeira dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos deve ser assegurada através da remuneração pela cobrança desses serviços e, quando necessário, por meio de outras fontes adicionais. Esta remuneração pode ser realizada mediante taxas, tarifas e outros preços públicos, conforme o regime de prestação do serviço ou suas atividades (Portugal *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a administração municipal tem a obrigação de estabelecer formas de remuneração e efetuar a cobrança pelos serviços prestados. Além disso, deve buscar meios para garantir a sustentabilidade das atividades de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, o que inclui o combate sistemático à inadimplência relacionada a essas cobranças (Portugal *et al.*, 2024).

A gestão eficaz dos resíduos sólidos urbanos (RSU) continua sendo um desafio significativo para os países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, onde os municípios detêm a principal responsabilidade por seu gerenciamento (Nascimento *et al.*, 2015). Portanto, a gestão integrada de resíduos sólidos, fundamentada em diversos princípios, pode guiar os gestores no planejamento de ações que promovam a sustentabilidade ambiental, econômica e social (Klein *et al.*, 2018).

Mais de dez anos após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ainda há muitos desafios e inconsistências que precisam ser abordados ao avaliar suas características, metas e métricas, especialmente no contexto de pequenos municípios (Padilha *et al.*, 2022). Os principais problemas relacionados à gestão de resíduos sólidos nesses municípios envolvem a disposição inadequada em aterros a céu aberto ou lixões, práticas que causam impactos significativos à saúde humana e ao meio ambiente (Lino *et al.*, 2023; Silva, 2023).

Nos grandes centros urbanos, há um controle e fiscalização mais rigorosos sobre a gestão de resíduos, com mecanismos adequados de destinação. No entanto, a fiscalização nos pequenos municípios, muitas vezes, é inadequada ou incipiente, resultando em impactos negativos diretos nas questões socioambientais (Santos *et al.*, 2022; Silva, 2023). Logo, faz-se necessário destacar a urgência de mudanças e avanços, especialmente nos sistemas de fiscalização e nos mecanismos eficientes para a implementação de tecnologias e sistemas que alinhem as cidades e comunidades com as melhores práticas mundiais de gestão de resíduos sólidos (Lino *et al.*, 2023).

Existem diversas ferramentas para avaliar os impactos ambientais, como a Análise de Ciclo de Vida (ACV) e suas versões para as áreas econômica (AECV) e social (ACVS) (Brasil, 2010). Mattos *et al.* (2022) investigaram a aplicação dessas ferramentas no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), concluindo que, embora ainda sejam subutilizadas, elas podem fornecer informações cruciais para a tomada de decisões nos planejamentos estratégicos dos gestores municipais. Gupta (2019) sugere outra abordagem, propondo o uso de sistemas de gestão de resíduos baseados em inteligência artificial para aprimorar a eficiência do sistema.

2.2 ARCABOUÇO LEGAL

Para realização da revisão do arcabouço legal sobre os RSU, foi desenvolvida uma linha do tempo (Figura 1) com as principais políticas, leis e outros instrumentos correlatados que marcaram a história do Brasil.

Figura 1 – Linha do tempo do arcabouço legal

| | | | | | | | | | | |
|------|----------------|------------------------------------|------------------------|--|----------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1942 | 1964 1967 | 1981 | 1985 | 1988 | 1991 | 1998 | 2007 | 2010 | 2020 | 2022 |
| SESP | Viação e Obras | Política Nacional do Meio Ambiente | Lei Ação Civil Pública | União responsável pelo Saneamento Básico | Fim do PLANASA | Lei de crimes ambientais | Lei de Saneamento Básico “MARCO” | Política Nacional Resíduos Sólidos | Lei de Saneamento Básico “NOVO MARCO” | PLANARES e Créditos de Reciclagem |

Fonte: Autor (2024)

A criação do Serviço Especial de Saúde Pública (SESP) em 1942 marcou um período crucial para a saúde pública no Brasil. Estabelecido por um acordo entre os governos brasileiro e norte-americano, o SESP foi uma das primeiras grandes iniciativas governamentais destinadas a melhorar as condições de saúde e

saneamento no país, com foco em regiões estratégicas para os interesses militares dos Estados Unidos, como a Amazônia e o Vale do Rio Doce (Renovato *et al.*, 2010). Em 1964, sob o regime militar, os serviços de saneamento foram subordinados ao Ministério da Educação e da Saúde, limitando a influência dos engenheiros sanitaristas. Em 1967, a lei n. 200 transferiu o saneamento básico para o Ministério da Viação e Obras (Correia; Esperidão; Melo, 2020).

A Lei nº 7.347/1985 (Brasil, 1985), conhecida como Lei da Ação Civil Pública, instituída em 24 de julho de 1985, criou mecanismos jurídicos para a proteção ambiental, aplicáveis também à gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). A lei permite que órgãos como o Ministério Público e entidades civis proponham ações civis públicas contra responsáveis por danos ambientais, incluindo a má gestão de resíduos sólidos (Brasil, 1985).

No final da década de 1980, o setor de saneamento no Brasil foi gravemente afetado pela crise econômica, marcada por hiperinflação e o fim do Banco Nacional da Habitação (BNH), resultando na diminuição dos investimentos públicos em saneamento (Correia; Esperidão; Melo, 2020). E em 1991, sob o governo Collor, a extinção do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), após 23 anos de vigência, reduziu a prioridade do saneamento básico nos investimentos públicos, embora as companhias estaduais continuassem como principais prestadoras de serviço (Correia; Esperidão; Melo, 2020).

A Constituição Federal de 1988, ao não definir de modo claro as competências de cada ente federado tornou o cenário institucional mais confuso, embora, seja verdade que a Carta Magna determina o papel da União como definidora do planejamento e das diretrizes para políticas públicas de saneamento básico (Brasil, 1988). Segundo Souza (2011) as ações relativas ao saneamento se tornaram desarticuladas e cada vez mais eventuais. Além disso, com o fim do BNH e a transferência das funções para Caixa Econômica Federal (CEF), quanto titular da maioria das carteiras do antigo banco de habitação, aliados ao cenário macroeconômico ruim e ao *zeitgeist* ideológico desfavorável, os recursos do FGTS que eram a fonte do BNH passaram a ter novos pretendentes à sua destinação, reforçando a preterição do saneamento frente às demais políticas públicas (Correia; Esperidão; Melo, 2020).

Porém, a Lei nº 9.605/1998 (Brasil, 1998), também conhecida como Lei de Crimes Ambientais, estabelece sanções penais e administrativas para condutas prejudiciais ao meio ambiente, incluindo a gestão inadequada de resíduos sólidos. Ela aborda a disposição inadequada de resíduos, impondo penas de reclusão de um a cinco anos, além de multas, para casos de poluição que possam afetar a saúde humana, causar mortandade de animais ou destruição da flora. A mesma também responsabiliza os geradores de resíduos pela adoção de práticas sustentáveis, incentivando o manejo adequado para reduzir impactos ambientais negativos. Além das sanções criminais, a lei ainda prevê medidas administrativas como multas e suspensão de atividades para garantir a conformidade com as normas ambientais, promovendo assim uma gestão mais responsável e segura dos resíduos sólidos urbanos e industriais.

Buscando a universalização e a regulação dos serviços de saneamento básico, o governo federal proclamou a Lei nº 11.445, em 5 de janeiro de 2007 (Brasil, 2007), Lei de Saneamento Básico, que expõe as diretrizes necessárias à prestação do saneamento básico no território brasileiro, alterando as Leis nº 6.766 (Lei de parcelamento do solo urbano), de 19 de dezembro de 1979, a Lei nº 8.666 (Lei de Licitações e Contratos Administrativos), de 21 de junho de 1993, e a Lei nº 8.987 (Lei de Concessões e Permissões de Serviços Públicos), de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978.

A promulgação da Lei nº 11.445 (Brasil, 2007) foi conduzida pelo governo federal durante o mandato do presidente Luiz Inácio Lula da Silva. O Ministério das Cidades teve um papel preponderante, juntamente com outras agências governamentais, para orientar a implementação e regulamentação dos serviços de saneamento. A responsabilidade direta pela execução das ações de saneamento foi delegada aos municípios e, em alguns casos, aos estados.

A Lei nº 11.445/2007 (Brasil, 2007) define serviços de saneamento básico como as atividades de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo de águas pluviais, incluindo a limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas.

A implementação da Lei nº 11.445/2007 (Brasil, 2007) ocorreu de maneira gradual, envolvendo a coordenação entre diferentes níveis de governo, do federal ao

municipal. O processo de implantação teve como eixo central a elaboração dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB), que devem ser desenvolvidos pelos municípios, estabelecendo as estratégias e metas para a provisão de serviços de saneamento. A responsabilidade pelo acompanhamento e coordenação recaiu sobre o Ministério das Cidades, com o apoio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), que forneceu orientações e suporte técnico aos entes locais (Brasil, 2007).

De acordo com as diretrizes para a definição da Política e Elaboração do Plano de Saneamento Básico de 2011 (Brasil, 2011), o PMSB deve conter no mínimo: o diagnóstico da situação e de seus impactos nas condições de vida; objetivos e metas de curto, médio e longo prazos para a universalização; programas, projetos e ações necessárias para atingir os objetivos e as metas; ações para emergências e contingências; e mecanismos e procedimentos para a avaliação sistemática da eficiência e eficácia das ações programadas.

A Lei Federal nº 11.445/2007 (Brasil, 2007) estabelece a participação da sociedade nos processos de formulação de políticas, planejamento e avaliação relacionados aos serviços públicos de saneamento básico (art. 3º, inciso IV); em audiências e consultas públicas sobre a minuta de contrato para prestação de serviços de saneamento básico (art. 11, inciso IV); em audiências e/ou consultas públicas para apreciação de propostas de plano de saneamento básico, inclusive dos estudos que os fundamentam (art. 19, inciso V, §5º); por meio de mecanismos normatizados pela entidade de regulação dos serviços (art. 23, inciso X); e por meio do acesso a informações sobre a regulação ou fiscalização dos serviços prestados (art. 26). Além disso, a lei assegura o acesso a informações sobre os direitos e deveres dos usuários (art. 27), nos processos de revisão tarifária (art. 38, inciso II, §1º) e em órgãos de controle social.

Em 2008, o Conselho das Cidades deu início à elaboração do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), conforme a Lei nº 11.445/2007, dividida em três etapas principais de planejamento: a formulação do *Pacto pelo Saneamento Básico: mais saúde, qualidade de vida e cidadania* em 2008; a elaboração do estudo *Panorama do saneamento básico no Brasil* entre 2009 e 2010, o qual resultou na versão preliminar do PLANSAB; e a *Consulta pública*, que submeteu essa versão

preliminar à sociedade (Brasil, 2010). O PLANSAB deve ser revisado a cada quatro anos, estabelecendo novas metas e programas para seu cumprimento (Afonso; De Almeida, 2020).

Apesar das intenções e objetivos claramente estabelecidos, Afonso e De Almeida (2020) destaca que a implementação da Lei nº 11.445 enfrentou desafios significativos. Entre eles, a carência de recursos financeiros para investimentos em infraestrutura, a falta de capacidade técnica em alguns municípios para elaborar e implementar os Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB), e a necessidade de superar práticas de gestão ineficientes.

Em 2010, a Lei nº 12.305 (Brasil, 2010b), regulamentada pelo Decreto nº 7.404 (Brasil, 2010a), instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece princípios, objetivos e instrumentos para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, dentre esses destaca-se:

i) Responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: Estabelece a responsabilidade de fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e consumidores pelo gerenciamento adequado dos resíduos gerados ao longo do ciclo de vida dos produtos.

ii) Logística reversa: Define mecanismos para a devolução e reciclagem de produtos e embalagens após seu uso, especialmente para resíduos como eletrônicos, pilhas e baterias, lâmpadas, pneus, entre outros.

iii) Planos de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS): Requer que empresas e setores específicos desenvolvam planos para gerenciar seus resíduos de forma ambientalmente adequada.

iv) Coleta seletiva e reciclagem: Estabelece metas para a implementação da coleta seletiva e incentiva práticas de reciclagem.

v) Disposição final ambientalmente adequada: A lei determina o fim dos lixões a céu aberto e estabelece que todos os resíduos sólidos devem ser destinados a aterros sanitários que atendam a critérios específicos de operação e controle ambiental.

O Decreto nº 7.404/2010 (Brasil, 2010a) detalha que a PNRS deve ser implementada estabelecendo a criação de acordos entre governo e setores da indústria para implementar a logística reversa, definindo prazos para a implementação

da coleta seletiva e metas para a redução de resíduos e clarificando as responsabilidades dos diversos níveis de governo (federal, estadual e municipal) e dos diferentes setores da sociedade na gestão dos resíduos sólidos.

A Lei nº 14.026 (Brasil, 2020), sancionada em 15 de julho de 2020, atualizou a Lei nº 11.445/2007 (Brasil, 2007), conhecida como a Lei do Saneamento Básico, introduzindo mudanças na legislação do setor, ficando conhecida como *Atualização do Marco do Saneamento*. Uma das áreas impactadas por essas alterações foi a gestão de resíduos sólidos como: foco na universalização de prestação regionalizada; licitações e concessões; regulação e papel da Agência Nacional de Águas (ANA); Planos Municipais de Saneamento; Controle Social; Sustentabilidade Financeira e Tarifas; Regionalização e Consórcios Públicos.

A Lei nº 14.026 (Brasil, 2020) reforçou a universalização dos serviços de saneamento básico, incluindo a coleta, tratamento e disposição final de resíduos sólidos, promovendo a prestação regionalizada dos serviços para eficiência na cobertura universal. Para tal, estabeleceu que a contratação desses serviços fosse feita por licitações ou concessões, incentivando a competição e a participação do setor privado para melhorar a qualidade dos serviços prestados. A Agência Nacional de Águas (ANA) assumiu um papel central no estabelecimento de normas de referência para a regulação do setor, para harmonizar regras e garantir segurança jurídica, atraindo investimentos e melhorando a eficiência dos serviços. A lei também enfatizou a importância dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB), incluindo planos específicos para resíduos sólidos, os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, com a definição de metas e estratégias claras e participação da sociedade civil no planejamento (Brasil, 2020).

Adicionalmente, a nova legislação reforçou a necessidade de controle social na prestação dos serviços de saneamento, incluindo a gestão de resíduos sólidos. Os municípios devem instituir mecanismos de participação pública, como conselhos e audiências públicas, para garantir a transparência e o engajamento da sociedade civil. A Lei nº 14.026 (Brasil, 2020) determinou que os prestadores de serviços de saneamento, incluindo resíduos sólidos, devem ter sustentabilidade financeira, definindo estruturas tarifárias que permitam a manutenção e melhoria dos serviços.

Isso inclui a cobrança por coleta e tratamento de resíduos sólidos, que pode ser aplicada por meio de taxas ou tarifas, dependendo da legislação local.

Sobre o que se refere ao fim dos lixões, a Lei nº14.026 (Brasil, 2020) define que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada, de forma progressiva em função do porte, até agosto de 2024. Essa prorrogação é válida para os municípios que tenham elaborado seus planos de resíduos sólidos, e disponham de mecanismos de cobrança que garantam sua sustentabilidade econômico-financeira, conforme o art. 29 da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (Brasil, 2007).

Em janeiro de 2022 promulgou-se um novo decreto regulamentador da PNRS, o de nº 10.936/2022 que revoga e substitui o Decreto Federal nº 7.404/2010 (Brasil, 2022a). O decreto detalha e fortalece a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no contexto de crescente preocupação ambiental e necessidade de aprimoramento da gestão de resíduos sólidos. Este decreto busca soluções mais sustentáveis e eficientes para o tratamento e disposição final dos resíduos. Entre os principais pontos abordados estão o fortalecimento da logística reversa, essencial para garantir que produtos e embalagens retornem ao ciclo produtivo, minimizando resíduos descartados e incentivando a reciclagem e reutilização. Além disso, o decreto prevê mecanismos de financiamento e incentivos econômicos, como a criação de fundos específicos, linhas de crédito e subsídios para apoiar projetos de gestão de resíduos sólidos (Brasil, 2022a).

O decreto nº 7.404/2010 (Brasil, 2022a) também promove a integração e coordenação entre diferentes níveis de governo (federal, estadual e municipal) e o setor privado, estabelecendo diretrizes para a criação de consórcios intermunicipais e parcerias público-privadas (PPP). Outro ponto crucial é a ênfase na educação ambiental e na participação social, sublinhando a importância da transparência na gestão de resíduos e incentivando a sociedade a participar ativamente na formulação e implementação das políticas públicas.

É nesse decreto nº 7.404/2010 (Brasil, 2022a) que fica estabelecido o Programa Nacional de Logística Reversa, integrado ao Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) e ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES). Ele também institui a implementação do Manifesto

de Transporte de Resíduos (MTR) e define o conteúdo mínimo dos atos infralegais e contratuais que regulamentam os sistemas de logística reversa, incluindo a obrigação dos importadores de aderir à logística reversa. Além disso, o decreto revoga o Decreto Federal nº 5.940/2006, que tratava da separação na fonte geradora dos resíduos recicláveis gerados pela administração pública federal e sua destinação a organizações de catadores de materiais recicláveis. Em seu lugar, instituiu o Programa de Coleta Seletiva Cidadã, que mantém as disposições do decreto anterior, incluindo a obrigatoriedade de que as cooperativas estejam cadastradas e regulamentadas no SINIR (Brasil, 2022a).

Em abril de 2022, foi aprovado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) por meio do Decreto Federal nº 11.043/2022 (Brasil, 2022b), aguardado desde a regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010. O PLANARES estabelece uma estratégia de longo prazo para a implementação da PNRS, contendo metas, programas e ações, de forma progressiva, para até 2040, com revisões previstas a cada quatro anos. Este decreto reforça a necessidade de os gestores garantirem a sustentabilidade financeira na gestão de resíduos sólidos por meio da implementação de taxas ou tarifas. Além disso, estabelece como meta que 95% das coletas seletivas municipais sejam realizadas por meio de contratos com cooperativas ou catadores autônomos. Também propõe aumentar a taxa de recuperação de resíduos dos atuais 2% para 48% em 18 anos, por meio de reciclagem, compostagem, biodigestão e recuperação energética dos resíduos (Brasil, 2022b).

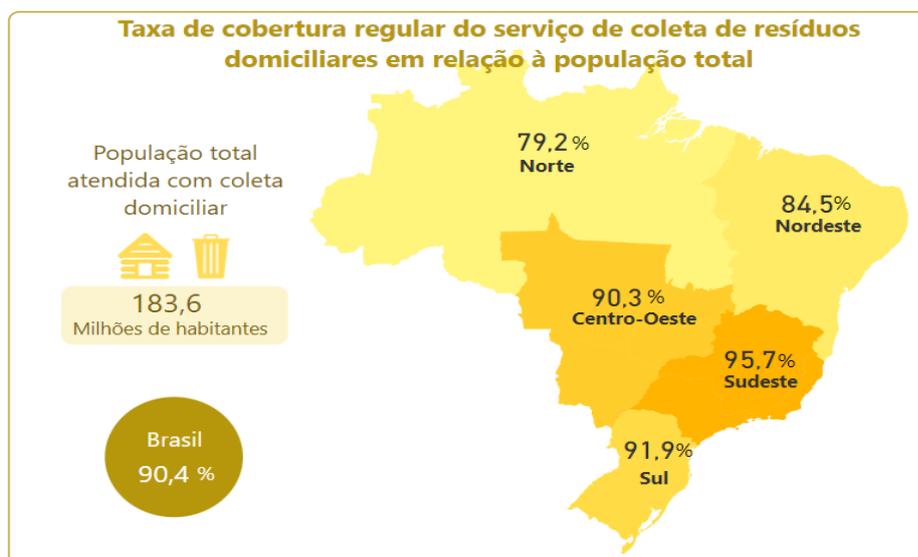
Simultaneamente, foi aprovado o Decreto Federal nº 11.044/2022 (Brasil, 2022c), que institui o Certificado de Crédito de Reciclagem (RECICLA+). Este certificado é emitido por uma entidade gestora e comprova a restituição ao ciclo produtivo da massa equivalente dos produtos e/ou embalagens sujeitos à logística reversa, regulamentando o mercado de certificados de crédito de reciclagem. As empresas têm a opção de não aderir ao certificado, mas, nesse caso, devem implementar e operacionalizar um sistema individual de logística reversa. Mesmo pequenas e microempresas devem garantir a implantação de um sistema de logística reversa (Brasil, 2022c).

2.3 COLETA DE RSU

A coleta de todos os resíduos sólidos urbanos é essencial para evitar problemas relacionados à poluição, saúde pública e até alagamentos em áreas urbanas (Nascimento *et al.*, 2017). A geração média de RSU é de aproximadamente 1,04 kg por habitante por dia em 2022, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos 2023 (Brasil, 2023). Como esses dados não estão disponíveis para todos os municípios brasileiros no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), torna-se crucial a elaboração de cenários de geração de RSU para estimar a quantidade de resíduos que precisará ser gerenciada (Spinola *et al.*, 2019).

O serviço de coleta de RSU é uma das mais relevantes dentre as seis etapas do gerenciamento de resíduos sólidos presentes no PNRS, instituído pela Lei Nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b). Tal etapa é responsável por coletar os RSU acondicionados em locais públicos e transportá-los para a destinação final. Sabe-se que de 7% a 15% dos recursos do orçamento municipal são destinados aos serviços de limpeza pública, sendo metade desse valor direcionada à coleta e transporte dos RSU (Sarkis, 2000). No Brasil, segundo o SNIS (2022) houve a coleta de 63,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Tal quantitativo foi obtido a partir de uma cobertura de coleta regular média de 90,4%. O detalhamento da cobertura de coleta por região pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Taxa de cobertura de coleta de RSU no Brasil



Fonte: SNIS (2022)

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) (Brasil, 2019), dentre os sete tipos de coleta de resíduos sólidos, destacam-se aqui:

a) Coleta convencional: refere-se à coleta de resíduos sólidos provenientes de domicílios e estabelecimentos comerciais.

b) Coleta de resíduos de limpeza urbana: inclui a coleta de resíduos resultantes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, além de outros serviços de limpeza urbana.

c) Coleta seletiva: destinada a recolher resíduos segregados na fonte, está diretamente relacionada à reciclagem e é executada por meio de um plano específico.

Olhando para o passado, a preocupação com os resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil começou em meados do século XIX. Naquela época, a limpeza das cidades era realizada apenas em ocasiões festivas. Os dejetos eram descartados próximos aos locais de convivência, sem grandes preocupações. Foi somente com o surgimento de epidemias que os RSU se tornaram uma preocupação das autoridades, sendo identificados como uma ameaça à ordem pública e à saúde. Esse medo impulsionou a criação e implementação de medidas sanitárias nas cidades, como a elaboração de normas para a coleta e depósito de RSU em áreas mais afastadas, a implantação de incineradores e a pavimentação das ruas, facilitando a remoção dos resíduos. Essas mudanças foram refletidas no Código de Posturas, editado em 1875 e ampliado em 1886, focado na demarcação do espaço público e na normatização da circulação. Em 1893, foi firmado o primeiro contrato formal para serviços de coleta domiciliar e varrição na cidade de São Paulo (Miziara, 2011).

Até o final da década de 1960, a coleta de RSU era realizada com carroças puxadas por animais, feitas com materiais de difícil limpeza e desinfecção. Em 1972, tornou-se obrigatória a utilização de sacos plásticos para o acondicionamento dos RSU nos locais de coleta noturna, substituindo as antigas latas de lixo (Eigenheer, 2009). A introdução dos sacos plásticos e dos caminhões basculantes agilizou a coleta, facilitando o trabalho dos funcionários de limpeza pública e tornando o processo mais eficiente (Costa, 2020).

Em relação a coleta seletiva, que consiste na separação dos materiais na fonte geradora para reutilização, reciclagem ou compostagem da fração orgânica, é uma prática crucial na gestão dos RSU (Eigenheer, 2009). Este serviço começou na

Itália em 1941, devido às dificuldades provocadas pelas grandes guerras (Souza, 2014). Durante a Segunda Guerra Mundial, todos os países já praticavam a reciclagem, especialmente de metais para a indústria bélica. No Brasil, a coleta seletiva foi iniciada em 1985 na cidade de Niterói, no Rio de Janeiro (Ribeiro, 2007). Desde então, um número crescente de municípios adotou a prática, até que o sistema de coleta seletiva se espalhou por quase todo o país. Em Florianópolis, por exemplo, realiza-se coleta seletiva em todos os bairros da ilha. Apesar das grandes distâncias percorridas pelos caminhões, o que aumenta o custo de coleta por tonelada no Brasil, a quantidade de material reciclado é significativa. Em Porto Alegre, onde a coleta seletiva também está presente na maioria dos bairros, o custo é baixo e a cidade possui uma das maiores quantidade de material reciclado coletado no país (Miziara, 2011).

Nesse contexto, o uso de ferramentas como o Sistema de Informação Geográfica (SIG) desempenha um papel crucial na otimização das rotas de transporte. A roteirização, por exemplo, é o processo de definir roteiros e itinerários eficientes, ágeis e otimizados a serem seguidos pelos veículos de uma frota, com o objetivo de visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, tendo como consequência a redução dos custos financeiros e os impactos ambientais, promovendo um meio ambiente mais equilibrado e sustentável (Costa, 2020).

Os gestores de resíduos sólidos enfrentam desafios significativos, como a especificação e aquisição de veículos apropriados para a coleta de resíduos e varrição de ruas, a contratação e treinamento de pessoal, o desenvolvimento de rotas que maximizem a utilização de recursos e o monitoramento das operações diárias. Especificamente, o desenvolvimento de um plano de roteirização de veículos geralmente envolve a divisão geográfica de um município em setores e a subsequente determinação do circuito de coleta (turno ou rota de coleta), que é a rota *de rua a rua* a ser seguida pelos motoristas dos veículos de coleta e/ou varredores em horários e dias específicos da semana (frequência de coleta) para realizar o serviço (Negreiros; Palhano; Reis, 2023a)

Sendo assim, para a coleta domiciliar convencional (porta a porta), define-se um setor como uma área onde a equipe (motorista e coletores) realiza a coleta em um dia de trabalho com a mesma frequência semanal (Negreiros; Palhano; Reis, 2023b).

Um setor de coleta é composto por um ou mais circuitos ou rotas de coleta que podem ser realizados durante um dia de trabalho (Mourão *et al.*, 2009). Um circuito (turno, rota ou viagem de coleta) é a sub-região onde o veículo da equipe opera até atingir sua capacidade máxima de armazenamento de resíduos. Uma viagem é a rota que conecta a garagem, o setor de coleta e o destino final (geralmente uma estação de transferência ou aterro sanitário). Reiterando a definição, um setor é composto por um ou mais circuitos ou rotas de coleta que podem ser completados durante um dia de trabalho (Negreiros; Palhano; Reis 2023b).

Grande parte dos gestores do serviço de coleta domiciliar e seletiva de resíduos no Brasil planeja seus setores e rotas utilizando papel e mapas desenhados à mão, dividindo e redividindo a cidade em regiões de coleta e varrição no modo "tentativa e erro". Além disso, a determinação das rotas (a sequência ordenada de ruas a serem coletadas ou varridas) é frequentemente delegada ao motorista ou varredor (Negreiros; Palhano; Reis, 2023a). As formas mais eficazes e avançadas de planejamento empregam AutoCad™, outras ferramentas integradas por geoprocessadores como Caliper™, e APIs da ESRI™, Here Maps, Open Street Map, Google Maps™ e outros (Negreiros; Palhano; Reis, 2023b).

Outro aspecto crítico nos serviços de coleta de resíduos, que deve ser observado pela administração municipal no desenvolvimento da gestão, refere-se à carga transportada pelos caminhões de coleta, especialmente os veículos compactadores. A Resolução nº 210 de 2006 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) (Brasil, 2006a) estabelece que o peso bruto máximo por eixo isolado de dois pneus e de quatro pneus são, respectivamente, de 6 e 10 toneladas. Dessa forma, a carga máxima permitida para veículos compactadores de dois eixos é limitada a 16 toneladas (Brasil, 2006a). No entanto, é sabido que alguns desses veículos possuem capacidade de peso bruto superior, permitindo seu tráfego acima dos limites estabelecidos pela norma. Essa prática contraria a Resolução do CONTRAN e resulta em degradação do pavimento das vias públicas, além do desgaste prematuro dos veículos (Souto, 2024).

Além da integridade dos pavimentos, a poluição causada por veículos automotores é um problema global (Nascimento; Da Silva, 2014). Nesse cenário, o deslocamento dos veículos utilizados na coleta e destinação final dos RSU tem

contribuído para o aumento da concentração de substâncias e gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (Da Costa; Nascimento; Ometto, 2020). Em muitos municípios brasileiros, o transporte e a destinação final dos RSU sem análises mais detalhadas para otimização das rotas geram como resultado, um consumo excessivo de combustível, elevando os custos do processo e impactando negativamente a qualidade do ar (Da Costa; Nascimento; Ometto, 2020).

Os veículos de coleta geralmente utilizam óleo diesel, um dos principais responsáveis pelas emissões de GEE no Brasil. A combustão do óleo diesel libera grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera. Por exemplo, os caminhões de transporte de cargas no Brasil emitiram 91,2 milhões de toneladas de CO₂ em 2022, superando as emissões de todas as termelétricas fósseis em operação no país (SEEG, 2022). Além de seu alto potencial poluidor, o preço do diesel aumentou significativamente nos últimos anos, elevando os custos de transporte (Da Costa; Nascimento; Ometto, 2020).

Outra informação relevante é o uso dos turnos diurnos e/ou noturnos. O horário diurno para a coleta de resíduos sólidos apresenta diversas vantagens, como a facilitação do acompanhamento dos serviços pela equipe de fiscalização, redução de custos operacionais e o recolhimento dos recipientes pelos próprios interessados, além da sinalização dos veículos coletores por meio de buzinas, o que aumenta a segurança (Brasil, 2019). No entanto, essa prática possui desvantagens significativas, incluindo a interferência no trânsito de veículos, menor produtividade em regiões com clima quente devido ao desconforto térmico e maior desgaste físico dos trabalhadores, impactando sua eficiência e saúde (Brasil, 2019).

Em contrapartida, o horário noturno para a coleta de RSU oferece vantagens, como a maior abrangência da coleta, englobando tanto domicílios quanto estabelecimentos comerciais, a manutenção de um bom aspecto estético nas vias públicas ao evitar a presença de resíduos durante o dia, e a não interferência no tráfego intenso diurno. Contudo, essa prática também apresenta desvantagens, incluindo a geração de ruídos devido à manipulação dos recipientes e veículos coletores, a dificuldade de fiscalização pelas equipes de serviço, e o custo elevado da mão de obra devido ao pagamento de adicional noturno (Brasil, 2006b).

Explorando a literatura correlata, foram selecionadas 3 cidades brasileiras para se relacionar com a cidade objeto do estudo deste trabalho. A primeira cidade é Belo Horizonte, por ser a capital de Minas Gerais, onde se encontra a cidade objeto do trabalho, Muriaé; Porto Alegre, por ser a capital de Rio Grande do Sul, com distância geográfica considerável e menos populosa que a primeira; e a terceira cidade Ipatinga, relativamente próxima a Muriaé e com um quantitativo populacional compatível com a mesma.

2.3.1 Belo Horizonte

A cidade de Belo Horizonte é a capital do Estado de Minas Gerais, com uma população de 2.315.560 habitantes, onde o salário médio mensal é de 3,5 salários mínimos, gerando um PIB per capita de R\$41.818,32. Apresenta 96,2% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 82,7% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 44,2% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio) (IBGE, 2022).

A Superintendência de Limpeza Urbana (SLU) é a autarquia municipal responsável pela elaboração, controle e execução de programas e atividades voltados para a limpeza urbana de Belo Horizonte. Criada em 1973, a SLU presta serviços de coleta domiciliar de lixo, varrição, capina, aterramento de resíduos, coleta seletiva, reciclagem de entulho e compostagem, entre outros (Prefeitura de Belo Horizonte, 2024).

Por apresentarem características urbanísticas adversas, na maioria das vezes situadas em áreas de risco e de difícil acesso, as vilas e os aglomerados oferecem limitações e desafios à prestação do serviço. Sempre que possível, a SLU utiliza caminhões minicomputadores e carrinhos de mão nos becos, conforme parâmetros de projeto adotados pela Prefeitura (Prefeitura de Belo Horizonte, 2024).

Para dar suporte às atividades de limpeza de vias, especialmente à varrição, a capital conta hoje com aproximadamente 26 mil cestos distribuídos nas áreas de maior fluxo de pedestres e de comércio. Essas lixeirinhas são destinadas para o descarte de pequenos resíduos, tais como papéis, cascas de alimentos, pequenas embalagens, entre outros, gerados no dia a dia (Prefeitura de Belo Horizonte, 2024).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, (SNIS, 2022), foram geradas 730 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos no município de Belo Horizonte - MG, com cobertura de coleta que atende mais de 2,2 milhões habitantes, o que representa 96% da população total. Os RSU são direcionados para o aterro sanitário de Macaúba, em Sabará/MG, localizado a 22 km do núcleo populacional. Logo, tem-se uma massa per capita coletada de 0,9 kg/dia.

Em questões de estrutura política, o SNIS (2022) informa que Belo Horizonte aprovou a política de saneamento básico, conforme a Lei 11.445/2007 (Brasil, 2007) em dezembro de 2007, e o plano municipal correspondente foi aprovado em 2020, com vigência até dezembro de 2024. Já o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) conforme a Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b) foi aprovado em março de 2017.

Para coleta dos RSU, o município conta com a estrutura de 24 caminhões compactadores, 8 caminhões basculantes, e 6 caminhões tipo poliguindaste pertencentes à SLU, enquanto os agentes privados operam com 125 caminhões compactadores e 130 caminhões basculantes (SNIS, 2022).

2.3.2 Porto Alegre

A cidade de Porto Alegre é a capital do Estado do Rio Grande do Sul, com população de 1.332.845 habitantes, onde o salário médio mensal é de 4,1 salários mínimos, gerando um PIB per capita de R\$54.647,38. Apresenta 93% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 82,7% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 69,4% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio) (IBGE, 2022).

O Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) é a autarquia do município de Porto Alegre responsável pela limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos urbanos. Dentre os trabalhos que o DMLU realiza estão as coletas domiciliar (de resíduos orgânicos e rejeito) e seletiva (de resíduos recicláveis) em 100% das ruas de Porto Alegre. É responsável também pela varrição e capina nas vias públicas, recolhimento o resíduo público, que é resultado de descartes inadequados (focos de lixo) (Prefeitura de Porto Alegre, 2024).

O serviço de coleta domiciliar é realizado porta a porta e recebe apenas resíduos orgânicos e rejeitos, não sendo permitida a mistura com resíduos recicláveis. Conforme instituído pelo Código Municipal de Limpeza Urbana, os resíduos orgânicos e os rejeitos são apresentados para a coleta domiciliar no logradouro público, junto ao alinhamento de cada imóvel, nos dias e nos turnos estabelecidos pelo DMLU, conforme as regiões de abrangência do serviço. Nos locais em que a coleta for automatizada, os resíduos orgânicos e os rejeitos são colocados no interior dos contêineres, em qualquer dia e horário. O descarte inadequado de resíduos pode gerar multas que vão de 90 a 1440 Unidade Fiscal Municipal (UFM's). (Prefeitura de Porto Alegre, 2024).

Para atender pequenos geradores (pessoas físicas e/ou jurídicas) de diversos resíduos que não podem ser descartados para recolhimento pelas coletas regulares, domiciliar e seletiva, foi criado as Unidades de Destino Certo (UDCs), também chamadas de Ecopontos, são locais que estão estrategicamente distribuídos pela cidade, conforme os limites estabelecidos na Instrução Normativa nº 015/2021 (Prefeitura de Porto Alegre, 2024).

Os Ecopontos recebem gratuitamente madeira, móveis velhos, colchões, terra, entulho, calça, cerâmica, sucata de ferro, eletrodomésticos, resíduos arbóreos e diversos materiais que muitas vezes acabam sendo descartados irregularmente em locais públicos. Eles têm ainda um Posto de Entrega de Óleo de Fritura (PEOF), um Posto de Entrega Voluntária (PEV) para materiais destinados à coleta seletiva e Posto de Entrega de Resíduos Eletrônicos (PERE) (Prefeitura de Porto Alegre, 2024).

De acordo com o SNIS (2022) foram geradas, em 2022, quase 500 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos no município de Porto Alegre - RS, com cobertura de coleta que atende cerca de 1,3 milhões, 99,98% da população total. Os RSU são direcionados para o aterro sanitário em Minas do Leão/RS, localizado a 105 km do núcleo populacional. Logo, tem-se uma massa per capita coletada de 1,02 kg/dia. Em relação a produtividade da atividade, foram coletados 2.424,84 kg por funcionário. Para o serviço total de coleta desses resíduos foram gastos R\$90.610.377,81.

Em questões de estrutura política, o SNIS (2022) informa que Porto Alegre teve seu plano municipal de saneamento aprovado em 2015. Já o Plano Municipal de

Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), conforme a Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b), foi aprovado em dezembro de 2013. Para coleta dos RSU, o município conta com 82 caminhões compactadores e 112 caminhões basculantes/carroceria dos agentes privados.

2.3.4 Ipatinga

A cidade de Ipatinga está localizada no estado de Minas Gerais, com população de 227.731 habitantes, onde o salário médio mensal é de 2,4 salários mínimos, gerando um PIB per capita de R\$65.869,82. Apresenta 97,7% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 88,5% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 77,8% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio) (IBGE, 2022).

A coleta de RSU é feita de segunda a sábado nas vias principais dos bairros e do centro e 3 dias por semana nas demais, com rotas diurnas e noturnas. Este serviço é prestado através de concessão à empresa Queiroz Galvão junto com a Vital Engenharia. O lixo deve estar acondicionado e colocado no alinhamento do imóvel (Prefeitura de Ipatinga, 2024).

De acordo com o SNIS (2022) foram geradas, em 2022, quase 165 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos no município de Ipatinga-MG, a partir de uma cobertura de coleta que atende 211.094 habitantes, o que representa 92,69% da população total. Os RSU são direcionados para o aterro sanitário em Santana do Paraíso/MG, localizado a 9 km do núcleo populacional. Logo, tem-se uma massa per capita coletada de 2,11 kg/dia. Em relação a produtividade da atividade, foram coletados 7.309,81kg por funcionário.

Para coleta dos RSU, o município conta com 10 caminhões compactadores e 7 caminhões basculantes/carroceria dos agentes privados (SNIS, 2022).

2.4 LOGÍSTICA DA COLETA

2.4.1 Roteirização

A roteirização constitui uma etapa importante do gerenciamento de RSU, objetivando, entre outros aspectos, à redução dos custos associados ao transporte. O termo "roteirização" ou "roteamento" deriva da adaptação do inglês "*routing*" e refere-se ao processo de definição de um ou mais roteiros ou sequências de paradas que um veículo deve seguir, visando atender um conjunto de pontos dispersos geograficamente em locais pré-definidos (Cunha, 1997).

Segundo Belfiore *et al.* (2006), o objetivo da roteirização é determinar rotas de veículos que minimizem os custos de transporte, garantindo que todas as demandas dos clientes sejam atendidas e que as limitações de capacidade dos veículos sejam observadas. Cunha (2000) acrescenta que a roteirização pode ser descrita como um processo envolvendo "*n*" clientes (representados em uma rede de transportes por nós ou arcos) que devem ser atendidos por uma frota de veículos, sem impor restrições ou especificar a ordem de atendimento.

Conforme exposto por Chopra e Meindl (2003), uma das decisões operacionais mais críticas no âmbito da logística é a roteirização de veículos, que envolve a definição de rotas e cronogramas para minimizar os custos associados. Este objetivo primordial das organizações visa a otimização das distâncias percorridas e do tempo de entrega, resultando em um incremento nos níveis de qualidade dos serviços empresariais.

Hall e Partyka (1997) categorizam os problemas de roteirização em três componentes fundamentais: decisões, objetivos e restrições. As decisões abarcam a alocação de um conjunto de clientes a ser atendido por uma frota de veículos, determinando a sequência das visitas. Os objetivos do projeto incluem a prestação de serviços no mais alto nível solicitado pelos clientes. Para alcançar esses objetivos, é imprescindível o respeito às restrições estabelecidas, mantendo os custos operacionais e de capital no menor nível possível.

Dentro dos principais pontos a serem observados na roteirização, Enomoto e Lima (2005) levantam as principais questões que devem ser consideradas, de acordo com a roteirização (Figura 3).

Figura 3 – Parâmetros para roteirização

| | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Tamanho da frota disponível | Capacidade dos veículos |
| Tipo de frota | Mão de obra |
| Garagem dos veículos | Tempo máximo de rotas |
| Natureza da demanda | Operações envolvidas |
| Localização da demanda | Custo |
| Características da rede | Objetivos |

Fonte: Modificado de Enomoto e Lima (2005)

O autor Ballou (2006) propõe oito princípios como orientações essenciais para a criação de rotas e cronogramas eficientes, a saber:

- Agrupamento de paradas próximas: Carregar os caminhões com volumes destinados a paradas que estejam geograficamente próximas. As rotas dos caminhões devem ser organizadas em torno de grupos de paradas próximas para minimizar o trânsito entre elas e reduzir o tempo total em trânsito.

- Combinação de paradas em dias diferentes: As paradas devem ser combinadas em agrupamentos concentrados e segmentadas por diferentes dias da semana. Os segmentos diários devem ser planejados de forma a evitar a superposição de paradas, o que ajuda a minimizar o número de caminhões necessários e a reduzir o tempo de viagem e a distância percorrida durante a semana.

- Início dos roteiros na parada mais distante: Os roteiros devem começar na parada mais distante do depósito. Após identificar essa parada, deve-se selecionar as paradas próximas que completam a capacidade do caminhão.

- Sequenciamento em forma de lágrima: O sequenciamento das paradas deve ser planejado para evitar sobreposições, formando um percurso em forma de lágrima.

- Utilização de veículos de capacidade adequada: Os veículos devem ter capacidade suficiente para abastecer todas as paradas de um roteiro, minimizando a distância ou o tempo total percorrido.

- Coletas durante as entregas: As coletas devem ser realizadas ao longo das entregas para minimizar a superposição de roteiros que tende a ocorrer quando essas paradas são atendidas após todas as entregas.

- Atendimento de paradas isoladas: Paradas isoladas, especialmente de baixo volume, são mais custosas em termos de tempo do motorista e despesas do veículo. Utilizar veículos menores ou transporte terceirizado pode ser mais econômico, dependendo da distância e dos volumes envolvidos.

- Gerenciamento de janelas de tempo reduzidas: Pequenas janelas de tempo para paradas muito pequenas podem forçar um sequenciamento longe do padrão ideal.

A otimização de rotas abrange uma variedade de problemas que são fundamentais para várias aplicações logísticas e de transporte. Entre esses, destacam-se o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), o Problema do Carteiro Chinês (PCC), o Problema de Roteamento em Arcos (PRA), o Problema de Roteamento de Veículos (PRV). A solução eficaz desses problemas é crucial para reduzir custos operacionais, melhorar a eficiência logística e minimizar impactos ambientais, sendo abordada por uma combinação de métodos exatos, heurísticas e meta-heurísticas (Silva, 2020).

Muitos dos problemas relacionados a otimização de rotas são classificados como NP-difíceis. Essa classificação significa que não existe (até onde se sabe) um algoritmo eficiente (em tempo polinomial) que resolva todos os casos desses problemas de maneira exata (Toth *et al.*, 2002).

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é amplamente reconhecido na programação matemática como um dos problemas mais tradicionais e notórios (Applegate *et al.*, 2007). Esse problema clássico de otimização combinatória envolve encontrar a rota mais curta para um caixeiro que deve partir de uma cidade, visitar todas as outras cidades uma única vez e retornar à cidade de origem. Em termos formais, considerando um grafo ponderado $G = (N, M)$, onde N é o conjunto de vértices e M o conjunto de arestas, o objetivo do PCV é encontrar um ciclo Hamiltoniano com o menor custo possível (Sabry, 2020).

O PCV é classificado como um problema NP-difícil (Garey *et al.*, 1979) e tem numerosas aplicações práticas em áreas como sistemas de manufatura, transportes,

escalonamento de tarefas, coleta e entrega de produtos, roteirização de veículos, localização de instalações e redes de telecomunicações, entre outras (Goldbarg *et al.*, 2005).

Problemas de Roteamento em Arcos (PRA) são comuns em várias áreas da logística e da pesquisa operacional. Exemplos desse tipo de problema incluem a limpeza e varrição de ruas, a remoção de neve após tempestades, a medição de consumo por leituristas, a entrega de correspondências residenciais e a coleta de lixo doméstico (LARSON; ODoni, 1981). De acordo com Eiselt *et al.*, (1981), o objetivo dos problemas de roteamento em arcos é determinar a(s) rota(s) de menor custo para visitar determinados arcos de um grafo, respeitando uma ou mais restrições adicionais.

Ao longo dos anos, vários modelos de Problemas de Roteamento em Arcos foram desenvolvidos, tornando-se progressivamente mais complexos e orientados para aplicações práticas. O primeiro estudo documentado sobre roteamento em arcos remonta a quase três séculos atrás, com o famoso problema das sete pontes de Königsberg. Este problema foi fundamental para o início das discussões sobre a teoria dos grafos e grafos Eulerianos (Silva, 2020).

O Problema do Carteiro Chinês (PCC) é um problema de otimização classificado entre os problemas de roteamento em arcos, com o objetivo de determinar um percurso em um grafo que minimize a distância ou o custo total (DROR, 2012). Segundo Goldbarg *et al.* (2005), o percurso do carteiro se diferencia do circuito Euleriano ao permitir a repetição de arestas quando necessário.

Guan (1962), ao tentar elaborar uma rota eficiente para um carteiro, identificou o seguinte problema: o carteiro deve cobrir toda a sua rota designada e retornar ao ponto inicial percorrendo a menor distância possível. Assad e Golden (1995) explicam que o problema proposto por Guan envolvia a adição de um conjunto de arestas ao grafo para garantir que todos os nós tivessem grau par. No entanto, segundo os autores, a solução de Guan não resultava em um algoritmo de tempo polinomial para resolver o problema do carteiro.

O Problema do Carteiro Chinês (PCC) pode ser aplicado em grafos não direcionados, direcionados e mistos, com requisitos específicos para cada tipo que garantem o balanceamento do grafo e, conseqüentemente, a determinação do

percurso do carteiro. Eiselt *et al.* (1995) detalham essas condições: para grafos não direcionados, o grafo deve ser conexo e todos os nós devem ter grau par, conforme as condições estabelecidas por Guan (1962); para grafos direcionados, o grafo precisa ser fortemente conexo e todos os nós devem ter o grau de entrada igual ao grau de saída (*indegree* igual ao *outdegree*); e para grafos mistos, o grafo deve ser fortemente conexo e todos os nós devem ter grau par tanto para arestas quanto para arcos.

Nos casos de grafos não direcionados e direcionados, existem algoritmos e modelos matemáticos que fornecem soluções exatas em tempo polinomial para o PCC. No entanto, para grafos mistos, o problema é considerado NP-completo em termos de complexidade (Wang *et al.*, 2002). Isso significa que, enquanto soluções eficientes podem ser encontradas para grafos não direcionados e direcionados, o PCC em grafos mistos apresenta uma dificuldade computacional maior, exigindo métodos aproximados ou heurísticos para sua resolução prática (Wang *et al.*, 2002).

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) refere-se a uma classe de problemas de distribuição que englobam diversas variações. A versão clássica do PRV pode ser definida da seguinte maneira: considere um grafo $G = (U, A)$ onde $U = \{u_0, u_1, \dots, u_n\}$ é o conjunto de vértices (clientes) e $A = \{(u_i, u_j) : u_i, u_j \in U, i \neq j\}$ é o conjunto de arcos. O número de veículos pode ser fixo ou uma variável de decisão (Sosa *et al.*, 2007).

O PRV clássico, que inclui restrições de capacidade e distância máxima, tem como objetivo designar um conjunto de m rotas de entrega e/ou coleta de modo a: i) minimizar o custo total das rotas percorridas pela frota; ii) garantir que cada rota comece e termine no depósito; iii) assegurar que cada cliente seja atendido por exatamente um veículo; iv) manter a carga total de cada veículo dentro de sua capacidade Q ; e v) garantir que o tempo total necessário para completar qualquer rota não exceda um limite pré-estabelecido T , que abrange tanto os tempos de viagem entre os clientes quanto os tempos de serviço em cada cliente (Sosa *et al.*, 2007).

O PRV pertence à classe de problemas NP-Difícil, uma vez que ele é derivado do Problema do Caixeiro-Viajante (Lenstra; Kan, 1981). Assim, devido a sua complexidade, em problemas com elevadas dimensões, o uso das heurísticas se torna mais apropriado (COELHO *et al.*, 2016).

As heurísticas associadas ao PRV podem ser classificadas em três categorias principais: heurísticas construtivas, heurísticas de refinamento e meta-heurísticas. As heurísticas construtivas são responsáveis por encontrar soluções iniciais, que são posteriormente aprimoradas através da aplicação de heurísticas de refinamento. Essas heurísticas de refinamento realizam buscas locais em busca de soluções melhores, aprimorando o valor da função objetivo. Por outro lado, as meta-heurísticas são procedimentos projetados para encontrar novas soluções aplicando, em cada etapa, uma heurística subordinada. Os autores observam que a maioria das meta-heurísticas para o PRV são baseadas em heurísticas de construção e refinamento, utilizando o princípio da busca local (Kytöjoki *et al.*, 2007).

Nos estudos sobre roteirização, várias metodologias são empregadas para a resolução dos problemas de otimização, com destaque para os métodos heurísticos. Entre os mais utilizados estão o método de varredura, o método do vizinho mais próximo, o método de Clarke e Wright, entre outros (Azevedo, 2023).

Segundo Ballou (2006), o método de varredura é recomendável devido à sua capacidade de resolver problemas de forma rápida e eficaz, apresentando uma margem de erro de 10%, o que é considerado aceitável quando se busca uma solução ótima absoluta.

Novaes (2007) classifica o método de varredura como heurístico, caracterizado por duas etapas distintas: a primeira etapa consiste em agrupar os pontos de demanda de acordo com algum critério de proximidade; a segunda etapa envolve a solução independente de cada grupo formado. A utilização de softwares ou outros algoritmos em conjunto com o método de varredura pode melhorar a qualidade e a precisão dos resultados, especialmente ao definir as rotas de cada grupo (Souza *et al.*, 2014).

O método do vizinho mais próximo, mostrado por Bellmore e Nemhauser (1968), envolve a seleção do ponto mais próximo ao ponto inicial em cada etapa, acrescentando progressivamente componentes à solução. Goldbarg e Luna (2000) descrevem essa heurística como um processo que começa no vértice de origem e, a cada etapa, adiciona o vértice não visitado mais próximo ao último vértice visitado. O procedimento continua até que todos os vértices sejam visitados, finalizando com a conexão entre o último vértice visitado e o vértice de origem.

Conforme Santos (2006), esse método é frequentemente utilizado para encontrar uma solução inicial para o problema, que é posteriormente aprimorada por outras técnicas e modelos. O método é simples e rápido de aplicar, sendo eficaz para problemas de alta complexidade.

O método de Clarke e Wright tem como objetivo otimizar a roteirização de uma frota de veículos de capacidade limitada, partindo de um depósito central. Os autores propuseram algumas diretrizes para este problema, como o conhecimento da menor distância entre dois pontos e a homogeneidade dos produtos em relação à unidade de medida (Azevedo, 2023)

Segundo Novaes (2016), o método é baseado no conceito de ganho e começa pela configuração mais desfavorável, em que cada veículo sai do centro de distribuição (CD), atende a apenas um cliente e retorna. Ballou (2006) aponta que uma das vantagens desse método é a flexibilidade para lidar com restrições, além da rapidez computacional, tornando-o mais eficiente que o método de varredura.

Novaes (2007) descreve o método de Clarke e Wright em etapas específicas: (1) calcular a economia de distância (*savings*) S_{ij} para todos os pares i e j , onde i e j são diferentes de zero; (2) ordenar as economias de distância em ordem decrescente; (3) iniciar a análise com o par de pontos que apresenta a maior economia de distância.

2.4.2 Eficiência da coleta de RSU

O planejamento eficaz de planos de resíduos sólidos representa um desafio significativo nos atuais sistemas de gestão de resíduos sólidos. Uma das principais questões envolve a alocação eficiente de veículos e equipes de coleta em regiões metropolitanas e em expansão (Li *et al.*, 2008).

Estudos têm explorado a aplicação de métodos de Pesquisa Operacional e Gestão para o gerenciamento de resíduos sólidos, utilizando técnicas científicas. Esses estudos podem ser classificados em duas categorias principais, segundo Bodin *et al.* (1989): (i) o projeto de rotas de coleta eficientes; e (ii) a formulação de políticas adequadas para a cobrança econômica.

A pesquisa foca no desenvolvimento de rotas de coleta eficientes, visando reduzir o tempo de serviço e compactar as áreas cobertas. Para isso, são aplicadas variações de problemas como o do carteiro chinês (Bodin *et al.*, 1989; Male *et al.*, 1978)

e o problema de roteamento de veículos (VRP), que buscam definir uma sequência de viagem pelas ruas que minimize o tempo total (Angelelli *et al.*, 2002; Tung *et al.*, 2000).

A pesquisa na segunda categoria enfatiza a elaboração de políticas adequadas para uma arrecadação eficiente. Kulcar (1996) propõe um modelo de otimização em duas fases para reduzir o número de depósitos e terminais, além dos custos de transporte. Kirca *et al.* (1988) e Gottinger (1988) desenvolvem modelos de programação matemática para determinar a quantidade e a localização das estações de transferência. Eisenstein e Iyer (1997) exploram um modelo de escalonamento dinâmico baseado em um processo de decisão, com o objetivo de reduzir a capacidade ociosa dos caminhões. Bodin *et al.* (1989) desenvolvem um procedimento heurístico para gerar rotas diárias de coleta, utilizando informações estatísticas de carga e tempo de viagem. Bhat (1996) projeta um modelo de simulação-otimização para alocar caminhões em locais de descarte de maneira eficiente.

No Brasil, a FUNASA (Brasil, 2019) traz alguns índices para ajudar os gestores nas tomadas de decisões sobre planejamento da coleta de RSU. Para a coleta de 16 m³ de resíduos sólidos urbanos, estima-se ser necessário três garis trabalhando 4 horas, com uma eficiência entre 4,30 e 6,8 domicílios por gari por minuto e uma velocidade média de coleta de 6,5 km/h. A descarga dos resíduos varia conforme o tipo de caminhão utilizado: caminhões basculantes necessitam de apenas 5 minutos, enquanto caminhões sem basculante, operados por três garis, requerem de 15 a 20 minutos. Em termos de custos, a coleta de lixo oscila entre US\$ 15 e US\$ 45 por tonelada, e o transporte até os aterros varia de US\$ 6 a US\$ 20 por tonelada.

O Instituto Brasileiro de Obras Públicas (IBRAOP) apresenta um procedimento para avaliar a adequação do dimensionamento da frota utilizada nos serviços de coleta de resíduos sólidos domiciliares (RSD) e sua conformidade com as especificidades do município. Esta verificação é de alta relevância, pois o dimensionamento da frota é um componente fundamental no planejamento dos serviços de coleta, impactando diretamente a formulação do orçamento. Uma falha nesse processo pode resultar em sobrepreço ou superfaturamento durante a execução do contrato, sendo, por vezes, necessário revisar os critérios empregados no projeto de rotas e percursos de coleta (IBRAOP, 2017).

Para os setores de coleta devem-se considerar adequadamente o equilíbrio entre as quantidades de resíduos a serem coletados, levando em conta fatores como a homogeneidade das regiões, divisões técnico-administrativas, obstáculos naturais, tipo de ocupação, sazonalidade, densidade populacional e a extensão máxima percorrida pelas equipes dentro de condições adequadas de trabalho. Além disso, deve-se verificar se foram corretamente determinados os parâmetros operacionais para cada setor, incluindo: a distância entre a garagem e o centro geométrico do setor de coleta; a distância entre o setor de coleta e o ponto de descarga, seja destinação final ou transbordo; a extensão total de cada roteiro; e as velocidades médias, tanto de coleta, que varia geralmente entre 5 e 10 km/h, a depender da densidade demográfica e condições viárias; quanto fora do percurso de coleta, que pode variar entre 25 km/h e a velocidade máxima permitida. As distâncias podem ser verificadas utilizando ferramentas como Google Earth/Maps, ou outras disponíveis (IBRAOP, 2017).

Em relação a frequência, deve-se verificar a definição dos parâmetros utilizados para a regularidade e frequência da coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares em cada setor, considerando fatores como clima, uso e ocupação do solo, produção de resíduos, condições viárias e a viabilidade de coletas diurnas e noturnas, com o objetivo de maximizar a eficiência das guarnições de coleta. A coleta noturna, especialmente em áreas comerciais e de alto fluxo de veículos e pedestres, apresenta a vantagem de maior rendimento operacional, devido à menor obstrução das vias e passeios, além de permitir a utilização dos mesmos veículos usados na coleta diurna, reduzindo a necessidade de frota adicional. Ademais, a coleta em dois turnos é recomendada para a redução de custos e a otimização da utilização da frota (IBRAOP, 2017).

O dimensionamento da frota deve ser realizado com base na avaliação do tipo de veículo, considerando a capacidade específica da caçamba ou do compactador, permitindo a utilização conjunta de veículos com diferentes capacidades operacionais, com a quantidade de cada tipo determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos. Especificamente, para veículos de coleta do tipo caminhão toco (com um eixo traseiro) equipados com compactadores de 15 m³, a capacidade de carga projetada (C), somada ao peso do veículo, excede o peso bruto total permitido pelo

Conselho Nacional de Trânsito de 16,8 toneladas. Portanto, é recomendado que compactadores de 15 m³ sejam acoplados a caminhões *truck* (com dois eixos traseiros). De maneira geral, a verificação do dimensionamento da frota deve levar em consideração o tamanho do município (IBRAOP, 2017).

Para cidades de até 200.000 habitantes a IBRAOP (2017) utiliza o mesmo método de cálculo do Manual de Saneamento da FUNASA (Brasil, 2019), onde, para dimensionar a quantidade total de veículos necessários para a coleta de resíduos sólidos, considera-se a quantidade diária de resíduos a ser coletada, medida em toneladas. Esse valor é então dividido pela capacidade efetiva de carga de cada veículo de coleta, também em toneladas, multiplicada pelo número total de viagens que cada caminhão realiza ao longo de um dia, considerando todos os turnos. Além disso, um fator de ajuste é aplicado para levar em conta possíveis variações operacionais ou contingências logísticas.

Caso o valor encontrado esteja fora do esperado, e deseja-se avaliar com maior detalhamento a frota de veículos, deverá ser utilizada a metodologia para cidades com mais de 200.000 habitantes. Nesse método, além dos parâmetros mencionados anteriormente, demais fatores que podem influenciar o tempo e a eficiência das operações de coleta de resíduos, a saber: a duração útil da jornada de trabalho, a extensão total das vias do setor de coleta, as distâncias do mesmo à garagem e ao ponto de descarga, bem como, as velocidades de deslocamento (IBRAOP, 2017).

Tendo como referência um *benchmarking* realizado entre cidades europeias, conforme apresentado pela IBRAOP (2017) e fornecido pelo *European benchmarking conducted by CSD*, foram utilizados determinados parâmetros como indicadores chave. Dentre esses, destaca-se o número de habitantes por caminhão de 4.700 a 15.000, com variação de 1 a 3 caminhões, as toneladas coletadas por gari por mês de 30 e 125, com variação de 1 a 4 caminhões e a eficiência de coleta, medida em toneladas por hora, oscila entre 0,5 e 3,5 toneladas, com variação de 1 a 7 caminhões. Esses indicadores evidenciam a variação na eficiência e na escala das operações de coleta de resíduos. Barros (2012) corrobora a análise de indicadores destacando que, quanto mais desenvolvido o local, maior o acesso a recursos e, conseqüentemente,

menor o quantitativo de pessoas atendidas pelo mesmo veículo, indicando mais veículos nas ruas.

No Brasil, Jacinto; Rosa; Banos (2014) avaliaram as rotas de coleta de RSD onde os autores buscaram heurística para soluções do problema da coleta com base no Problema do Carteiro Chinês Capacitado com Múltiplas Viagens (PCCC-MV).

A heurística proposta neste estudo foi aplicada no município de Cariacica, localizado no estado do Espírito Santo, que possui 176 bairros. Os dados utilizados foram fornecidos pelo Governo Estadual, através da base GEOBASES, que inclui características viárias essenciais, como: extensão do logradouro, nome do logradouro, nome do bairro e número de domicílios. As velocidades dos caminhões foram fornecidas pela Prefeitura Municipal de Cariacica: 20 km/h durante a coleta e 40 km/h em circulação sem coleta. O tempo gasto na coleta em cada rua foi calculado dividindo a extensão do logradouro pela velocidade correspondente, da mesma forma que o tempo de circulação sem coleta foi estimado (Jacinto; Rosa; Banos, 2014). O número de domicílios por logradouro foi determinado, sendo utilizado para a estimativa da quantidade de resíduos sólidos gerados em cada logradouro, conforme proposto por Carvalho (2001).

A empresa contratada opera com dez caminhões com prensa, cada um com capacidade máxima de 10.000 kg, mas a Prefeitura recomenda um limite de 8.000 kg por questões de segurança, valor adotado por Jacinto; Rosa; Banos (2014). Cada caminhão é acompanhado por uma equipe de coletores com uma carga horária de 6 horas por turno. A elaboração dos roteiros é feita de maneira empírica, baseada na demanda decorrente do crescimento populacional ou das características regionais, com roteiros alternados que resultam em períodos de até 72 horas entre coletas em alguns bairros (Jacinto; Rosa; Banos, 2014).

A heurística proposta consiste em sete etapas sequenciais: i) Geração das rotas iniciais para todos os caminhões, levando em consideração sua capacidade máxima ou o tempo total disponível no turno; ii) Identificação dos caminhões que completaram o tempo total de operação permitido no turno e, portanto, não estão disponíveis para novas rotas nesse período; iii) Identificação dos caminhões que atingiram sua capacidade máxima, mas não completaram o tempo total do turno, e que, portanto, ainda podem ser alocados para outras rotas no mesmo turno; iv) Para

os caminhões identificados na etapa 3, subtrai-se o tempo já utilizado em cada rota e o tempo necessário para descarregar no depósito do total disponível para o turno; v) Caminhões com menos de uma hora restante devem ser considerados como tendo completado o turno, uma vez que é inviável criar rotas menores que uma hora; vi) Atualização da demanda de coleta de resíduos sólidos, zerando-a para todas as ruas (arcos) que foram atendidas por uma rota; vii) Com base nos tempos disponíveis calculados na etapa 4, gera-se novas rotas seguindo o procedimento descrito na etapa 1, ajustando-se às novas disponibilidades de tempo de cada caminhão (Jacinto; Rosa; Banos, 2014).

Baseando-se no problema de roteirização periódica, foi desenvolvido um cronograma periódico de atendimento que leva em consideração a possibilidade de cobertura diária, alinhada com os horários dos quatro turnos de trabalho: 06h00-12h00, 12h00-18h00, 18h00-00h00 e 00h00-06h00. A distribuição proposta garante que todos os logradouros recebam atendimento mínimo em dias alternados, totalizando quatro vezes por semana (Jacinto; Rosa; Banos, 2014).

Com base no estudo os autores conseguiram gerar, com a nova heurística, um plano de coleta de RSU com um ganho, aproximado, de 26,1 viagens por semana a mais por caminhão e um adicional de 9,65% da capacidade em quilos na frota. Logo, são dois ganhos de eficiência importantes para a Prefeitura de Cariacica-ES, trazendo economia, maior capacidade de atendimento à população, melhorando o meio ambiente e reduzindo doenças pela exposição de resíduos por muito tempo nos logradouros por coleta inadequada (Jacinto; Rosa; Banos, 2014).

A busca por melhorar a eficiência na coleta de RSU é realizada, também, em outros países. Apresenta-se, a seguir, alguns estudos reportados fora do Brasil, onde a busca por melhor eficiência no gerenciamento da coleta de RSU foram desenvolvidas, resguardando as particularidades dos locais:

a) Vietnã

A gestão de RSU é classificada como serviço de alta importância por autores como Beigl; Lebersorger; Salhofer (2008). Tung e Pinnoi (2000) desenvolveram um modelo de roteamento de veículos (VR) aplicado à cidade de Hanói, Vietnã, incorporando um depósito, um aterro e múltiplos locais de coleta.

O modelo, que assume veículos homogêneos operando sob restrições de janela de tempo, visa minimizar os tempos e distâncias de viagem. Apaydin e Gonullu (2008) propuseram uma extensão desse modelo, considerando as emissões de gases de escape dos veículos em movimento como um critério adicional na função objetivo. Utilizando tabelas padronizadas de emissão para determinados tipos de veículos, eles calcularam CO₂, HC, CO e PM, integrando essas métricas na otimização das rotas.

Tavares *et al.* (2009) sugeriram que rotas mais curtas nem sempre resultam no menor consumo de combustível, uma vez que inclinações negativas nas estradas podem reduzir a resistência dos veículos à tração. Para isso, eles propuseram o uso de modelagem tridimensional em sistemas de informação geográfica (SIG 3D), incorporando fatores como a carga do veículo e as condições de condução, a fim de determinar as rotas ideais para o consumo mínimo de combustível.

Fan *et al.* (2010) apresentaram um modelo VR que inclui um depósito, uma estação de transferência e aterros sanitários, onde os resíduos são classificados em função de seu poder energético para otimizar a destinação por incineração ou aterramento. Em paralelo, Arribas; Biazquez; Lamas (2010) desenvolveram uma metodologia para projetar sistemas de coleta de resíduos sólidos urbanos que minimizam os custos operacionais e o tempo de coleta, otimizando a eficiência do sistema.

Galante *et al.* (2010) e Larsen *et al.* (2010) abordaram a localização e dimensionamento de estações de transferência e a avaliação do ciclo de vida de sistemas alternativos de coleta, visando equilibrar custos e impactos ambientais. Avanços subsequentes, como os modelos propostos por Tan *et al.* (2010), Apaydin e Gonullu (2008), e Faccio, Persona e Zanin (2011), integraram incertezas, dados em tempo real e variáveis estocásticas nos modelos de VR.

Por fim, Hemmelmayr *et al.* (2013) e Levis *et al.* (2013) desenvolveram abordagens que combinam otimização de roteamento e alocação de recursos com análises de ciclo de vida, promovendo uma gestão de resíduos mais sustentável e eficiente.

b) Uganda

A cidade de Kampala enfrenta desafios na gestão de resíduos sólidos, com uma geração diária estimada entre 1.500 e 2.500 toneladas, das quais apenas 40% a 45% são coletadas e destinadas ao único aterro sanitário, Kiteezi. Aproximadamente 600 toneladas são recolhidas pela autoridade municipal, enquanto 300 toneladas são coletadas por operadores privados, totalizando cerca de 900 toneladas por dia no aterro. A maior parte dos resíduos restantes é descartada em canais de drenagem ou espaços abertos, sendo frequentemente queimada, com apenas uma pequena fração reciclada, principalmente plásticos e metais (Kinobe *et al.*, 2015).

As rotas de coleta de resíduos em Kampala são determinadas pela prefeitura com base nos locais de descarte e ajustadas conforme a experiência e o conhecimento dos motoristas sobre a área. A maioria dos caminhões de coleta é carregada manualmente, e cada caminhão realiza geralmente mais de duas viagens diárias ao aterro de Kiteezi.

O estudo abrangeu as cinco divisões do distrito da cidade de Kampala gerando entre 1.200 e 1.500 toneladas de resíduos por dia (UBOS, 2012). Apenas cerca de 40% dos resíduos gerados são coletados e transportados para o aterro de Kiteezi, situado a 12 km do centro da cidade, por caminhões da autoridade municipal e do setor privado (Council, 2006; Mugagga, 2006; Nabembezi, 2011). A geração média de resíduos per capita em Kampala é estimada em 0,6 kg por dia (Kinobe *et al.*, 2015).

A cidade de Kampala ainda não implementou a otimização das rotas de coleta de resíduos sólidos como estratégia de gestão, utilizando sistemas baseados em dados limitados. A criação de um sistema integrado de gestão de resíduos que consolide rotas e distribua equitativamente a coleta é necessária para reduzir custos, distâncias e tempos de transporte, além de melhorar a eficiência da coleta em todas as comunidades. O estudo visou otimizar esse processo, determinando as rotas mais eficientes e estimando os resíduos em pontos de coleta temporária (Kinobe *et al.*, 2015).

Para determinar a quantidade de resíduos a ser transportada para o aterro de Kiteezi, a tonelage de resíduos de cada bairro foi dividida entre pontos de transbordo temporária. Foram consideradas duas opções: transporte de 40% e 100% dos

resíduos gerados, resultando em estimativas de 615 e 1.538 toneladas, respectivamente, com base em dados de maio e junho. O software Arc GIS foi utilizado para planejar as rotas dos caminhões, aplicando uma abordagem heurístico-determinística para otimizar o transporte, considerando a menor distância entre os pontos de coleta e o aterro, além da capacidade dos caminhões (Kinobe *et al.*, 2015).

O principal veículo utilizado na coleta foi o caminhão compactador Faw, com motor diesel de 6 cilindros e capacidade de até 6 toneladas. O consumo médio de combustível foi de 0,33 L/km. A equipe de trabalho era composta por um motorista e 4 a 5 auxiliares, contratados ocasionalmente. Embora a velocidade média prevista para os caminhões fosse de 50 km/h, foi considerada uma velocidade média de 30 km/h para refletir as condições reais de tráfego, como engarrafamentos, má qualidade das estradas e o peso do veículo carregado (Kinobe *et al.*, 2015).

A aplicação da roteirização veicular (RV) na coleta de resíduos em Kampala, utilizando caminhões de diferentes capacidades (6, 10 e 18 toneladas), demonstrou maior eficiência à medida que a capacidade dos veículos aumentava. No cenário de coleta de 40% dos resíduos, caminhões maiores reduziram significativamente o número de viagens e a distância percorrida. No cenário de 100% de coleta, a substituição de caminhões de 6 por 18 toneladas resultou em uma redução de 67% na distância, 45% no tempo de viagem e 70% nas viagens necessárias. A análise evidenciou a importância de veículos de maior porte para otimizar a logística de coleta (Kinobe *et al.*, 2015).

c) Taiwan

Taiwan, sendo o segundo país mais densamente povoado do mundo, implementou políticas rigorosas de gestão de resíduos devido à sua geografia montanhosa e alta densidade populacional. Entre essas políticas, destacam-se a triagem obrigatória do lixo e a exigência de que os residentes levem seus resíduos até pontos de coleta designados. O desenvolvimento desse sistema de coleta foi modelado como um problema de roteamento de veículos (PRV), com recolha ponto a ponto. Huang *et al.* (2015) propõem um modelo de otimização em dois níveis, que primeiro define os pontos de coleta e, em seguida, planeja rotas para a coleta e entrega (Huang *et al.*, 2015).

A primeira etapa do processo envolve a análise do município, composto por diversos bairros, para identificar locais adequados para paradas temporárias dos caminhões de coleta de lixo. Esses pontos de coleta são designados em cruzamentos da rede viária residencial, com o objetivo de reduzir a frequência de coleta e oferecer serviços convenientes aos moradores. No entanto, muitos residentes resistem a ter pontos de coleta próximos de suas casas devido a odores e obstruções físicas. O estudo propõe que os caminhões possam parar mais de uma vez em determinados cruzamentos, mas minimiza o barulho e reduz custos de transporte ao diminuir o número de paradas (Huang *et al.*, 2015).

Após definir a localização das paradas para coleta de resíduos com base na frequência de atendimento requerida por cada quarteirão, o modelo determina as rotas dos caminhões coletores e o cronograma de coleta. Durante cada dia de trabalho, um caminhão de coleta realiza múltiplas viagens, iniciando e finalizando no depósito. Cada viagem envolve a visita a uma sequência de pontos de coleta, onde os resíduos são recolhidos, e um destino final, onde os resíduos são descarregados. As rotas dos caminhões ao longo do horizonte de planejamento formam um plano de roteirização completo, assegurando a coleta de todos os resíduos em cada ponto designado. Diferentemente dos PRV clássicos, que pressupõem uma frota de veículos capacitados para atender um conjunto de clientes com demanda conhecida, os autores eliminaram a restrição de visitar cada cliente exatamente uma vez (Huang *et al.*, 2015).

O esquema de solução proposto utiliza o método ACO (Ant Colony Optimization) em conjunto com um algoritmo de melhoria de rota para otimizar a coleta de resíduos. O ACO é uma técnica probabilística que resolve problemas computacionais através da identificação de rotas ideais em grafos. No contexto da coleta de resíduos, o problema envolve designar rotas fechadas para os caminhões, que começam e terminam no depósito, com o objetivo de minimizar tanto o número de caminhões necessários quanto a distância total percorrida. O ACO determina os horários de coleta e identifica os arcos de conexão entre os pontos de coleta, formando rotas otimizadas. Após essa etapa, o algoritmo implementa melhorias nas rotas já estabelecidas, visando eficiência máxima (Huang *et al.*, 2015).

A segunda fase do processo de solução envolve a determinação de rotas utilizando o menor número de caminhões e o menor percurso de distâncias. No estudo, o tempo normal de trabalho para cada caminhão foi das 16h às 22h, e veículo a capacidade foi designada como 250 unidades. A quantidade de lixo gerado a cada dia a partir de um bloco foi assumido para seguir uma distribuição uniforme e os resíduos gerados em qualquer bloco foi assumido como distribuído uniformemente entre pontos de coleta adjacentes. Assim, foi possível determinar a demanda em cada ponto de coleta. Cada motorista de caminhão precisava de um intervalo de 30 minutos entre cada dois trajetos consecutivos; a velocidade média dos caminhões foi de 16 quilômetros por hora e os caminhões permaneceram em cada ponto de coleta por 3 min (Huang *et al.*,2015).

O estudo de Huang *et al.* (2015) comparou o ACO e o ACO com melhoria de rota para confirmar o desempenho superior deste algoritmo adaptado no Problema de Roteamento de Veículos com Entrega Dividida (PRVED) com multiviagem com coleta e entrega. Os resultados das simulações e otimização revelam que o algoritmo ACO com melhoria de rota proporciona um ganho considerável em relação ao ACO sozinho.

d) Malásia

A cidade de Ipoh está localizada no estado de Perak, na Malásia peninsular, e fica a 200 km ao norte de Kuala Lumpur. A cidade está sob a administração da Câmara Municipal de Ipoh (CMI), sendo a autoridade local que coordena diversos serviços em Ipoh, incluindo saúde pública, saneamento, remoção e gestão de resíduos, planejamento urbano, proteção ambiental, controle de edifícios, desenvolvimento social e econômico, e manutenção da infraestrutura urbana. Para a coleta eficiente de resíduos sólidos urbanos, a cidade é dividida em 22 zonas, com coleta em dias alternados na maioria das áreas. O método utilizado é a coleta na calçada, com recipientes comuns esvaziados pelos coletores nos veículos antes do transporte para o aterro de Bercham. Uma equipe típica de coleta é composta por um motorista e três coletores (Malakahmad *et al.*, 2014).

Malakahmad *et al.* (2014) conduziram um estudo em Ipoh para otimizar o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSD), visando reduzir distâncias e tempos das rotas de coleta, aproveitando melhor os recursos existentes para a coleta

seletiva de recicláveis. O estudo foi dividido em três etapas: análise territorial, análise com Sistema de Informação Geográfica (SIG) e planejamento dos serviços. Na análise territorial, foram identificadas necessidades e restrições no serviço de coleta, e cinco rotas em áreas específicas foram selecionadas para um estudo piloto, com avaliações preliminares das condições topográficas e das estradas.

Para gerenciar eficientemente o sistema de coleta de resíduos sólidos, são necessárias informações espaciais detalhadas como localização dos caminhões, taxa de geração de resíduos, tipo de contentores de lixo, rede rodoviária e tráfego relacionado, que foram obtidos do MBI. O mapa base de Ipoh foi obtido do departamento de levantamento e mapeamento da Malásia (JUPEM). Imagens de satélite da cidade de Ipoh foram capturadas do Google Earth (Malakahmad *et al.*, 2014).

Foram definidas cinco rotas, onde qualquer redução da distância entre os pontos de coleta pode ser atrativa, pois reduz o tempo de coleta, o custo e a emissão de poluição atmosférica. Havia mais de uma alternativa para estimar a distância entre dois pontos. Uma forma eficiente de estimativa é a aplicação do espaço euclidiano que é feita com o teorema de Pitágoras, reduzindo um somatório de 34,748 km para 28,701km. Do montante total gasto na coleta, transporte e eliminação de resíduos sólidos, aproximadamente 50 a 70 por cento é gasto na fase da coleta. Este fato é importante porque uma pequena melhoria percentual na operação da coleta pode provocar uma poupança significativa no custo global (Malakahmad *et al.*, 2014).

e) Polônia

Tendo como referência a cidade de Cracóvia, a Câmara Municipal atribuiu ao órgão Municipal Cleaning Service (MCS) a gestão do sistema de coleta de RSU municipal, limpeza das vias públicas e exploração de sistemas de aproveitamento de RSU e pontos de coleta seletiva no município. Para suprir a demanda de coleta dos resíduos foram contratadas empresas para realizar o serviço sob fiscalização da MCS (Hanczar; Pisiewicz, 2015).

O estudo de Jakubiak (2016) teve como objetivo determinar o potencial de otimização, identificar os benefícios das mudanças introduzidas e especificar as restrições que podem influenciar o uso de ferramentas de otimização. A pesquisa

adotou como critério de otimização a minimização da distância percorrida pelo caminhão de coleta de resíduos em uma área habitacional unifamiliar durante dias específicos da semana. O conjunto básico de métodos de solução de problemas incluiu o PCV, uma aplicação do método clássico *branch and bound*, desenvolvido por Little *et al.* (1963).

A primeira etapa foi calcular a rota, enviada pelo planejador. Este documento é uma lista de locais, em ordem alfabética, que a equipe deve visitar. Neste caso, Jakubiak (2016) relatou dificuldades para descrevê-lo como um plano, foi apenas uma lista de locais. A segunda etapa da pesquisa foi uma tentativa de refletir o percurso real realizado pela equipe. O resultado obtido foi a marcação da localização das casas resultadas de acordo com as marcações via satélite. Os cálculos da distância e do tempo de condução foram feitos através de uma ferramenta (ICT) que se conecta ao Google Maps. A última etapa da análise foi a otimização de rotas por meio de uma ferramenta ICT criada pelo autor. A velocidade média do caminhão foi de 9 km/h e foram assumidos na pesquisa 45 segundos para atender um único ponto de coleta (Jakubiak, 2016).

Após a implementação do mecanismo de otimização, a distância do percurso foi reduzida de 33 km para 22 km e o tempo estimado de viagem foi de 6 horas e 4 minutos (sem considerar paradas não planejadas ou outros impedimentos de trânsito). Tendências semelhantes foram observadas nos dias úteis subsequentes para a rota. Diferenças significativas surgiram entre o plano preliminar enviado pelo planejador e a execução real, chegando a representar uma deterioração da rota em relação à melhor solução. Uma grande discrepância foi notada entre a execução real do plano e a solução sugerida pelo autor (Jakubiak, 2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O estudo pode ser classificado mediante a definição do tipo de pesquisa de acordo com a classificação determinada por Gil (2022). Desta maneira, será avaliado o tipo de pesquisa de acordo com os seguintes critérios: objetivos e procedimentos técnico utilizados.

Com relação ao objetivo, classifica-se como pesquisa mista, apresentando características de pesquisa descritiva e exploratória (Gil, 2022).

Apresenta-se como pesquisa descritiva por obter informações detalhadas sobre a coleta de RSU da cidade de Muriaé, estabelecendo relações entre dados e variáveis encontradas, sem a interferência do autor. A pesquisa, ao buscar maior familiaridade com a coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) em Muriaé, torna o funcionamento do serviço público mais explícito. Isso possibilita o tratamento e análise dos dados coletados, concedendo a formulação de hipóteses sobre o problema. Dessa forma, classifica-se, também, como pesquisa exploratória (Gil, 2022).

Com relação aos procedimentos técnicos utilizados na pesquisa, podem ser classificados, conforme Gil (2022) como sendo:

- Pesquisa bibliográfica: para a revisão da literatura a pesquisa foi desenvolvida com base em materiais já elaborados, constituído principalmente de livros e artigos científicos, em que se propõem à análise das diversas posições acerca da coleta de resíduos sólidos.
- Pesquisa de levantamento: o levantamento representativo das rotas das coletas de RSD de Muriaé que ofereceu resultados caracterizados pela precisão estatística. Logo, procura-se identificar as características dos componentes do universo pesquisado, possibilitando a caracterização precisa de seus segmentos.
- Pesquisa-ação: identifica-se na realização do levantamento dos dados, onde foi necessário a interação e colaboração dos motoristas dos caminhões compactadores da coleta de RSU de Muriaé, além dos funcionários que ficam na guarita de pesagem do aterro sanitário. Todos foram informados sobre os objetivos e metodologias da pesquisa, possibilitando a participação e apontamentos relevantes nos estudo.

Concomitante, a importância de dar segmento nos levantamentos, com foco na fidelidade dos dados.

- Estudo de caso: a pesquisa envolveu uma variedade de fontes de evidências, como documentos do DEMSUR, entrevista com colaboradores que realizam o serviço, observação de como está sendo realizada a coleta de RSU. Gil (2022) destaca que essa abordagem é particularmente útil para explorar situações complexas e investigar novas áreas onde há pouco conhecimento estabelecido.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO: MURIAÉ-MG

A cidade de Muriaé, com área total aproximada de 841.693km², pertencente ao circuito da Serra do Brigadeiro, encontra-se na Região Geográfica Intermediária de Juiz de Fora, mais especificamente na Região Geográfica Imediata de Muriaé, fazendo uma fronteira estratégica com outras regiões mineiras importantes como as de Manhuaçu, Viçosa e Cataguases, assim como nos limites entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo (Prefeitura de Muriaé, 2024).

Muriaé se encontra a um raio de 211 km da capital mineira Belo Horizonte (MG), 1326 km de Porto Alegre (RS) e 186 km de Ipatinga (MG).

De acordo com o IBGE 2022, a cidade de Muriaé possui 104.108 habitantes, onde o salário médio mensal é de 1,8 salários mínimos, gerando um PIB per capita de R\$24.137,53, medido em 2021. Apresenta uma área urbanizada de 17,61 km² (IBGE, 2019) distribuída na cidade de Muriaé e nos distritos Boa Família, Vermelho, Belisário, Itamuri, Bom Jesus da Cachoeira, Pirapanema, Macuco. O município apresenta 88,9% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 79% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 53,9% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio).

A região de Muriaé é caracterizada por municípios que apresentam significativa infraestrutura e forte crescimento nos setores comercial e industrial. A maior parte do produto interno bruto (PIB) da região é proveniente do setor terciário, conferindo à cidade uma robusta infraestrutura de serviços. A indústria também possui um papel relevante, com destaque para a indústria da moda. Muriaé é reconhecida

como o quarto maior polo têxtil de Minas Gerais, sendo notória pela confecção de artigos de vestuário e acessórios (Prefeitura de Muriaé, 2024).

O polo de moda de Muriaé, que inclui os municípios de Muriaé, Eugenópolis, Laranjal, Patrocínio do Muriaé e Recreio, é composto por cerca de 750 empresas formais. Estas empresas empregam diretamente cerca de 13.000 profissionais e produzem aproximadamente 2.500.000 peças por mês, gerando um movimento econômico anual em torno de 230 milhões de reais. Nos últimos anos, este polo tem se consolidado como uma referência importante no setor de confecções no Brasil, investindo em máquinas e equipamentos modernos, desenvolvimento de produtos, pesquisa, utilização de tecidos inovadores e, principalmente, em *design* (Prefeitura de Muriaé, 2024).

Além da indústria da moda, outras indústrias, como as de produção de alimentos e bebidas e montagem de veículos, complementam o parque industrial de Muriaé. No setor agropecuário, que possui uma participação modesta no PIB, destacam-se a criação de bovinos (especialmente gado leiteiro), galináceos, suínos e a produção de cana-de-açúcar, arroz e banana (Prefeitura de Muriaé, 2024).

De acordo com a classificação de Köppen, a região do Município de Muriaé se encontra na faixa de Cwa, isto é, apresenta clima do tipo subtropical, quente e úmido no verão influenciado pelas monções. Neste clima, o verão é pelo menos dez vezes mais chuvoso do que o inverno, que é seco. Pode-se dizer também que 70% da chuva ocorre durante os meses mais quentes, e somente 30% cai nos meses mais frios. A média do mês mais frio está acima de 0 °C ou -3 °C, pelo menos um mês tem temperatura média acima de 22 °C e ao menos quatro meses apresentam média acima de 10 °C (Köppen Climate Classification System for Brazil, 2024).

3.3 GERENCIAMENTO DE RSU EM MURIAÉ - MG

O Departamento Municipal de Saneamento Urbano (DEMSUR) foi estabelecido em 1997, consolidando as funções anteriormente desempenhadas pelo Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DEMAE) e pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DEMLURB), ambos extintos. Conforme estipulado na lei de criação da autarquia, as atribuições do DEMSUR incluem a administração dos serviços de água potável, esgoto sanitário, resíduos sólidos, limpeza urbana,

conservação de logradouros, drenagem pluvial, além da fiscalização de posturas relacionadas ao saneamento básico, limpeza urbana e preservação ambiental (Muriaé, 2024).

O Sistema de Limpeza Urbana do município de Muriaé, pertencente à Divisão de Limpeza Urbana (DLU), é mais um serviço sob a responsabilidade do DEMSUR. Nele são realizados os serviços de varrição, coleta de lixo, mutirões de capina, transporte e destinação final do lixo residencial e não-residencial, no perímetro urbano, nos distritos e povoados de Muriaé (Muriaé, 2024).

O Departamento de Limpeza Urbana (DLU) emprega aproximadamente 190 servidores efetivos que desempenham diversas funções relacionadas à limpeza urbana. A distribuição dos funcionários é a seguinte: 60 dedicam-se à coleta de lixo, 110 realizam a varrição das vias públicas e os demais desempenham funções como motoristas, vigias, operadores de máquinas, lavadores, mecânicos e encarregados. Além dessas atividades, o DLU é responsável pela gestão adequada do destino final dos resíduos sólidos (Muriaé, 2024).

Um dos pontos de apoio do Departamento de Limpeza Urbana (DLU) está situado no bairro Boa Esperança, adjacente ao Complexo Poliesportivo Gilberto Tanus Braz (Rodrigo). Este local serve como base para todas as operações do sistema, incluindo escritório e almoxarifado. Outro ponto de apoio fica próximo ao centro, localizado na Estação de Tratamento de Esgoto do bairro Safira, onde ficam estacionado caminhões de suporte ao DLU, incluindo os caminhões compactadores, tanto os do próprio DEMSUR, quanto dos terceirizados. Deste local, os caminhões compactadores de lixo são despachados para serviços de coleta pela cidade (Muriaé, 2024).

Para que os serviços de limpeza na cidade de Muriaé sejam executados com eficiência, o setor dispõe de 23 veículos próprios, sendo veículos leves, médios e pesados e de 7 veículos agregados. A categoria dos pesados são 12 caminhões, sendo 2 caminhões caçamba, 1 caminhão carroceria aberta (personalizado para coleta seletiva) e 7 caminhões compactadores. Caminhões médios 1 caçamba, 1 caminhão personalizado para coleta seletiva, caminhão Pipa. Além desses veículos, o DLU conta com 5 caminhões compactadores terceirizados para atuar na coleta

domiciliar. O DLU dispõe, ainda, de 1 trator pá-carregadeira que presta seus serviços no Aterro Sanitário (Muriaé, 2024).

Entre as atividades rotineiras desenvolvidas pelo Departamento de Limpeza Urbana (DLU), destacam-se: a varrição diária das principais ruas e logradouros públicos; a coleta programada de lixo doméstico; comercial e industrial com transporte até o aterro sanitário; a realização de mutirões de limpeza e capina em bairros, distritos e povoados; o tratamento de resíduos sólidos urbanos; e, a coleta seletiva de resíduos domésticos (Muriaé, 2024).

Os resíduos provenientes da limpeza urbana e da coleta domiciliar são direcionados ao aterro sanitário pertencente ao Município. O aterro sanitário de Muriaé-MG foi construído na região denominada Retiro do Campo Formoso, Zona Rural do município, com área de 195.5700,308 m², sendo inaugurado em 2014, prevendo 20 anos de operação, o que leva a vida útil até 2033. Para ele são encaminhadas em média 70 toneladas de RSU por dia, pertencente ao município de Muriaé (Muriaé, 2023).

O acesso à área é realizado por estrada vicinal sem pavimentação. No entorno do aterro sanitário há pequenas propriedades rurais e o corpo hídrico mais próximo está a, aproximadamente, 30 m, sendo este um afluente do Rio Glória, localizado numa cota abaixo da cota do aterro sanitário (Muriaé, 2023).

Anteriormente, a área era um aterro controlado sob responsabilidade do DEMSUR, que estava em operação desde 1996 e encerrou suas atividades em março de 2014, quando iniciou a operação do atual Aterro Sanitário de Muriaé, visualizado na Carta índice de Muriaé (2023).

A área destinada à disposição final dos Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) foi construída utilizando o método de rampa, que envolve a disposição dos resíduos em um terreno inclinado. Após a disposição na plataforma, os resíduos são compactados até o recobrimento final de cada etapa, quando o topo do declive é atingido. Esse processo é repetido até que toda a área projetada seja ocupada (Muriaé, 2024).

A Figura 4 é uma imagem aérea, fornecida pelo DEMSUR, mostra a sua estrutura e método de construção, chamando atenção para lagoa de tratamento de chorume na parte inferior, de cotas mais baixas.

Figura 4 - Aterro sanitário de Muriaé-MG



Fonte: DEMSUR (2024)

A construção da área inclui nove plataformas, projetadas para uma vida útil total de aproximadamente 20 anos, assumindo a implementação de uma coleta seletiva eficiente (Muriaé, 2024).

Outro serviço apresentado pelo DLU é a coleta seletiva, que é a coleta de resíduos sólidos previamente segregados, pela população, conforme sua constituição ou composição. Os materiais recicláveis no município de Muriaé são coletados pelo DEMSUR, conforme cronograma e localidades atendidas, e através das duas associações existentes e devidamente legalizadas com apoio da Prefeitura Municipal. Atualmente, essa coleta abrange em torno de 56,32% da população urbana (SNIS, 2021), mas não se estende aos distritos e à área rural. No ano de 2022, a coleta seletiva recolheu 550 toneladas de resíduos sólidos, sendo 165,00 toneladas (30%) recuperadas (SNIS, 2022).

De acordo com o SNIS (2022) foram geradas 23.600,10 toneladas de resíduos sólidos urbanos no município de Muriaé, atendendo 95.893 habitantes, o que representa 92,11% da população total. Logo, tem-se uma massa per capita coletada de 0,67 kg. Em relação a produtividade da atividade, foram coletados 847,19 kg por funcionário. Para a gestão desses resíduos foram gastos R\$2.966.279,61.

Em questões de estrutura política, o SNIS (2022) informa que Muriaé aprovou a política de saneamento básico, conforme a Lei 11.445/2007 em outubro de 2012, e o plano municipal correspondente foi aprovado em 2020, com vigência até outubro de 2024. Embora o município possua um plano de saneamento básico, ele não tem um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) conforme a Lei nº 12.305/2010. Mas, conforme pesquisa realizada no DEMSUR, o PMGIRS foi realizado em 2023, já foi aprovado pelo setor técnico e está aguardando aprovação da Câmara Municipal.

3.4 COLETA NO MUNICÍPIO: LEVANTAMENTO DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO

O levantamento de dados para esse trabalho foi realizado em parceria com o DEMSUR e o DLU. Inicialmente foi verificado com os coordenadores do DLU a demarcação de cada rota no mapa da cidade, sendo traçado em um mapa impresso todo o circuito até a o aterro sanitário.

Uma vez com todas as informações geográficas sobre a rotas, foram compilados no *software* QGIS versão 3.36.3, tendo como base o mapa de Muriaé fornecido pela Autarquia, os caminhos das rotas e regiões de abrangência, sendo possível obter as distâncias de cada rota, o percurso linear de coleta, e a distância ao aterro sanitário.

Com auxílio do Google Earth (2024), foi possível analisar o raio de distância de cada distrito e da sede municipal, ao aterro sanitário, que são: Muriaé (4,59 km), Boa Família (20,81 km), Vermelho (10,86 km), Belisário (25,83 km), Itamuri (11,52 km), Bom Jesus da Cachoeira (18,84 km), Pirapanema (16,48 km), Macuco (15,39 km).

Após o levantamento das rotas, foi realizada uma visita ao pátio de apoio ETE Safira, onde foram catalogados todos os caminhões compactadores utilizados na coleta de RSU, totalizando 12 unidades.

Para caracterização da quantidade de massa de RSU em cada rota, foi realizado o estudo com dados da balança do aterro sanitário. Com esses dados foi criada uma planilha que contemplasse dados de todos os caminhões que chegassem ao aterro para descarregar, entre o dia 08/08/2023 ao dia 17/10/2023. O porteiro utilizou uma planilha para coletar diversas informações dos motoristas, incluindo a

placa do veículo, o horário de entrada e saída, e as massas de entrada e saída. Além desses dados, o porteiro registrou a quilometragem de chegada, o nome do motorista, o número da rota, a empresa responsável pelo transporte, o tipo de veículo, e o tipo de resíduo transportado. Também foram registradas as condições meteorológicas no momento da entrada e a identificação do porteiro responsável. Qualquer observação relevante que pudesse impactar a medição foi devidamente registrada para garantir a precisão das informações.

A fim de que os motoristas soubessem informar corretamente qual rota estavam fazendo, realizou-se uma reunião (Figura 5) com todos os colaboradores que conduzem os caminhões compactadores, sejam eles do DEMSUR ou terceirizados, para que tomassem conhecimento de qual a numeração da rota que estavam fazendo. A todos foram entregues, de modo virtual, uma cartilha informativa com esclarecimentos acerca da importância e motivo do estudo (Anexo I).

Figura 5 – Reunião com colaboradores DEMSUR



Fonte: Autor (2024)

Por fim, após 72 dias de monitoramento, os dados foram devidamente tabulados a fim de iniciar a etapa de tratamento e análise.

3.5 INDICADORES DE OPERAÇÃO

A análise de eficiência foi realizada através dos parâmetros obtidos pela compilação dos dados levantados, estudos e informações fornecidos por outros autores abordados na revisão bibliográfica da literatura e por índices e métodos fornecidos por órgãos públicos brasileiros, conforme metodologia detalhada nos tópicos 3.5.1 e 3.5.2.

Após essa análise, foram selecionadas 3 rotas – R2, R8 e R12; representativas pela uniformidade (bairros isolados e predominantemente residenciais) e menor grau de interferência por outras rotas (não possui outras rotas passando por esses bairros), para caracterização mais detalhada, levando em consideração fatores econômicos, comprimento de percurso, geração de resíduos entre outros parâmetros. As rotas em destaque também foram abordadas em estudo desenvolvido em paralelo, apresentado no Anexo II, e que contém uma caracterização detalhada de R2, R8 e R12.

3.5.1 Eficiência mássica de coleta

Com os dados levantados e auxílio dos softwares Excel (2016) e Statistica (2021), foram realizadas algumas análises. Inicialmente, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk com nível de confiança de 95% para verificar se os dados se enquadram na distribuição normal. Como resultado, a maioria das séries de dados não apresentaram aderência à distribuição normal, logo, adotou-se para as análises a mediana como medida de tendência central, conforme Zaro *et al.* (2011).

O primeiro parâmetro analisado foi a quantidade de RSU coletada diariamente em cada rota, dada em toneladas, que possibilitou aferir os valores semanais para o mesmo parâmetro. Considerou-se, ainda, a quantidade de viagens realizadas diariamente em cada rota, adotando-se, também, a mediana das amostras. Com base nos parâmetros mencionados, obteve-se a carga mássica correspondente a cada viagem dada diariamente por caminhão.

Para a análise da eficiência de cada rota, precisou-se estabelecer a capacidade máxima de carga mássica dos caminhões compactadores. Nesse sentido, considerou-se dois métodos distintos, que foram avaliados comparativamente.

O primeiro método desenvolvido considerou a diferença entre o peso máximo permitido pelo CONTRAN e a média do peso dos caminhões vazios, de acordo com a equação 3.1:

$$Carga\ Max\ (C1) = Carga\ máxima\ CONTRAN\ (t) - Média\ caminhões\ vazios\ (t) \quad (3.1)$$

O segundo método, devido à variabilidade das medições, adotou o terceiro quartil (percentil 75%) de todas as pesagens para se determinar um valor de referência para caminhões carregados (CETESB, 2016), de acordo com equação 3.2.

$$Carga\ Max\ (C2) = percentil\ 75\% \text{ de todas as pesagens} \quad (3.2)$$

Conforme sugerido pela CETESB (2016), esse parâmetro é indicado e reconhecido para a definição de valores de referência. Verificou-se que os métodos convergiram para valores similares de cargas máximas por caminhão, corroborando o estabelecimento do limite mássico para o estabelecimento da eficiência de cada viagem, conforme a equação 3.3.

$$Eficiência\ (\%) = \frac{Carga\ da\ viagem\ (t) \cdot 100}{Carga\ máxima\ por\ caminhão\ (t)} \quad (3.3)$$

Concomitante, calculou-se o valor esperado de viagem por dia de cada rota com base na mediana da carga da viagem semanal dos RSD coletados, o número de dias de coleta da rota na semana e a capacidade máxima dos caminhões, segundo a equação 3.4.

$$N^{\circ}\ Viagens\ Esperado\ 1 = \frac{Mediana\ da\ carga\ semanal\ (t)}{n^{\circ}\ de\ dias\ da\ rota\ por\ semana \cdot Carga\ máxima\ por\ caminhão\ (t)} \quad (3.4)$$

Para análise conjunta das rotas com dias coincidentes de coleta, calculou-se o número de viagens diárias esperado para a coleta do volume gerado nesse período, segundo a equação 3.5.

$$N^{\circ}\ Viagens\ Esperado\ 2 = \frac{Soma\ das\ medianas\ da\ carga\ semanal\ das\ rotas\ (t)}{Soma\ do\ n^{\circ}\ de\ dias\ das\ rotas/semana \cdot Carga\ máxima\ caminhão\ (t)} \quad (3.5)$$

Em aspectos gerais, computou-se o somatório das medianas das cargas de coleta e o somatório das medianas do número de viagens por semana. Com esses

valores, calculou-se a média geral de carga por viagem (t), representado na equação 3.6.

$$\text{Média geral de carga das viagens (t)} = \frac{\text{Soma das medianas da carga semanal das rotas (t)}}{\text{Soma do nº de viagens do dias de coleta}} \quad (3.6)$$

Após a apuração da média geral, calculou-se a eficiência geral do sistema, relacionando a média geral de carga das viagens com a carga máxima de transporte, assim como representado pela equação 3.7.

$$\text{Eficiência Geral (\%)} = \frac{\text{Média geral de Carga das viagens (t)} \cdot 100}{\text{Carga máxima por caminhão (t)}} \quad (3.7)$$

Posteriormente, calculou-se o número de viagens esperado por dia geral do sistema relacionando a soma das medianas da carga semanal das rotas, com a quantidade de dias de coleta e a capacidade máxima de carga por caminhão, conforme a equação 3.8.

$$\text{Nº de Viagens Esperado/dia (geral)} = \frac{\text{Soma das medianas da carga semanal das rotas (t)}}{72 \cdot \text{Carga máxima por caminhão (t)}} \quad (3.8)$$

Para levantar um novo índice de comparação entre as cidades escolhidas para estudo no item 2.3, realizou-se o cálculo da quantidade de RSU por ano pela quantidade de caminhões disponíveis para coleta, com as informações fornecidas pelo SNIS (2022), conforme equação 3.9.

$$\text{Índice RSU por caminhões} = \frac{\text{Quantidade de RSU gerado por ano (t)}}{\text{Quantidade de caminhões}} \quad (3.9)$$

Por fim, calculou-se o índice *número de habitantes por caminhões*, conforme a equação 3.10. O valor encontrado foi comparado com o índice fornecido pelo estudo de *Benchmarking* entre Cidades Europeias do IBRAOP (2017).

$$\text{Índice nº habitantes por caminhões} = \frac{\text{Nº de habitantes}}{\text{Quantidade de caminhões}} \quad (3.10)$$

3.5.2 Dimensionamento da frota

Para análise comparativa e índices de suporte para desenvolvimento do dimensionamento de frota foi utilizado informações fornecidas pela FUNASA (Brasil, 2019), presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Índices FUNASA

| | | |
|----------|------------------------------|---|
| Coleta | Rendimento da coleta | 16 m ³ /3 garis.4horas (1,3 m ³ /gari.hora) |
| | Velocidade durante coleta | 6,5 km/h |
| Descarga | Caminhão basculante | 5 minutos |
| | Caminhão sem basculante | 15 a 20 minutos |
| Custo | Coleta e transporte a aterro | US\$21 a US\$65/ton. |

Fonte: Modificado Brasil (2019)

Considerou-se, ainda, dados do IBRAOP (2017), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices IBRAOP

| | | |
|--------|--------------------------------|---|
| Coleta | Velocidade durante coleta | 5 a 10 km/h |
| | Velocidade fora coleta | 25 km/h a máxima da via |
| | Turnos desejável | 2 ou mais |
| | Capacidade caminhão basculante | toco 15m ³ - até 16,8 ton. <i>Truck</i> 15 m ³ - até 23 ton. |

Fonte: Modificado IBRAOP (2017)

Estudos reportados na literatura, também serviram como suporte para análises comparativas e fornecimento de subsídios para as análises.

Para a estimativa do quantitativo da frota do município necessária para a coleta dos RSD, utilizou-se a metodologia proposta pela IBRAOP (2017) e fornecida pela FUNASA (2019), conforme a equação 3.11.

$$Ns = \frac{1}{J} * \left\{ \left(\frac{L}{Vc} \right) + 2 * \left(\frac{Dg}{Vt} \right) + 2 * \left[\left(\frac{Dd}{Vt} \right) * \left(\frac{Q}{C} \right) \right] \right\} \quad (3.11)$$

Onde:

Ns = número de caminhões necessários por setor de coleta;

J = Duração útil da jornada de trabalho da equipe (em número de horas, desde a saída da garagem até o seu retorno, excluindo intervalo para refeições e outros tempos improdutivos);

L = Extensão total das vias (ruas e avenidas) do setor de coleta, em km;

Vc = Velocidade média de coleta, em km/h;

Dg = Distância entre a garagem e o centro geométrico do setor de coleta, em km;

Vt = Velocidade média do veículo fora do percurso de coleta, em km/h;

Dd = Distância entre o centro geométrico do setor de coleta e o ponto de descarga, em km;

Q = Quantidade total de resíduos a ser coletada por dia no setor, em tonelada;

C = Capacidade efetiva do veículo de coleta, em tonelada.

Para o cálculo, considera-se 80% do valor da capacidade máxima efetiva do veículo de coleta, determinada no item 3.5.1, conforme sugerido por Brasil (2019).

Os resultados obtidos nessas análises foram comparados com dados reais de frota do município de estudo.

3.6 TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento de dados foi realizado, inicialmente, a partir de uma análise de consistência dos dados de monitoramento das coletas de RSD, obtidos na portaria do aterro sanitário.

Com apoio do *software* Statistica (2021) realizou-se o cálculo da estatística descritiva para os diferentes parâmetros, além de testes de hipóteses de comparações múltiplas, considerando:

- a) Eficiência de coleta entre as rotas (R1 a R23);
- b) Massa de RSD coletados diariamente entre as rotas (R2 vs R8 vs R12).
- c) Massa de RSD coletados pelas rotas (R2 + R8 + R12) entre os dias de coleta (COLETA_1 vs COLETA_2 vs COLETA_3).

Sendo evidenciada a não aderência dos dados à distribuição normal pelos testes de Shapiro-Wilk (Miot, 2017), adotou-se os testes não paramétricos para as análises mencionadas. Os testes não paramétricos calculam a estatística com base em postos atribuídos aos dados ordenados, independente da distribuição de probabilidades dos dados estudados, o que os torna mais flexíveis quanto às suposições de normalidade. Nas comparações múltiplas utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis (Reis *et al.*, 2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a investigação realizada no DEMSUR em 2024, constatou-se que a coleta de RSD é do tipo porta a porta e a metodologia consiste em recolher manualmente os resíduos sólidos que são dispostos pela população nas lixeiras, calçadas e/ou vias públicas. Os resíduos coletados são acomodados no caminhão da coleta e transportados ao aterro sanitário.

Para o acondicionamento dos resíduos domiciliares, antes da coleta, os municípios utilizam principalmente sacos plásticos, além de vasilhames de diversos tipos, como: baldes, latas, caixas de papelão, lixeiras metálicas e outros.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROTAS E VEÍCULOS

De acordo com o DEMSUR (2024), a cobertura de coleta compreende o distrito sede, sete outros distritos e quatro povoados, conforme a frequência e cronograma estipulado pela Autarquia e disposto para consulta pela população no site do DEMSUR. A coleta convencional também é realizada na rota dos distritos, sendo recolhido os resíduos dispostos ao longo das estradas rurais. Cabe ressaltar que a área de Muriaé é extensa e que os serviços de coleta não são realizados nas demais localidades rurais.

As coletas são divididas em 23 rotas, nas seguintes frequências estipuladas pela autarquia e com auxílio do *software* QGIS versão 3.36.3 foi possível obter os respectivos comprimentos das Rotas e comprimento de contribuição de RSU, representada pelas Tabela 3 e Figura 6. Na tabela as cores em amarelo representam coleta na terça-feira, quinta-feira e sábado, as verdes na segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira, a laranja na segunda-feira e quarta-feira e a azul na sexta-feira.

Tabela 3 – Informações das rotas de coleta de RSD

| ROTAS | LOCAIS | FREQUÊNCIA | KM COLETA | KM GERAÇÃO |
|-------|---|-------------------------|-----------|------------|
| 1 | São Cristovão, Leblon, Padre Tiago, BR 356. Padre Tiago ao Leblon, Santa Laura. | Terça, Quinta e Sábado. | 22,30 | 15,46 |
| 2 | Santa Terezinha, Inconfidencia, Edgar Miranda. | Terça, Quinta e Sábado. | 11,95 | 9,76 |
| 3 | Vila Conceição, Porto Belo, Chalé, Universitário, Sofoco. | Terça, Quinta e Sábado. | 5,68 | 4,11 |

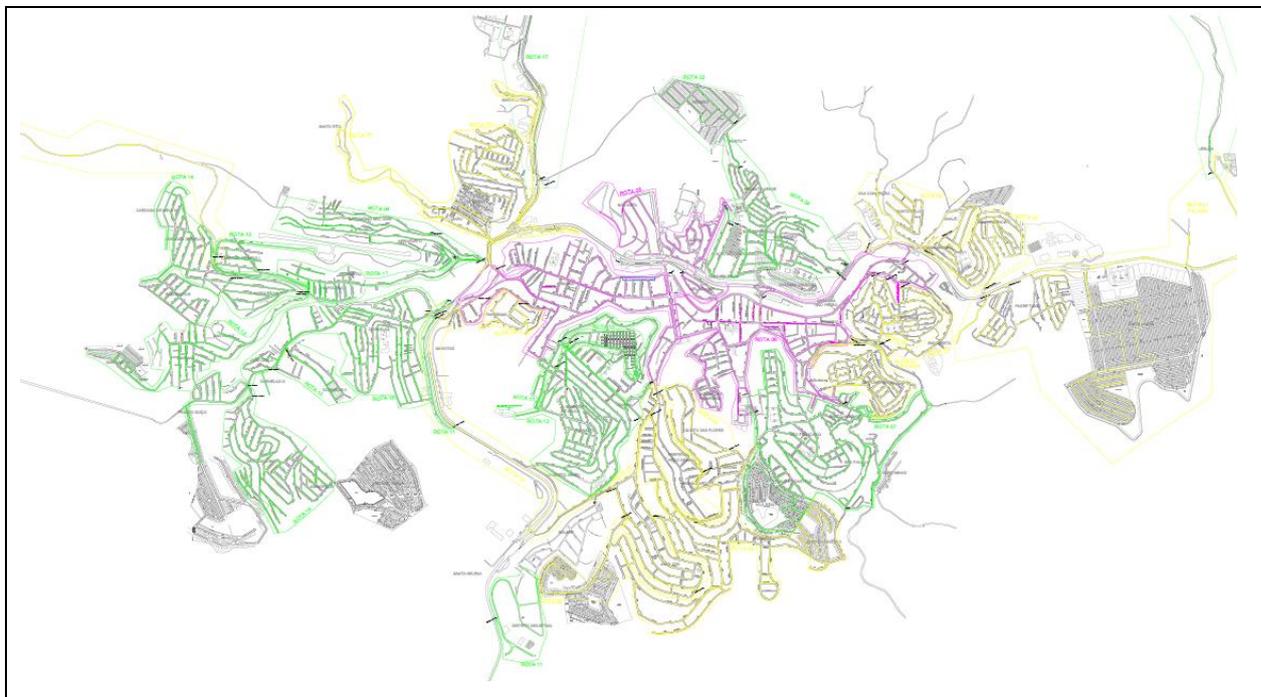
Fonte: Autor 2024

Tabela 3 - Informações das rotas de coleta de RSD (continuação)

| ROTAS | LOCAIS | FREQUÊNCIA | KM COLETA | KM GERAÇÃO |
|-------|---|---------------------------|-----------|------------|
| 4 | Aeroporto, Patrimônio São José, Chácara Brum, Chácara Lourdes, Boa Esperança, São Pedro, Recanto Verde, Horto, Recreio. | Segunda, Quarta e Sexta. | 18,27 | 14,38 |
| 5 | Coronel Izalino, Gavea, Boa Vista, Barra. | Segunda á Sábado (Noite). | 19,53 | 15,54 |
| 6 | Centro, Porto, parte Santo Antônio. | Segunda á Sábado (Noite). | 16,82 | 13,97 |
| 7 | Vila Real, Vale do Castelo, São Francisco, Santo Antônio, São Paulo. | Segunda, Quarta e Sexta. | 16,49 | 13,56 |
| 8 | Alto Castelo, Primavera, parte João XXIII e Alterosa. | Terça, Quinta e Sábado. | 14,46 | 11,73 |
| 9 | Quinta das Flores, parte São Gotardo, Polety, parte João XXIII, João VI. | Terça, Quinta e Sábado. | 10,31 | 8,04 |
| 10 | Parte Encoberta, partes São Gotardo, Prefeito Hélio Araujo, parte João XXIII. | Terça, Quinta e Sábado. | 7,35 | 6,83 |
| 11 | Parte Cerâmica, Napoleão, parte Aeroporto, Distrito Industrial, Bom Jesus, Florestal, Solare. | Segunda, Quarta e Sexta. | 43,49 | 11,44 |
| 12 | Safira, Augusto Abreu, Planalto, São Vicente. | Segunda, Quarta e Sexta. | 14,41 | 11,76 |
| 13 | Parte Cerâmica, parte Dornelas II, Dornelas III, Franco Suíço, Santana I, II, III, parte Bom Pastor, parte Cardoso de Melo. | Segunda, Quarta e Sexta. | 17,21 | 13,02 |
| 14 | São Joaquim, Joanópolis, parte Cardoso, parte Bom Pastor. | Segunda, Quarta e Sexta. | 17,98 | 15,35 |
| 15 | Dornelas, Dornelas II, José Cirilo. | Segunda, Quarta e Sexta. | 13,45 | 10,34 |
| 16 | Panorama, União, Santa Rita, Gaspar, Santa Luzia. | Terça, Quinta e Sábado. | 20,07 | 12,85 |
| 17 | Oficinas, São João do Glória, Patrimônio dos Carneiros, Capitinga, Itamuri, Boa Vista. | Segunda, Quarta e Sexta. | 18,19 | 17,43 |
| 18 | Hospitalar, Centro, Barra, Fundação, Faminas, Casa de apoio, Economart | Segunda, Quarta e Sexta. | 16,90 | 10,73 |
| 19 | Santa Helena, Nova Munique, Vermelho, Pirapanema. | Terça, Quinta e Sábado. | 17,50 | 10,10 |
| 20 | Mineirão, Safira/Rejeito. | Segunda, Quarta e Sexta. | 2,28 | 1,95 |
| 21 | Belisário | Segunda, Quarta. | 5,33 | 3,20 |
| 22 | Hospitalar, Centro, Barra, Fundação, Faminas, Casa de apoio, Economart, São Fernando e Divisório | Terça, Quinta e Sábado. | 20,30 | 14,45 |
| 23 | Belisário e São Domingo | Sexta. | 7,50 | 3,78 |

Fonte: Autor (2024)

Figura 6 – Rotas de coleta de RSD em Muriaé



Fonte: Autor (2024)

Observa-se que a maior parte das rotas estão dentro da cidade de Muriaé, e as rotas pertencentes aos distritos são realizadas separadamente. Sobre os comprimentos das rotas, a “km coleta” representa o tamanho da rota real, considerando o sentido do trânsito para cobrir toda a área planejada, isso contabiliza a passagem no mesmo lugar mais de uma vez pelos caminhões em alguns casos. O “km geração” é o comprimento real para realizar coleta planejada completa, desconsiderando o sentido do trânsito. Logo, a “km coleta” é maior ou igual ao “km geração”.

Para a realização das coletas, o DEMSUR conta com uma frota composta por 7 caminhões compactadores público (Quadro 1) e 5 caminhões compactadores terceirizados (Quadro 2). Os veículos de propriedade do DEMSUR foram adquiridos por meio de processos licitatórios, sendo que a autarquia é responsável tanto pela manutenção corretiva quanto pela manutenção preventiva dos mesmos. O Setor de Transportes é encarregado de monitorar a integridade desses veículos, agendando revisões com antecedência, a fim de evitar falhas operacionais que possam comprometer a coleta de RSD.

Os caminhões terceirizados são de responsabilidade da empresa prestadora de serviço, assumindo toda responsabilidade sobre a integridade dos veículos.

Quadro 1 – Caminhões do DEMSUR

| | | | | |
|--------------|--------------------------------|-----------------------|--|---|
| DEMSUR 01 | Placa | QOA-3054 |  |  |
| | Modelo | FORD/CARGO 1723B | | |
| | Ano de fabricação | 2017/2018 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 11660 | | |
| | Potência (cv) | 230 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 5140 | | |
| DEMSUR 02 | Placa | PVW-9485 |  |  |
| | Modelo | IVECO/TECTOR 1702E22 | | |
| | Ano de fabricação | 2015 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10350 | | |
| | Potência (cv) | 218 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6450 | | |
| DEMSUR 03 | Placa | PVW-9489 |  |  |
| | Modelo | IVECO/TECTOR 1702E22 | | |
| | Ano de fabricação | 2016 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10240 | | |
| | Potência (cv) | 218 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6560 | | |
| DEMSUR 04 | Placa | OXK-7181 |  |  |
| | Modelo | IVECO/TECTOR 1702E22 | | |
| | Ano de fabricação | 2013/2014 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10330 | | |
| | Potência (cv) | 218 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6470 | | |
| DEMSUR 05 | Placa | OXK-7185 |  |  |
| | Modelo | IVECO/TECTOR 1702E22 | | |
| | Ano de fabricação | 2013/2014 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10330 | | |
| | Potência (cv) | 218 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6470 | | |
| DEMSUR 06 | Placa | HLF-3914 |  |  |
| | Modelo | VW/17180 EURO3 WORKER | | |
| | Ano de fabricação | 2010 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10460 | | |
| | Potência (cv) | 173 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6340 | | |
| DEMSUR 07 | Placa | HLF-39120 |  |  |
| | Modelo | VW/17180 EURO3 WORKER | | |
| | Ano de fabricação | 2010 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10760 | | |
| | Potência (cv) | 173 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6040 | | |

Fonte: Autor (2024)

Da análise do Quadro 1, observa-se que os caminhões do DEMSUR apresentam ano de fabricação entre 2010 a 2017 (média de 2013,42), e potência em torno de 200cv. Todos os veículos são caracterizados com adesivos da autarquia, visando a caracterização da frota e visibilidade pelos habitantes que fazem uso do serviço de coleta de RSD.

Quadro 2 – Caminhões terceirizados

| | | | | |
|--------------------|--------------------------------|------------------------|--|---|
| TERCEIRIZADO 01 | Placa | PWR-3907 |  |  |
| | Modelo | IVECO/TECTOR 240E28 | | |
| | Ano de fabricação | 2014 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10670 | | |
| | Potência (cv) | 280 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6130 | | |
| TERCEIRIZADO 02 | Placa | PWA-8878 |  |  |
| | Modelo | VOLVO/VM 220 4X2R | | |
| | Ano de fabricação | 2015 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10700 | | |
| | Potência (cv) | 213 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 15 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6100 | | |
| TERCEIRIZADO 03 | Placa | PXC-2032 |  |  |
| | Modelo | VOLVO/VM 220 4X2R | | |
| | Ano de fabricação | 2018/2016 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10700 | | |
| | Potência (cv) | 213 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 15 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6100 | | |
| TERCEIRIZADO 04 | Placa | RBM5B21 |  |  |
| | Modelo | VOLKS 17260 CRM 4X2 4P | | |
| | Ano de fabricação | 2020/2021 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 11100 | | |
| | Potência (cv) | 256 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 13 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 5700 | | |
| TERCEIRIZADO 05 | Placa | RNY6F00 |  |  |
| | Modelo | VOLVO/VM 220 4X2R | | |
| | Ano de fabricação | 2020/2021 | | |
| | Peso do caminhão + Prensa (kg) | 10700 | | |
| | Potência (cv) | 213 | | |
| | Capacidade Prensa (m³) | 15 | | |
| | Capacidade de RSU (kg) | 6100 | | |

Fonte: Autor (2024)

Pelo Quadro 2, os caminhões fornecidos pelas empresas terceirizadas apresentam ano de fabricação entre 2014 e 2020 (média de 2017) e potência em torno de 230cv. Eles não apresentam adesivos da autarquia, mas quando estão em operação utilizam placa no painel escrita “A serviço do DEMSUR” para identificação dos habitantes e autoridades.

Os caminhões terceirizados são mais novos que os do DEMSUR e mais potentes. Para as empresas que realizam essa prestação de serviço, ter uma frota mais nova é visto como vantagem, pois os veículos empregados no transporte de carga sofrem, ao longo do tempo, com o desgaste natural e a evolução tecnológica, o que os torna progressivamente obsoletos e resulta em um aumento significativo dos custos operacionais para a empresa (Radel *et al.*, 2012).

O uso dos caminhões do tipo compactador demonstra maior eficiência em termos de cobertura da coleta, sendo significativamente superior aos outros métodos e tipos de veículos. No entanto, sua utilização exige altos investimentos iniciais e envolve um custo operacional elevado, tanto em relação ao consumo de combustível quanto à manutenção. O uso desse tipo de veículo se apresenta como uma solução viável para áreas com alta densidade populacional, onde há uma elevada geração de resíduos por unidade de área (Ávila; Gil, 2019).

No processo de coleta de RSD, uma equipe composta por cinco integrantes desempenha funções distintas e complementares: 1 motorista, responsável pela condução do caminhão compactador; 2 ajudantes que avançam à frente do veículo, reunindo os resíduos em pontos estratégicos ao longo da via; e 2 ajudantes que acompanham o caminhão, recolhendo os resíduos previamente aglomerados e depositando-os no compactador, realizando a compactação conforme necessário.

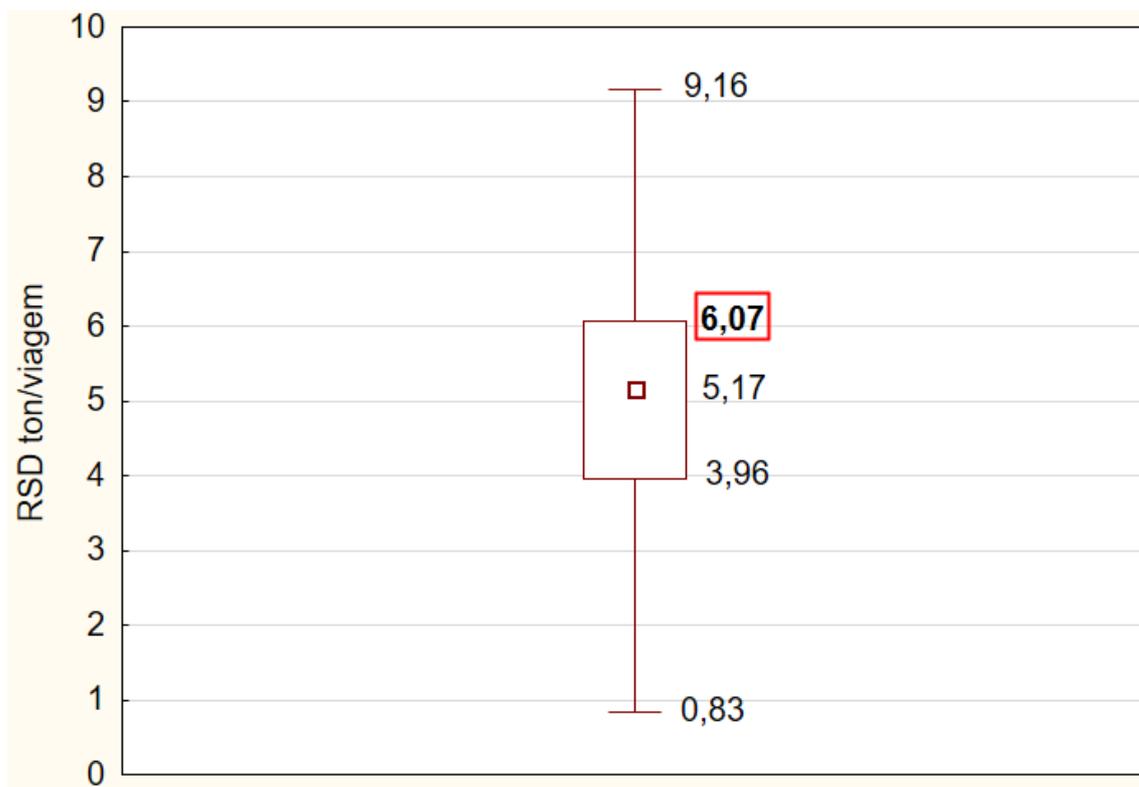
Após os caminhões atingirem sua capacidade máxima ou finalizarem a rota, os mesmos são direcionados ao aterro sanitário, onde é feita a disposição dos RSU. Existem rotas, como a rota 7, que necessitam de mais de uma viagem para que sejam concluídas.

4.2 EFICIÊNCIA MÁSSICA DE COLETA

Com o levantamento de dados, foi possível realizar a compilação e obter algumas informações relevante para caracterização da coleta de RSD de Muriaé. A Tabela 4 contém valores de tendência central para os quantitativos de RSD coletados para cada rota (mediana do dia e somatório da semana), o número de viagens diárias por rota em cada dia, além do rendimento do transporte em relação a capacidade máxima dos veículos e o número de viagens esperado, calculados conforme equações 3.3 e 3.4.

A capacidade máxima, necessária para a estimativa da eficiência das viagens, foi determinada pelo segundo método (equação 3.2), onde calculou-se o 3º quartil das pesagens realizadas no período de estudo (08/08/2023 ao dia 17/10/2023), encontrando o valor de 6,07 toneladas, adotado como valor de referência, conforme metodologia indicada pela CETESB (2016) e apresentado no *box plot*, auxílio do *software* Statistica, da Figura 7.

Figura 7 – Determinação do 3º quartil das coletas



Fonte: Autor (2024)

Em relação ao primeiro método, o valor médio reportado para o peso dos caminhões compactadores vazios foi 10,5 toneladas. Considerando-se o valor máximo indicado pelo CONTRAN de 16,8 toneladas para veículos carregados, tem-se, pela equação 3.1, o valor de 6,3 toneladas como carga máxima admissível. Tal valor converge com o resultado de referência estabelecido via metodologia da CETESB (2016), porém será utilizado para cálculo de eficiência a carga máxima de 6,07 toneladas, indo a favor da segurança.

Na Tabela 4, os resultados foram representados e discriminados por cores em relação a frequências das rotas, sendo: as cores amarelas representam rotas com coleta terça-feira, quinta-feira e sábado, durante o dia; as verdes são coletas realizadas na segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira, durante o dia, as rosas são coletas de segunda-feira a sábado, durante a noite; a laranja são coletas de segunda-feira e quarta-feira, durante o dia; e, a roxo é a coleta realizada, apenas, na sexta-feira.

Tabela 4 - Dados da coleta de RSD e indicadores de Muriaé - MG

| ROTA | DIA DA SEMANA | RSU (TON) | | Nº VIAGENS | CARGA DIA MEDIANA/ Nº VIAGENS (t) | EFICIÊNCIA E(%) | Nº VIAGENS ESPERADO/ DIA.ROTA |
|---------|---------------|-----------------|----------------------|------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| | | DIA MEDIANA (t) | SOMA DIA MEDIANA (t) | | | | |
| ROTA 1 | TERÇA | 8,90 | 20,91 | 2,00 | 4,45 | 73,31% | 1,15 |
| | QUINTA | 5,77 | | 1,00 | 5,77 | 95,06% | |
| | SÁBADO | 6,24 | | 1,00 | 6,24 | 102,80% | |
| ROTA 2 | TERÇA | 9,17 | 21,14 | 2,00 | 4,59 | 75,54% | 1,16 |
| | QUINTA | 5,73 | | 1,00 | 5,73 | 94,40% | |
| | SÁBADO | 6,24 | | 1,00 | 6,24 | 102,72% | |
| ROTA 3 | TERÇA | 2,69 | 5,95 | 1,00 | 2,69 | 44,32% | 0,33 |
| | QUINTA | 1,83 | | 1,00 | 1,83 | 30,07% | |
| | SÁBADO | 1,43 | | 1,00 | 1,43 | 23,56% | |
| ROTA 4 | SEGUNDA | 10,38 | 22,80 | 2,00 | 5,19 | 85,47% | 1,25 |
| | QUARTA | 5,95 | | 1,00 | 5,95 | 98,02% | |
| | SEXTA | 6,47 | | 2,00 | 3,24 | 53,29% | |
| ROTA 5 | SEGUNDA | 11,60 | 48,81 | 2,00 | 5,80 | 95,51% | 1,34 |
| | TERÇA | 8,12 | | 1,00 | 8,12 | 133,77% | |
| | QUARTA | 7,79 | | 1,00 | 7,79 | 128,34% | |
| | QUINTA | 6,89 | | 1,00 | 6,89 | 113,51% | |
| | SEXTA | 8,80 | | 2,00 | 4,40 | 72,49% | |
| | SABADO | 5,62 | | 1,00 | 5,62 | 92,50% | |
| | SEGUNDA | 12,82 | | 2,00 | 6,41 | 105,56% | |
| ROTA 6 | TERÇA | 7,97 | 52,03 | 1,00 | 7,97 | 131,30% | 1,43 |
| | QUARTA | 8,37 | | 2,00 | 4,19 | 68,95% | |
| | QUINTA | 8,08 | | 1,00 | 8,08 | 133,03% | |
| | SEXTA | 8,80 | | 2,00 | 4,40 | 72,49% | |
| | SABADO | 6,00 | | 1,00 | 6,00 | 98,76% | |
| ROTA 7 | SEGUNDA | 9,69 | 23,74 | 2,00 | 4,84 | 79,78% | 1,30 |
| | QUARTA | 6,78 | | 1,00 | 6,78 | 111,70% | |
| | SEXTA | 7,27 | | 2,00 | 3,64 | 59,88% | |
| ROTA 8 | TERÇA | 7,33 | 18,93 | 2,00 | 3,66 | 60,34% | 1,04 |
| | QUINTA | 6,78 | | 1,00 | 6,78 | 111,70% | |
| | SÁBADO | 4,82 | | 1,00 | 4,82 | 79,41% | |
| ROTA 9 | TERÇA | 5,07 | 12,17 | 1,00 | 5,07 | 83,53% | 0,67 |
| | QUINTA | 3,72 | | 1,00 | 3,72 | 61,20% | |
| | SÁBADO | 3,38 | | 1,00 | 3,38 | 55,68% | |
| ROTA 10 | TERÇA | 7,83 | 18,48 | 2,00 | 3,92 | 64,50% | 1,01 |
| | QUINTA | 5,05 | | 1,00 | 5,05 | 83,20% | |
| | SÁBADO | 5,60 | | 1,00 | 5,60 | 92,17% | |
| ROTA 11 | SEGUNDA | 8,60 | 19,35 | 2,00 | 4,30 | 70,84% | 1,06 |
| | QUARTA | 5,26 | | 1,00 | 5,26 | 86,66% | |
| | SEXTA | 5,49 | | 1,00 | 5,49 | 90,44% | |

Fonte: Autor (2024)

Tabela 4 - Dados da coleta de RSD e indicadores de Muriaé – MG (continuação)

| ROTA | DIA DA SEMANA | RSU (TON) | | Nº VIAGENS | CARGA DIA MEDIANA/ Nº VIAGENS (t) | EFICIÊNCIA E(%) | Nº VIAGENS ESPERADO/ DIA.ROTA |
|---------|---------------|-----------------|----------------------|------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| | | DIA MEDIANA (t) | SOMA DIA MEDIANA (t) | | | | |
| ROTA 12 | SEGUNDA | 10,10 | 24,73 | 2,00 | 5,05 | 83,20% | 1,36 |
| | QUARTA | 6,87 | | 1,00 | 6,87 | 113,18% | |
| | SEXTA | 7,76 | | 2,00 | 3,88 | 63,92% | |
| ROTA 13 | SEGUNDA | 7,85 | 19,16 | 2,00 | 3,93 | 64,66% | 1,05 |
| | QUARTA | 5,46 | | 1,00 | 5,46 | 89,95% | |
| | SEXTA | 5,85 | | 1,00 | 5,85 | 96,38% | |
| ROTA 14 | SEGUNDA | 9,79 | 22,54 | 2,00 | 4,90 | 80,64% | 1,24 |
| | QUARTA | 5,99 | | 1,00 | 5,99 | 98,68% | |
| | SEXTA | 6,76 | | 1,00 | 6,76 | 111,37% | |
| ROTA 15 | SEGUNDA | 8,80 | 20,87 | 2,00 | 4,40 | 72,49% | 1,15 |
| | QUARTA | 5,71 | | 1,00 | 5,71 | 94,07% | |
| | SEXTA | 6,36 | | 2,00 | 3,18 | 52,39% | |
| ROTA 16 | TERÇA | 7,96 | 17,76 | 2,00 | 3,98 | 65,57% | 0,98 |
| | QUINTA | 4,90 | | 1,00 | 4,90 | 80,72% | |
| | SÁBADO | 4,90 | | 1,00 | 4,90 | 80,64% | |
| ROTA 17 | SEGUNDA | 2,86 | 7,14 | 1,00 | 2,86 | 47,03% | 0,39 |
| | QUARTA | 2,17 | | 1,00 | 2,17 | 35,75% | |
| | SEXTA | 2,12 | | 1,00 | 2,12 | 34,84% | |
| ROTA 18 | SEGUNDA | 5,51 | 15,00 | 1,00 | 5,51 | 90,69% | 0,82 |
| | QUARTA | 4,73 | | 1,00 | 4,73 | 77,84% | |
| | SEXTA | 4,77 | | 1,00 | 4,77 | 78,58% | |
| ROTA 19 | TERÇA | 6,52 | 16,25 | 2,00 | 3,26 | 53,71% | 0,89 |
| | QUINTA | 4,69 | | 1,00 | 4,69 | 77,27% | |
| | SÁBADO | 5,04 | | 1,00 | 5,04 | 83,03% | |
| ROTA 20 | SEGUNDA | 1,52 | 5,66 | 1,00 | 1,52 | 24,96% | 0,31 |
| | QUARTA | 2,03 | | 1,00 | 2,03 | 33,44% | |
| | SEXTA | 2,12 | | 1,00 | 2,12 | 34,84% | |
| ROTA 21 | SEGUNDA | 1,36 | 2,35 | 1,00 | 1,36 | 22,41% | 0,19 |
| | QUARTA | 0,99 | | 1,00 | 0,99 | 16,31% | |
| ROTA 22 | TERÇA | 5,54 | 14,49 | 1,00 | 5,54 | 91,27% | 0,80 |
| | QUINTA | 4,73 | | 1,00 | 4,73 | 77,84% | |
| | SÁBADO | 4,23 | | 1,00 | 4,23 | 69,60% | |
| ROTA 23 | SEXTA | 1,54 | 1,54 | 1,00 | 1,54 | 25,37% | 0,25 |

Fonte: Autor (2024)

Os dados coletados mostram que durante uma semana são geradas 431,76 toneladas de RSD, apresentando um somatório de 94 viagens realizadas para coletar esses resíduos, gerando uma média de 4,59 toneladas por viagem (equação 3.6), que representa uma eficiência de 75% em relação a capacidade máxima de RSD que

poderiam ser carregados pelos caminhões compactadores (3.7) e número de viagens esperado em relação aos dias de coleta de forma geral calculado foi de 0,99 (equação 3.8), mostrando possibilidade de otimização no serviço (Tabela 5).

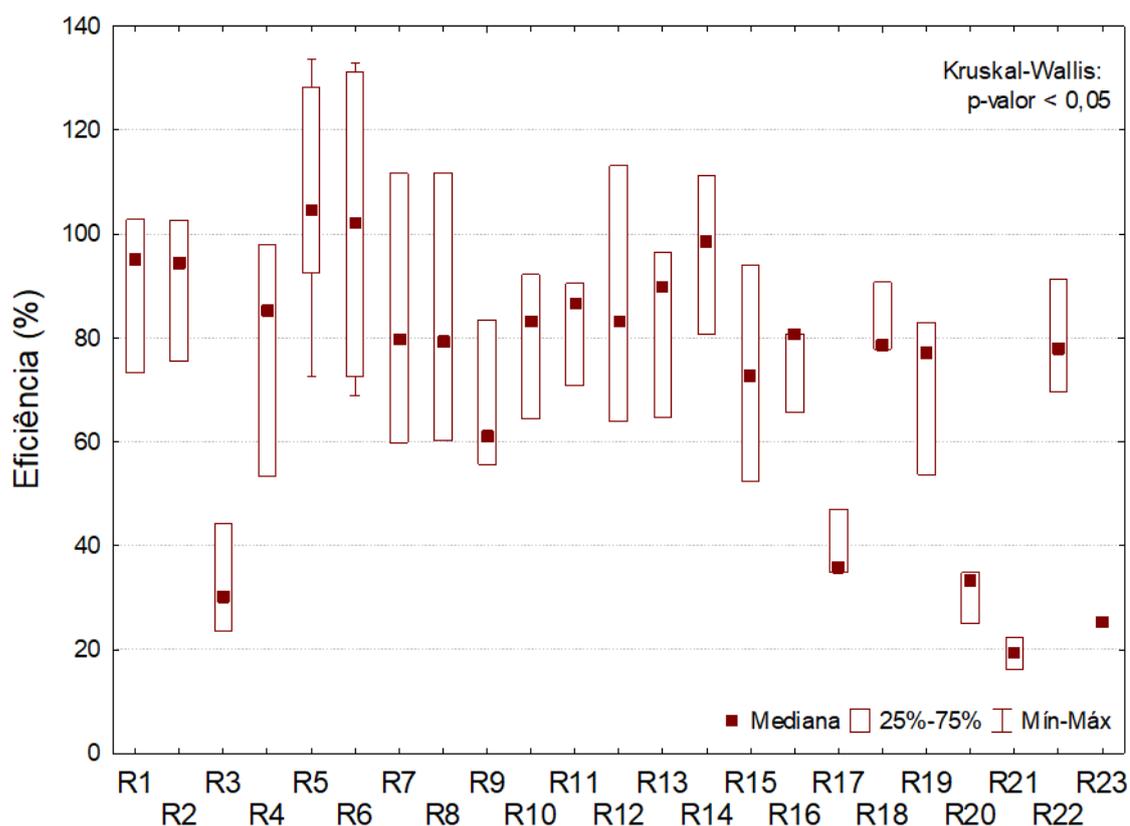
Tabela 5 – Indicadores geral da coleta de RSD de Muriaé-MG

| Somatório Dia Mediana Geral | Somatório Nº de Viagens | Média geral carga por viagem (t) | Eficiência geral (%) | Nº de viagens esperado por dia (geral) |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------|--|
| 431,76 | 94,00 | 4,59 | 75,67% | 0,99 |

Fonte: Autor (2024)

Para uma análise estatística das eficiências aferidas por cada rota, testes de hipóteses foram realizados e os resultados reportados na Figura 8.

Figura 8 – Teste estatístico de comparações múltiplas das eficiências das coletas



Fonte: Autor (2024)

O teste de Kruskal Wallis indicou diferenças significativas a 95% de confiança entre as rotas do município (p -valor < 0,05), mais evidentes a partir de R3, R17, R20, R21 e R23. Tais rotas, em seu dia mais representativo (maior quantidade de resíduos coletados) realizam apenas uma viagem para cumprimento do serviço de coleta dos RSD, como acontece em outras rotas. Porém, para o dia com

o maior quantitativo coletado, a maior eficiência entre elas foi a Rota 17 com 47%. Em dias com menor quantidade de resíduos chegaram a realizar viagens com eficiência de 16%, um indicativo de ineficiência ou de baixa em eficiência. Por outro lado, R5 e R6 reportaram eficiência de coleta superior a 100%, o que em termos quantitativos da etapa de coleta são dados interessantes, porém, podem determinar maior desgaste dos veículos, das vias e logradouros; e, conseqüentemente, incremento dos custos relacionados ao serviço (Souto, 2024).

Outro aspecto analisado foi o valor encontrado no número de viagens esperados por dia. rota em relação a capacidade máxima de carregamento, geral, foi de 0,99; o que representa a possibilidade da realização de 72 viagens, de acordo com a equação 3.3, para coleta total dos resíduos, em vez das 94 viagens que vem sendo realizadas. Logo, sendo mais um indicativo de potencial ganho de eficiência no sistema de coleta.

Em relação ao número de viagens realizadas, é notório que quando se analisa, globalmente, o dia da semana com maior número de viagens é na segunda-feira, por contemplar a geração de RSD também dos finais de semana. Mas quando se analisa as rotas, de modo independente, conclui-se que existem algumas com um quantitativo maior de viagens comparadas a outras, o que indica uma possível sobrecarga em tais rotas e uma possibilidade de reorganização e otimização, assim como foi realizado no estudo de Jacubiak (2016) na Polônia e Malakahmad *et al.* (2014).

Concomitante, realizou-se a análise das rotas separadas pela frequência de coleta (equação 3.5) em relação ao somatório das medianas de resíduos dos respectivos dias, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidade de RSD e eficiência por frequência de coleta

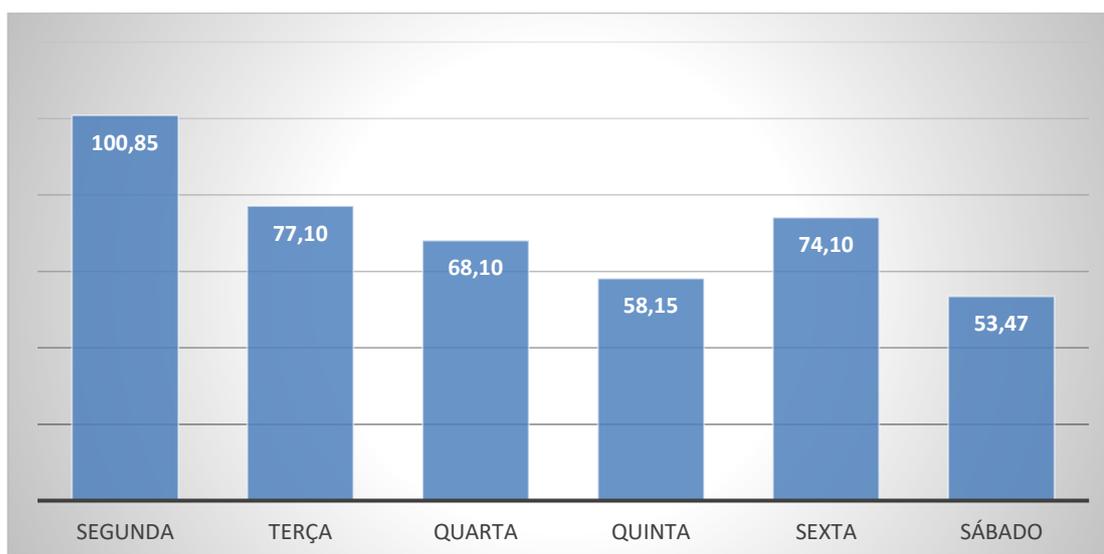
| FREQUÊNCIA DA ROTA | terça quinta sábado | segunda quarta sexta | segunda a sábado | segunda quarta | sexta |
|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|-------|
| RSD (t) | 146,05 | 180,98 | 100,84 | 2,35 | 1,54 |
| Nº ESPERADO VIAGEM/DIA | 0,89 | 0,99 | 1,38 | 0,19 | 0,25 |

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que quatro das cinco frequências, de coleta, realizadas apresentam valores esperados menores que uma viagem por dia, ou seja, a coleta está sendo realizada com os caminhões, parcialmente. “vazios”, sem atingir sua capacidade máxima de trabalho. Em contrapartida, as coletas realizadas pela frequência de segunda a sábado, que corresponde as rotas 5 e 6 precisam, em algum dos dias de coleta, realizar mais de uma viagem para suprir a demanda de resíduos evitando sobrecarga.

Outra análise realizada foi o estudo da quantidade de resíduos (mediana) gerados em cada dia da semana. Com esses parâmetros gerou-se o gráfico de distribuição desses resíduos, presente na Figura 9.

Figura 9 – Coleta de RSD por dia da semana (tonelada)



Fonte: Autor (2024)

Os dados revelam que as primeiras coletas da semana, em todas as rotas, apresentam a maior quantidade de RSD, com a soma das medianas totalizando 100,85 toneladas. Isso ocorre porque na segunda-feira, em que se iniciam mais rotas, também se acumulam os resíduos de sábado, mesmo que parcialmente, e domingo, dia em que não há coleta. O aumento quantitativo dos resíduos coletados na segunda foi observado, também, em estudos reportados por Gazolla; Silva (2001) e Oliveira (2007). Em contrapartida, o sábado foi o dia com a menor quantidade de RSD coletados, totalizando 53,47 toneladas.

Essas informações são relevantes na caracterização e elaboração de um processo de otimização, pois quando se obtém a quantidade de RSD gerada

diariamente para o dimensionamento das viagens de uma determinada rota, faz-se necessário levar em consideração o valor diário de RSD acumulado, não recolhido, para se evitar ineficiência de transporte na primeira coleta. Essa análise evidencia a possibilidade de uma rota demandar mais de uma viagem na primeira coleta da semana e, nas demais, apenas uma ser o suficiente.

Outro fator observado foi que a mesma rota pode apresentar variações em dias diferentes da semana, mesmo quando não se tem o valor acumulado de domingo (Tabela 4), mostrando que a geração de RSD não é constante ao longo dos dias da semana (Oliveira, 2007).

Por fim, comparando com índices encontrados em cidades europeias, citados no trabalho, Muriaé apresenta 8.675 habitantes/caminhão (equação 3.10), valor que se enquadra dentro da margem citada de 4.700 a 15.000 habitantes/caminhão. Porém, mesmo enquadrando-se com essas referências, pela a variação presente, não são informações sólidas suficiente para determinar um nível de eficiência, e sim de caracterização.

4.3 DIMENSIONAMENTO DA FROTA

Com auxílio da equação 3.11, de dimensionamento de frota para coleta de RSU fornecida pelo IBRAOP (2017), realizou-se o levantamento do quantitativo de caminhões esperados para a realização do serviço de coleta de RSD de Muriaé-MG. As rotas foram divididas em 3 grupos: coletas diurnas; coletas noturnas; e coletas nos distritos de Muriaé (Tabela 7).

A lógica utilizada foi separar os caminhões que realizam coleta na cidade e dos distritos, pois as coletas realizadas nos distritos estão mais suscetíveis a intercorrências, como problemas de tráfegos nas estradas rurais em período chuvosos, necessidade de desvio por interrupção ou acidentes nas estradas entre outros fatores que podem atrasar e atrapalhar a logística da coleta subsequente (Demsur, 2024).

Para as coletas realizadas na cidade, considerou-se uma análise distinta para aquelas realizadas durante o dia e as realizadas durante a noite, pois, com fins de otimização, utiliza-se os mesmos caminhões para as coletas de RSD nos dois turnos.

Portanto, a frota total será considerada para o maior valor reportado para os turnos somado ao valor encontrado para a coleta nos distritos.

Tabela 7 – Dimensionamento de frota para coleta de RSD

| Parâmetros | Cidade - dia | Cidade - noite | Distritos |
|---|---------------------|-----------------------|------------------|
| <i>J</i> = Duração útil da jornada de trabalho da equipe | 8,00 | 4,00 | 8,00 |
| <i>L</i> = Extensão total das vias (ruas e avenidas) do setor de coleta, em km; | 252,60 | 36,35 | 68,82 |
| <i>V_c</i> = Velocidade média de coleta, em km/h; | 7,00 | 7,00 | 7,50 |
| <i>D_g</i> = Distância entre a garagem e o centro geométrico do setor de coleta, em km; | 2,00 | 2,00 | 35,00 |
| <i>V_t</i> = Velocidade média do veículo fora do percurso de coleta, em km/h; | 30,00 | 30,00 | 55,00 |
| <i>D_d</i> = Distância entre o centro geométrico do setor de coleta e o ponto de descarga, em km; | 8,50 | 8,50 | 60,00 |
| <i>Q</i> = Quantidade total de resíduos a ser coletada por dia no setor, em tonelada; | 41,31 | 14,41 | 5,97 |
| <i>C</i> = Capacidade efetiva do veículo de coleta (ton). | 4,85 | 4,85 | 4,85 |

Fonte: Autor (2024)

Os resultados gerados com esses parâmetros, pela equação 3.11, do número necessário de caminhões compactadores, foram:

- Coleta na cidade de Muriaé durante o dia (*N_s*): 5,13.
- Coleta na cidade de Muriaé durante a noite (*N_s*): 1,75.
- Coleta nos distritos de Muriaé (*N_s*): 1,64.

Logo, somando o levantamento da frota necessária para a coleta, de forma direta, para o turno diurno (maior valor em relação a noturna) com o valor reportado para a frota calculada dos distritos, tem-se 6,77 caminhões, arredondando para o número inteiro superior 7 caminhões, como a quantidade necessária para realizar o serviço.

Aumentando 10% no levantamento, como sugerido por alguns autores, como margem de segurança, tem-se 7,44 caminhões, arredondando para o número inteiro superior tem-se 8 caminhões, como a quantidade necessária para realizar o serviço.

Em última análise, relacionando de forma independentes as coletas da cidade com a dos distritos, tem-se 5,13 (5,64 com os 10%) caminhões, que arredondam para 6 caminhões nas coletas da cidade, e 1,64 (1,80 com os 10%) caminhões, que arredondam para 2 caminhões. Somando as duas demandas, encontra-se a demanda

de 8 caminhões para a realização do serviço de coleta de RSD no município de Muriaé.

A atual gestão atua com 7 caminhões próprios e 5 terceirizados, isso é, um quantitativo de 12 caminhões para o serviço de coleta, conforme apresentado no capítulo 4.1. Comparando com o valor calculado de 8 caminhões, evidencia-se um indicativo adicional de que o processo possa ser otimizado.

Outra análise realizada, de modo geral, foi comparar o número de habitantes, com quantidade de resíduos RSU gerados por ano e quantidade de caminhões para realizarem o serviço, com dados do SNIS (2022), entre três cidades citadas no item 2.3 com o município de Muriaé, utilizando a equação 3.9.

A primeira cidade citada no estudo foi Belo Horizonte, com 2.315.560 habitantes, produzindo 730 mil toneladas de RSU por ano e realizando a coleta com 287 caminhões (compactador + basculante). Isso gera um índice de 2.377 toneladas/caminhão. A segunda cidade citada no estudo foi Porto Alegre, com 1.332.845 habitantes, produzindo 500 mil toneladas de RSU por ano e realizando a coleta com 194 caminhões (compactador + basculante). Isso gera um índice de 2.577 toneladas/caminhão. A terceira cidade citada no estudo foi Ipatinga, com 227.731 habitantes, produzindo 160 mil toneladas de RSU por ano e realizando a coleta com 17 caminhões (compactador + basculante). Isso gera um índice de 9.411 toneladas/caminhão.

Muriaé, com 95.893 habitantes, produzindo 24 mil toneladas de RSU por ano e 13 caminhões (compactador + basculante), gerou um índice de 1.846 toneladas/caminhão.

Observa-se que os índices aumentaram, na medida em que houve uma redução da população da cidade, nesse espaço amostral. Porém, Muriaé, com a menor população apresentou um índice inferior ao calculado para o município de Belo Horizonte, menos 531 toneladas/caminhão, indo contra o esperado e fomentando a hipótese de que o sistema de coleta de RSU na cidade apresenta-se de forma ineficiente.

4.4 DETALHAMENTO DE R2, R8 E R12

A fim de aprofundar a discussão, foram selecionadas 3 rotas para uma caracterização mais aprofundada. As rotas escolhidas foram as denominadas de 2, 8 e 12, por serem mais isoladas, mesmo dentro da cidade, e sofrerem menos interferências com outras rotas.

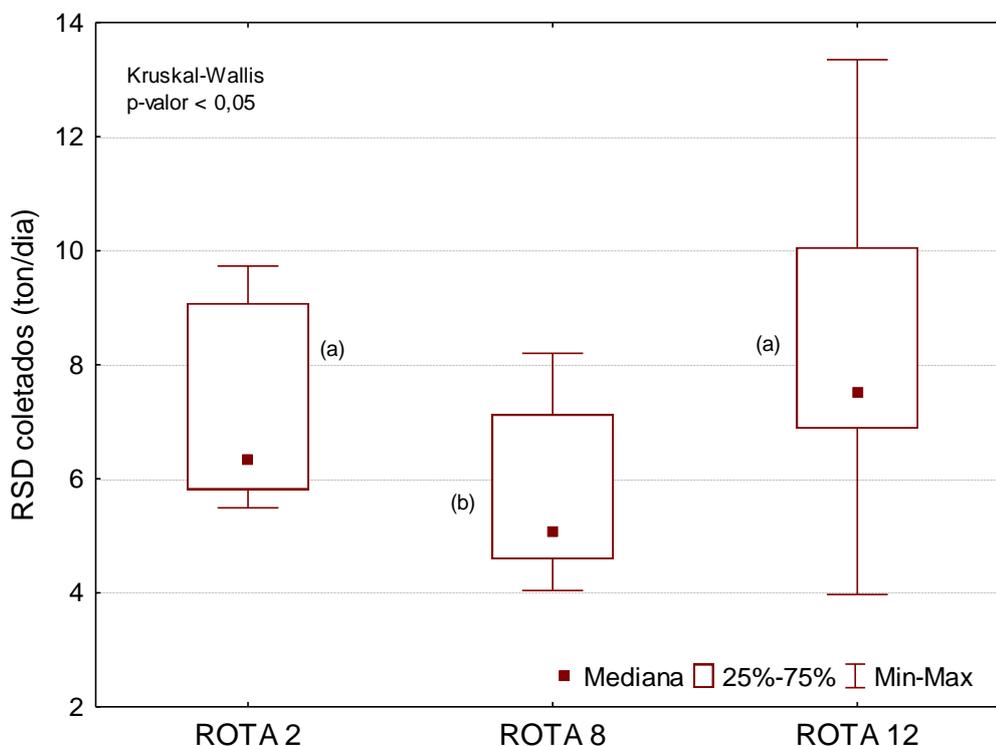
R2 é realizada nas terças-feiras, quintas-feiras e nos sábados. Possui 11,95 km de comprimento de rota e 9,76 km linear (desconsiderando mais de uma passagem na mesma rua pelo sentido do trânsito). Como a produção da semana é de 21,13 toneladas de RSD, a mesma apresenta uma geração de 1,77 ton/km na rota total e 2,17 ton/km no comprimento linear.

R8 é realizada nas terças-feiras, quintas-feiras e nos sábados. Possui 14,46 km de comprimento de rota e 11,73 km linear (desconsiderando mais de uma passagem na mesma rua pelo sentido do trânsito). Como a produção da semana é de 18,92 toneladas de RSD, a mesma apresenta uma geração de 1,31 ton/km na rota total e 1,61 ton/km no comprimento linear.

R12 é realizada nas segundas-feiras, quartas-feiras e nas sextas-feiras. Possui 14,41 km de comprimento de rota e 11,76 km linear (desconsiderando mais de uma passagem na mesma rua pelo sentido do trânsito). Como a produção da semana é de 24,73 toneladas de RSD, a mesma apresenta uma geração de 1,72 ton/km na rota total e 2,10 ton/km no comprimento linear.

Para uma análise estatística comparativa, os resultados da coleta de RSD, de cada rota, foram avaliados por meio de testes de hipóteses. O teste de Kruskal Wallis evidenciou diferenças significativas entre o quantitativo diário de resíduos coletados nas diferentes rotas, com as diferenças significativas também reportadas na Figura 10. R8 apresentou uma quantidade significativamente inferior de RSD coletados diariamente, em relação à R2 e R12, com mediana em torno de 5 toneladas (Fonseca; Miranda; Castro, 2024, submetido à publicação).

Figura 10 - Teste estatístico de comparações múltiplas para resíduos coletados por rotas

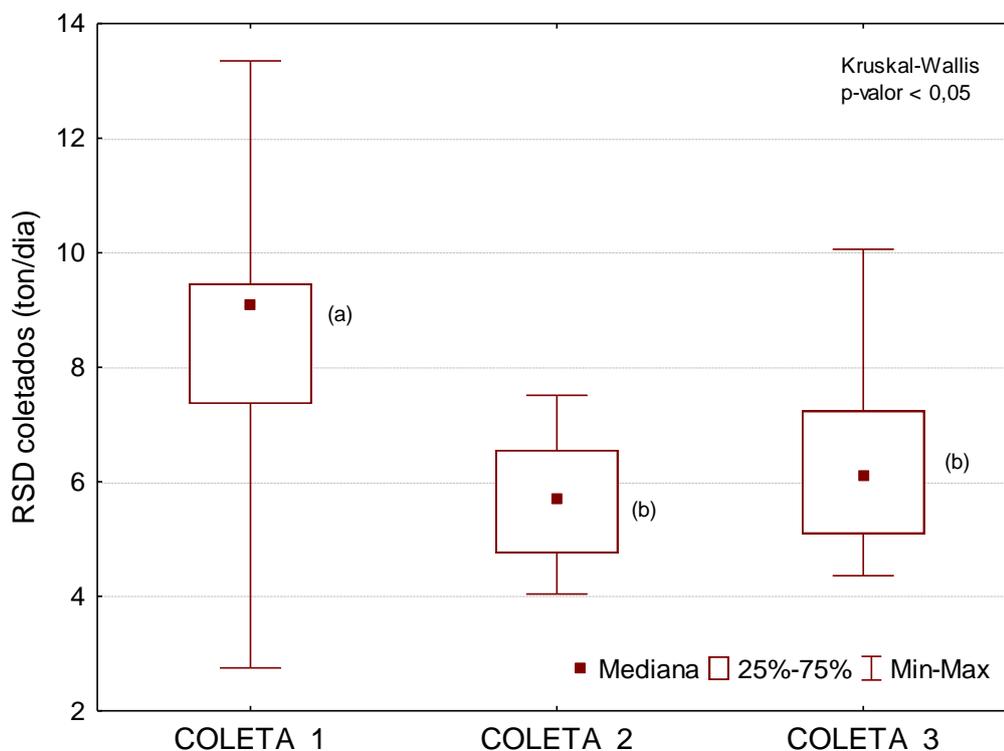


Fonte: Fonseca, Miranda e Castro (2024, submetido à publicação)

Percebe-se que esse resultado pode estar associado ao fato de as rotas selecionadas abrangerem áreas predominantemente residenciais, porém nessas áreas, o município inclui empreendimento como comércio e serviços, que tendem a gerar mais, ou ainda ser uma região de expansão onde os lotes ainda não foram todos ocupados, como o da rota 8. Esses fatores podem ter influenciado o aumento dos valores calculados para a medida de tendência central de R2 e R12, que superaram as 6 toneladas coletadas diariamente (Demsur, 2024).

Outra análise estatística, realizada foi a comparação do primeiro, segundo e terceiro dia de coleta das rotas, presente na Figura 11. O teste estatístico de comparações múltiplas evidenciou diferenças significativas entre os valores obtidos nas pesagens, evidenciando diferenças significativas entre a primeira coleta da semana e as outras duas (*Kruskal-Wallis*; p-valor < 0,05) (Fonseca; Miranda; Castro, 2024, submetido à publicação). Esses resultados corroboram o reportado por diferentes autores sobre a maior demanda na primeira coleta, principalmente, pelo acúmulo do domingo (Oliveira, 2007).

Figura 11 - Teste estatístico de comparações múltiplas para resíduos coletados por rotas.



Fonte: Fonseca, Miranda e Castro (2024, submetido à publicação)

A implementação de sistemas de roteirização surge como uma solução eficiente para otimizar as rotas de coleta, reduzindo custos operacionais, consumo de combustível e desgaste dos veículos, além de minimizar impactos ambientais e aumentar a eficiência em regiões de alta densidade populacional (Dos Santos; Ometto; Nascimento, 2017)

Aprofundando a caracterização dessas regiões e sua relação com a geração de RSD foi realizado, em paralelo, um trabalho científico (ANEXO II), que encontra-se submetido para publicação em revista Qualis A1, intitulado “Análise quantitativa da cobrança pela prestação de serviços de manejo de resíduos domiciliares sob a perspectiva do consumo de água: Estudo de caso em município de médio porte”, que visa avaliar, quantitativamente, a relação entre a geração de resíduos sólidos domiciliares (RSD) e o consumo de água, além de analisar a autossuficiência financeira dos serviços (Fonseca; Miranda; Castro, 2024, submetido à publicação).

Destaca-se que a cobrança pela prestação dos serviços é uma demanda legal, ainda incipiente no país, onde em apenas 45% dos municípios brasileiros existem algum tipo de tarifa/taxa do serviço de limpeza urbana, de acordo com SINIR

(2021). A cobrança indireta via fatura, pelo consumo de água, apresenta-se como uma recomendação da ANA em sua Resolução 79, Norma de Referência 1 (ANA, 2021).

No estudo a rota 8 é denominada de R1, a rota 2 de R2 e a rota 12 de R3, onde, para melhor detalhamento, foi realizada a análise socioeconômica do enquadramento das rotas, considerando os valores genéricos do metro quadrado (m²) estabelecidos para preços de construção, segundo o Código Tributário do Município (Decreto Municipal 11.652/2023) (Prefeitura Municipal, 2023). R1 e R3 foram enquadradas em Classe B, e a R2 foi enquadrada em classe C (Fonseca; Miranda; Castro, 2024, submetido à publicação).

Destaca-se que o teste de correlação de *Spearman* revelou uma forte correlação entre as variáveis $R=0,875$, indicando que, à medida que o consumo de água aumenta, a geração de resíduos sólidos domiciliares (RSD) também tende a crescer de forma consistente. Isso sugere que a quantificação indireta, como método variável e proporcional para tarifação dos serviços de manejo de resíduos sólidos, pode ser uma alternativa viável nesse contexto (Fonseca; Miranda; Castro, 2024, submetido à publicação). Integrar essa cobrança a um sistema já estabelecido, como o de abastecimento de água, pode ser uma estratégia eficiente, aproveitando uma base cadastral consolidada e ampla, o que também pode reduzir a inadimplência (ANA, 2021).

5 CONCLUSÃO

Com base a revisão da literatura realizada nesse trabalho, conclui-se que um gerenciamento de RSU de qualidade possui impactos positivo na Saúde e Meio Ambiente daqueles que habitam a cidade, evitando proliferação de doenças e ergonomia ao circular pelas ruas e ambientes do município, além de evitar contaminação de rios, lagos, entupimento de redes pluviais entre outros impactos não desejáveis.

Do ponto de vista econômico, o serviço de coleta de RSU representa uma parcela significativa dos recursos destinados à limpeza urbana, correspondendo até 70% do orçamento alocado para o setor. Essa relevância financeira reforça a necessidade de um gerenciamento eficiente dos RSU, no qual a etapa de coleta desempenha um papel estratégico. Uma coleta bem planejada e otimizada não apenas assegura a alocação mais eficaz dos recursos disponíveis, mas também contribui para a sustentabilidade financeira do sistema, permitindo redirecionar verbas para outras etapas do manejo de resíduos, como transporte, tratamento e disposição final.

Sobre a coleta de RSD de Muriaé, atividade relevante no gerenciamento dos RSU, os resultados apontaram uma eficiência de 75% do sistema de modo global. Se tratando da representatividade da etapa de coleta, financeiramente, o potencial de otimização representa uma economia considerável para a administração pública local. Uma vez que o sistema de coleta ineficiente determina maior desgaste de maquinários e vias públicas, ociosidade de mão de obra, dentre outros problemas.

Em relação as análises realizadas sobre o dimensionamento da frota, o valor ideal encontrado foi de 8 caminhões compactadores para a coleta de RSD do município, isso é 66,6% do quantitativo reportado atualmente (12 caminhões compactadores). O cálculo corrobora o resultado da primeira análise, fomentando o indicativo de potencial ganho de economia no gerenciamento de RSU de Muriaé com a otimização da coleta.

A realização da otimização por meio de uma roteirização, com auxílios de softwares SIG, é uma estratégia recomendada na literatura correlata. Uma vez que a caracterização e análise da eficiência resulta em potencial significativo de ganho de

eficiência, tal medida torna-se uma via para o estabelecimento de políticas públicas para os municípios.

Destaca-se que uma redução da frota e número de viagens, seria possível a partir da utilização de caminhões compactadores *truck* com capacidade de adensamento de resíduos em até cinco vezes e capacidade bruta de 24 toneladas, de acordo com o COTRAN (2016), o que representa, aproximadamente, uma capacidade 43% superior comparada aos caminhões tocos utilizados pela autarquia. Esse aumento da capacidade máxima de carga afeta diretamente na fórmula de dimensionamento da frota e no estudo de eficiência.

A redução da frota de caminhões de coleta de resíduos sólidos combinada ao aumento da eficiência do sistema, apresenta uma série de benefícios secundários. Entre os principais ganhos, destaca-se a redução da poluição atmosférica, com menores emissões de gases de efeito estufa e material particulado, o que contribui para a melhoria da qualidade do ar. Além disso, a menor circulação de veículos pesados reduz o desgaste das rodovias, uma vez que caminhões de grande porte aceleram a deterioração das vias, resultando em menores custos com manutenção da infraestrutura urbana. Outro benefício relevante é a diminuição dos gastos relacionados à manutenção da frota, abrangendo combustível, peças de reposição e serviços de reparo. Adicionalmente, a redução da frota impacta positivamente a mobilidade urbana, com menor congestionamento nas vias e melhoria no fluxo de trânsito. Por fim, a menor circulação desses veículos contribui para a mitigação da poluição sonora e para a melhoria da qualidade de vida da população, além de gerar economia para a administração pública.

Em relação a caracterização mais aprofundada das rotas R2, R8 e R12, a análise quantitativa da cobrança pela prestação de serviços de manejo de RSD em um município de médio porte, com base no consumo de água, revelou uma forte correlação, significativa, entre esses dois indicadores. Nesse sentido, à medida que o consumo de água aumenta, a quantidade de resíduos sólidos domiciliares também tende a crescer. Logo, ao correlacionar a tarifa de resíduos ao consumo de água, os municípios podem promover a responsabilidade ambiental e a justiça social, garantindo que os custos sejam distribuídos de maneira equitativa entre os usuários. Essa abordagem contribui para a autossuficiência financeira, permitindo que os

municípios invistam na melhoria contínua dos serviços e na implementação de tecnologia mais eficientes e sustentáveis.

Faz-se necessário citar, também, que a características e particularidades de cada cidade impactam o gerenciamento da coleta de resíduos sólidos, levando à uma maior variabilidade de indicadores de referência, por isso a necessidade de uma caracterização detalhada para se chegar a uma conclusão assertiva.

Outro ponto importante a ressaltar foi a dificuldade encontrada para a aquisição dos dados, uma vez que por se tratar de uma Autarquia pública, com serviço fidelizados a anos pelos mesmos funcionários, existiu uma resistência a estudos que possam possibilitar mudanças e promover nova organização estrutural do serviço, mesmo que seja para melhor funcionalidade do sistema.

Espera-se que os estudos apresentem impacto na esfera científica e influência na tomada de decisão no município de Muriaé, bem como em outras localidades, para entrega de serviço de coleta de RSD com maior qualidade e eficiência, promovendo medidas mais sustentáveis nos serviços públicos e permitindo uma economia financeira para investimento em novas áreas necessitadas.

Concomitante, indica-se a continuidade do monitoramento e da pesagem sistemática dos resíduos coletados, com o objetivo de assegurar o controle efetivo do gerenciamento. Essas práticas são essenciais para fornecer subsídios à equipe técnica na tomada de decisões estratégicas, permitindo o acompanhamento das dinâmicas do município e garantindo a manutenção da eficiência, qualidade e sustentabilidade dos serviços prestados.

REFERÊNCIA

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo. 2021.

AFONSO, Damares Lopes; DE ALMEIDA, Eduardo Simões. A Lei do Saneamento Básico e seu impacto nos índices de acesso aos serviços de saneamento básico. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 56, 2020.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br> Acesso em: jun 2024.

APAYDIN, Omer; GONULLU, M. Talha. Emission control with route optimization in solid waste collection process: A case study. **Sadhana**, v. 33, p. 71-82, 2008.

ARRIBAS, Claudia Andrea; BLAZQUEZ, Carola Alejandra; LAMAS, Alejandro. Sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos utilizando modelagem matemática e ferramentas de sistemas de informação geográfica. **Waste Management & Research**, v. 28, n. 4, p. 355-363, 2010.

ÁVILA, Giovani Manso; GIL, Moises Leão. Estudo comparativo dos meios de transporte utilizados na coleta seletiva. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 14327-14344, 2019.

AZEVEDO, Hugo Lima de. Estudo de roteirização para um atacadista distribuidor do ramo alimentício. 2023.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman: 2006. 616 p.

BARROS, RT de V. et al. Elementos de gestão de resíduos sólidos. **Belo Horizonte: Tessitura**, v. 1, 2012.

BEIGL, Peter; LEBERSORGER, Sandra; SALHOFER, Stefan. Modelagem da geração de resíduos sólidos municipais: Uma revisão. **Waste management**, v. 28, n. 1, p. 200-214, 2008.

BHAT V.N. A model for the optimal allocation of trucks for solidwaste management. **Waste Management & Research**, 1996.

BODIN, Lawrence et al. O design de um sistema computadorizado de roteamento e programação de veículos de saneamento para a cidade de Oyster Bay, Nova York. **Computers & Operations Research** , v. 16, n. 1, p. 45-54, 1989.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução CONTRAN nº 210, de 13 de novembro de 2006. Estabelece limites de peso e dimensões para veículos que transitam por vias públicas**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 nov. 2006a.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Fundação Nacional de Saúde (FUNASA)**. Manual de saneamento / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – 5.ed. Brasília: Funasa, 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Fundação Nacional de Saúde (FUNASA)**. Manual de saneamento / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – 3.ed. Brasília: Funasa, 2006b.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Instituto Brasileiro De Auditoria De Obras Públicas (IBRAOP)**. PROC-IBR-RSU 002/2017 - Análise do Dimensionamento da Frota. Brasília, 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Organização Pan-Americana da Saúde**. (2005) Política e Plano Municipal de Saneamento Ambiental. Experiências e Recomendações, Ministério das Cidades, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Secretaria Nacional De Saneamento Ambiental**. (2011) Diretrizes Para A Definição Da Política E Elaboração Do Plano De Saneamento Básico. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**. Diagnóstico de manejo de resíduos sólidos urbanos – 2019. Brasília, DF, 2020.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: jun 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 5.452, de 1º de maio de 1943**. Aprova a Consolidação das Leis do Trabalho. Rio de Janeiro, RJ, 1943.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008**. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. Brasília, DF, 2008. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6514.htm. Acesso em: jun 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 7.347, de 24 de julho de 1985**. Disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos causados ao meio-ambiente, ao consumidor, a bens e direitos de valor artístico, estético, histórico, turístico e paisagístico (VETADO) e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7347orig.htm#:~:text=LEI%20No%207.347%2C%20DE%2024%20DE%20JULHO%20DE%201985.&text=Disciplina%20a%20a%20C3%A7%C3%A3o%20civil%20p%C3%ABblica,VETADO\)%20e%20d%C3%A1%20Outras%20provid%C3%A2ncias](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7347orig.htm#:~:text=LEI%20No%207.347%2C%20DE%2024%20DE%20JULHO%20DE%201985.&text=Disciplina%20a%20a%20C3%A7%C3%A3o%20civil%20p%C3%ABblica,VETADO)%20e%20d%C3%A1%20Outras%20provid%C3%A2ncias). Acesso em: jul 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm Acesso em: jun 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2022a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: jun. 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022**. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES). Brasília, DF, 2022b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/Anexo/and11043.pdf. Acesso em: abr. 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 11.044, de 13 de abril de 2022**. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem- Recicla+. Brasília, DF, 2022c. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.044-de-13-de-abril-de-2022-393553968>. Acesso em: abr. 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; e dá outras providências. Brasília, DF, 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: jun 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm Acesso em: jun. 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.133, de 01 de abril de 2021.** Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília, DF, 2021. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14133.htm#art75ivj Acesso em: jan. 2024.

CARVALHO, Luis Eduardo Ximenes. Desenvolvimento de solução integrada de sistemas de limpeza urbana em ambiente SIG. **Rio de Janeiro-RJ–2001–XXII**, v. 29, p. 7, 2001.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: estratégia, planejamento e operação.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo – 2013 – 2015.** CETESB, 2016.

CORREIA, MLSF; ESPERIDIÃO, Fernanda; MELO, R. L. Evolução das Políticas Públicas de Saneamento Básico do Brasil, do Planasa ao PAC-Saneamento. **Encontro Nacional De Economia Política, XXV**, 2020.

COUNCIL, Kampala City. Solid Waste Management Strategy Report. **Kampala, Uganda: Republic of Uganda**, 2006.

CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. **Transportes**, v. 8, n. 2, p. 51-74, 2000.

CUNHA, C. B. Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. **Tese de Doutorado apresentado ao Departamento de Engenharia de Transportes da USP.** São Paulo: USP, 1997.

DE ALENCAR ARRUDA, Marília Feitosa; TREVIZAN, Ana Flávia Cristina. 1.3 Governança na gestão de resíduos sólidos no Brasil. **Gampe/UFRPE Recife**, 2023 1ª edição, p. 36, 2023.

DA COSTA, Natan Ruan Machado; NASCIMENTO, Victor Fernandez; OMETTO, Jean Pierre Henry Balbaud. A história da coleta de resíduos em Novo Hamburgo, RS e uma proposta de uma nova roteirização utilizando sistema de informações geográficas. **Oficina do Historiador**, v. 13, n. 2, p. e38033-e38033, 2020.

DOS SANTOS, Letícia; OMETTO, Jean PHB; NASCIMENTO, Victor Fernandez. ROTEIRIZAÇÃO DOS VEÍCULOS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS UTILIZANDO SIG. 2017.

DI MARIA, F.; MICALE, C.; MORETTINI, E.. Impact of the pre-collection phase at different intensities of source segregation of bio-waste: An Italian case study. **Waste Management**, p. 1-10, 25 abr. 2016.

DINIZ, Ravena Glicéria Noll *et al.* Desafios do Novo Marco Regulatório Lei Nº 14.026/2020 para Elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico Sob a Vertente dos Resíduos Sólidos Urbanos em Minas Gerais. In: **VII Congresso Brasileiro de Geração Distribuída**. Brasil, 2023.

EIGENHEER. Emilio Maciel. Lixo: a limpeza urbana através dos tempos. 2009. Disponível em: <http://www.lixoeducacao.uerj.br/imagens/pdf/ahistoriadolixo.pdf>. Acesso em: jun 2024.

EISENSTEIN D.D. IYER AV. Garbage collection in Chicago: a dynamic scheduling model. **Management Science**, 1997.

ENOMOTO, Leandro Minoru; LIMA, Renato da Silva. Análise da distribuição física e roteirização em um atacadista. **Production**, v. 17, p. 94-108, 2007.

FACCIO, Maurizio; PERSONA, Alessandro; ZANIN, Giorgia. Waste collection multi objective model with real time traceability data. **Waste management**, v. 31, n. 12, p. 2391-2405, 2011.

FAN, Xiumin et al. Solid waste collection optimization considering energy utilization for large city area. In: **2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)**. IEEE, 2010. p. 1905-1909.

FARRÉ, Josep Anton *et al.* Case study of pipeline failure analysis from two automated vacuum collection system. **Waste Management**, v. 126, p. 643-651, 2021.

FERRÃO, C. C.; MORAES, J. A. R.. Análise dos riscos ambientais e de acidentes de trabalho em serviços de coleta de resíduos sólidos urbanos. **Gestão & Produção**, v. 28, n. 1, 2021.

FONSECA, A. G.; MIRANDA, T. S.; CASTRO, S. R. Análise quantitativa da cobrança pela prestação de serviços de manejo de resíduos domiciliares sob a perspectiva do consumo de água: Estudo de caso em município de médio porte. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, [submetido para publicação], 2024.

GALANTE, Giacomo et al. Uma abordagem multiobjetivo para a gestão de resíduos sólidos. **Waste Management**, v. 30, n. 8-9, p. 1720-1728, 2010.

GAZOLLA, Dimas Alberto; SILVA, Roberto M. Aplicações Da Disciplina “Programa De Internato Curricular” Do Curso De Engenharia Civil Da Ufmg: Caracterização Física De Resíduos Sólidos E Roteamento Da Coleta De Lixo Urbano. **COBENGE**, 2001.

GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

GODECKE, Marcos Vinicius; WALERKO, Vandressa Siqueira. Gestão de resíduos sólidos urbanos: Estudo do caso da reciclagem em Pelotas, RS. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 104-128, 2015.

GOOGLE EARTH. Google Earth Pro: versão 7.3.6. 9796 (64-bit) R, 2024. Software. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: jul. 2024.

GOTTINGER HW. A computational model for solid waste management with applications. **European Journal of Operational Research**, 1988.

GUPTA, P. K. The Use of Modern Technology in Smart Waste Management and Recycling: Artificial Intelligence and Machine Learning. **Recent Advances in Computational Intelligence**, p. 173-188, 2019.

HANCZAR, Paweł; PISIEWICZ, Dagmara. Rozwiązania ICT wspomagające zbiórkę odpadów komunalnych. **Studia Ekonomiczne**, n. 249, p. 204-216, 2015.

HALL, R.W.; PARTYKA, J.G. (1997). On the road to efficiency. **OR/MS Today**, p.38-47, jun/1997.

HEMMELMAYR, Vera et al. A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. **Journal of Heuristics**, v. 19, p. 129-156, 2013.

HEMPE, C.; NOGUERA, J. O. C.. A educação ambiental e os resíduos sólidos urbanos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 682-695, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2022). Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: jun 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa nacional de saneamento básico 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>. Acesso em: jun. 2024.

JACINTO, Janine Pereira; ROSA, R. A.; BANOS, Rafael Silva. Heurística para solução do problema da coleta de resíduos sólidos domiciliares (RSD) com base no problema do carteiro chinês capacitado com múltiplas viagens (PCCC-MV). **TRANSPORTES**, v. 22, n. 1, p. 44-55, 2014.

JAKUBIAK, Michał. A melhoria na coleta de resíduos municipais no exemplo de um município escolhido. **Transportation Research Procedia**, v. 16, p. 122-129, 2016.

KINOBE, Joel R. et al. Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. **Habitat International**, v. 49, p. 126-137, 2015.

KIRCA O, ERKIP N. Selecting transfer station locations for large solid waste systems. **European Journal of Operational Research**, 1988.

KLEIN, Flávio Bordino; GONÇALVES-DIAS, Sylmara Lopes Francelino; JAYO, Martin. Municipal solid waste management in the municipalities of the Alto Tietê Basin: an analysis of the use of ICT in the access to government information. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 10, p. 140-153, 2018.

KÖPPEN CLIMATE CLASSIFICATION SYSTEM FOR BRAZIL. Köppen Climate Classification System for Brazil. 2024. Disponível em: <https://koppenbrasil.github.io/>. Acesso em: 06 jul. 2024.

KULCAR T. Optimizing solid waste management collection in Brussels. **European Journal of Operational Research**, 1996.

LARSEN, Anna Warberg et al. Waste collection systems for recyclables: an environmental and economic assessment for the municipality of Aarhus (Denmark). **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 744-754, 2010.

LAURIERI, Nicola et al. A door-to-door waste collection system case study: a survey on its sustainability and effectiveness. **Sustainability**, v. 12, n. 14, p. 5520, 2020.

LI, Jing-Quan; BORENSTEIN, Denis; MIRCHANDANI, Pitu B. Programação de caminhões para coleta de resíduos sólidos na cidade de Porto Alegre, Brasil. **Omega**, v. 36, n. 6, p. 1133-1149, 2008.

LINO, Fátima AM; ISMAIL, Kamal AR; CASTAÑEDA-AYARZA, Juan A. Municipal solid waste treatment in Brazil: A comprehensive review. **Energy Nexus**, p. 100232, 2023.

LITTLE, John DC et al. An algorithm for the traveling salesman problem. **Operations research**, v. 11, n. 6, p. 972-989, 1963.

MALAKAHMAD, Amirhossein et al. Solid waste collection routes optimization via GIS techniques in Ipoh city, Malaysia. **Procedia Engineering**, v. 77, p. 20-27, 2014

MALE JW, Liebman CJ. Districting and routing for solid waste management collection. **Journal of Environmental Engineering Division**, ASCE, 1978.

MATTOS, F. V.; PINHO, G. C. S.; RAMALHO, J. C. M.; CALMON, J. L.; SIMAN, R. R. A gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos com base na ACV, AECV e ACVS: perspectivas e caminhos para o Brasil e países em desenvolvimento, **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.4, p.22763-22774, 2022.

MIOT, Hélio Amante. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. **Jornal vascular brasileiro**, v. 16, n. 2, p. 88-91, 2017.

MIZIARA, Rosana. Por uma história do lixo. **InterfacEHS-Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 3, n. 1, 2011.

MORANDI, Maria Isabel W. Motta; CAMARGO, Luis F. Riehs. Revisão sistemática da literatura. In: DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel P.; ANTUNES JR, José A. Valle. **Design science research: método e pesquisa para avanço da ciência e da tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

MOURÃO, Maria Cândida; NUNES, Ana Catarina; PRINS, Christian. Heuristic methods for the sectoring arc routing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 3, p. 856-868, 2009.

MUGAGGA, Frank. The Public–Private Sector Approach to Municipal Solid Waste Management: How does it Work in Makindye Division, Kampala District, Uganda? Dissertação de Mestrado. **Geografisk institutt**. 2006.

NASCIMENTO, Victor Fernandez; DA SILVA, Alexandre Marco. Identifying problems for choosing suitable areas for installation of a new landfill through GIS technology: A case study. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 64, n. 1, p. 80-88, 2014.

MURIAÉ. Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Muriaé (DEMSUR). Limpeza Urbana. Disponível em: <<https://www.demsur.com.br/pagina/88/o-sistema>>. Acesso em: jul 2024.

MURIAÉ. Plano Municipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Muriaé. DEMSUR, 2024.

NABEMBEZI, Dennis. Solid waste management. Study in Bwise II Parish, Kawempe division. **Study for water aid**, 2011.

NASCIMENTO, Victor Fernandez *et al.* Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 4, p. 889-902, 2015.

NEGREIROS, Marcos José; PALHANO, Augusto Wagner de Castro; REIS, Eduardo César Rodrigues. Sector arc routing-based spatial decision support system for waste collection in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 41, n. 1, p. 214-221, 2023a.

NEGREIROS, Marcos; PALHANO, Augusto Wagner; REIS, Eduardo. Optimized Planning and Management of Domiciliary and Selective Solid Waste: Results of Application in Brazilian Cities (SisRot® Lix). In: **Solid Waste and Landfills Management-Recent Advances**. IntechOpen, 2023b.

OLIVEIRA, Heitor Salvador de. Problemática sócio-ambiental do lixo e gestão da coleta em áreas pobres do Recife-PE: um desafio territorial. **Revista de Geografia. Recife: UFPE-DCG/NAPA**, v. 24, n. 1, 2007.

PADILHA, Jessé Luís; MESQUITA, André Luiz Amarante. Efeito Waste-to-energy no tratamento de resíduos sólidos urbanos de pequenas cidades no Brasil. **Energy Conversion and Management**, v. 265, p. 115743, 2022.

PORTUGAL, Adriana Cuoco *et al.* Gestão, Controle e Regulação do Saneamento Básico. **Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas – IBRAOP**. Florianópolis, SC, 2024.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Superintendência De Limpeza Urbana. 2024. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/slu>>. Acesso em: jun 2024.

PREFEITURA DE IPATINGA. Serviços Urbanos - Coleta de Lixo Domiciliar.. 2024. Disponível em: <<https://www.ipatinga.mg.gov.br/servicos/info/coleta-de-lixo-domiciliar/4836>>. Acesso em: jun 2024.

PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. Coleta Domiciliar de Resíduos. Secretaria Municipal de Serviços Urbanos - SMSURB / Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU). 2024. Disponível em: <<https://prefeitura.poa.br/carta-de-servicos/coleta-domiciliar-de-residuos#:~:text=Coleta%20realizada%20de%20segunda%20a,em%20dois%20turnos%20de%20coleta.>>. Acesso em: jun 2024.

PRICEWATERHOUSECOOPERS SERVIÇOS PROFISSIONAIS; SINDICATO DAS EMPRESAS DE LIMPEZA URBANA; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA. **Gestão da Limpeza Urbana: um investimento para o futuro das cidades**. São Paulo, 2010.

_____. Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana nos municípios brasileiros. São Paulo, 2016.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**. Versão 3.36.3, 2024.

RADEL, Elaine et al. Análise da vida econômica da frota brasileira de caminhões. In: **II Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa-PR**. 2012.

REIS, Gustavo Mello; RIBEIRO JÚNIOR, J. I. Comparação de testes paramétricos e não paramétricos aplicados em delineamentos experimentais. **Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção**, v. 3, p. 1-13, 2007.

RENOVATO, Rogério Dias; BAGNATO, Maria Helena Salgado. O serviço especial de saúde pública e suas ações de educação sanitária nas escolas primárias (1942-1960). **Educar em Revista**, p. 277-290, 2010.

RIPA, M.; FIORENTINO, G.; VACCA, V.; ULGIATI, S. The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 445- 460, 2017.

RODRIGUES, Leonardo Mangia. *et al.* Proposta De Sub-Regiões Para A Zonas De Coleta De Resíduos Sólidos Urbanos Na Cidade Do Rio De Janeiro. **XXXIX Encontro Nacional De Engenharia De Producao**. Santos, São Paulo, 2019.

SANTOS, Francisca Kennia; PINTO FILHO, Jorge Luís. Revisão integrativa sobre a gestão ambiental de resíduos sólidos em pequenos municípios. **Enciclopedia Biosfera**, v. 19, n. 41, 2022.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA. Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para Políticas Públicas e a Contribuição Brasileira para o Acordo de Paris. Período 1970-2016. Observatório do clima, 2018. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector&_gl=1*1bnqyyw*_ga*mjm3mduxotuwlje3mjazmteynzi.*_ga_xzwswejdqw*mtcy mdmxmti3ms4xljaumtcymdmxmti3ms4wljauma.. Acesso em: jun 2024.

SILVA, Pollyana Ferreira da. Pagamento por serviços ambientais para catadores de materiais recicláveis. 2022. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo. 2022.

SNIS. Saneamento. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acesso em: jun. 2024.

SOUTO, Vladimir Sérgio de Aquino. Obrigações Legais da Gestão Municipal no Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos. **Gestão, Controle e Regulação do Saneamento Básico**. coordenação Adriana Cuoco Portugal, Valéria Cristina Gonzaga ; organização Guilherme Bride Fernandes, Narda Consuelo Vitória Neiva

Silva ; colaboração André Luiz Mendes...[*et al.*]. -- Florianópolis, SC : Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas - IBRAOP, p. 130-153, 2024.

SOUZA, Vamberto Oliveira de. Educação Ambiental na efetivação de práticas ecológicas e coleta seletiva na Universidade Estadual da Paraíba. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**. [S. 1. 2014.

SPINOLA, G. M. R. *et al.* Análise estatística da composição gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos com o Índice de Desenvolvimento Humano para os municípios do estado de São Paulo. **Geoambiente On-line**. [S. LI. n. 33. p. 106-123. 2019.

SPOTI, Tanaiane Beatriz; AMARAL, Creusa Sayuri Tahara. Os desafios da gestão de resíduos sólidos urbanos domésticos no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 2, p. 8712-8724, 2023.

STAT SOFT. INC. **STATISTICA**. Versão 12. 2300 East 14th St. Versão 2021.

TAN, Q.; HUANG, G. H.; CAI, Y. P. Identification of optimal plans for municipal solid waste management in an environment of fuzziness and two-layer randomness. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 24, p. 147-164, 2010.

TAVARES, Gilberto et al. Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. **Waste management**, v. 29, n. 3, p. 1176-1185, 2009.

TUNG DV. Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi. **European Journal of Operational Research**, 2000.

UANG, Shan-Huen; LIN, Pei-Chun. Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy. **Omega**, v. 55, p. 24-37, 2015.

UBOS. Statistical abstract of Kampala. Kampala, Uganda: Government Printers, Kampala, 2012.

VELLOSO, M. P.; SANTOS, E. M. dos; ANJOS, L. A. dos. Processo de trabalho e acidentes de trabalho em coletores de lixo domiciliar na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 13, p. 693-700, 1997.

VILARINHO, Cíntia Maria Ribeiro; DO COUTO, Eduardo de Aguiar. Saneamento básico e regulação no Brasil: desvendando o passado para moldar o futuro. **Revista Digital de Direito Administrativo**, v. 10, n. 2, p. 233-257, 2023.

ZAROS, Lilian Giott; MEDEIROS, Henrique Rocha de. Bioestatística. 2. **Natal: EDUFRN**, 2011.

ANEXO I

ESTUDO DAS ROTAS DE COLETA DE LIXO - MURIAÉ



Objetivo

- ▶ O objetivo principal do estudo é o levantamento de dados para as agências nacionais fiscalizadoras de aterro sanitário e controladora de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos).
- ▶ O objetivo secundário do estudo é materializar as rotas, entendendo as dificuldades de operação da coleta, problemas presentes hoje que podem ser resolvidos e deixar o processo mais eficiente.
- ▶ Duração: 45 dias

Metodologia

- ▶ Para realização do estudo será necessário entender o dia a dia dos motoristas de caminhões de coleta de lixo, quais pontos poderiam ser resolvidos para o serviço ser mais rápido e com melhor qualidade.
- ▶ Será coletada informações na guarita de pesagem de cada rota, como: nome do motorista, condições climáticas do dia..
- ▶ ESSE É O MOMENTO DE PASSAREM TUDO QUE ACHAM QUE DEVIRA MUDAR E MELHORAR PARA QUE O SERVIÇO DE VOCÊS SE TORNEM MELHOR E MAIS FÁCIL DE SER EXECUTADO, GERANDO ASSIM UM MELHOR RESULTADO PARA NOSSA CIDADE
- ▶ Todas as informações deverão ser enviadas a mim da forma que preferirem: Presencial; Whatsapp; Anônimo...

Metodologia

▶ ROTAS:

- As rotas em mãos foram informadas pela equipe do DLU.

| | |
|---|---|
|  | ROTA 01 - São Cristóvão, Leblon, Padre Tiago, BR 356, Padre Tiago ao Leblon. Obs: Santa Laura somente até a Delegacia/ Terça, Quinta e Sábado. |
|  | ROTA 02 - Santa Terezinha, Inconfidência, Edgar Miranda/ Terça, Quinta e Sábado. |
|  | ROTA 03 - Via Conceição, Porto Belo, Chale, Universitário, Sofoco/ Terça, Quinta e Sábado. |
|  | ROTA 04 - Aeroporto, Patrimônio São José, Chácara Brum, Chácara Lourdes, Boa Esperança, São Pedro, Recanto Verde, Horto/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 05 - Coronel Izalino, Gavea, Boa Vista, Barra/ Segunda à Sábado (Noite). |
|  | ROTA 06 - Centro, Porto, parte Santo Antônio/ Segunda à Sábado (Noite). |
|  | ROTA 07 - Via Real, Vale do Castelo, São Francisco, Santo Antônio, São Paulo/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 08 - Alto Castelo, Primavera, parte João XXIII e Alterosa/ Terça, Quinta e Sábado. |
|  | ROTA 09 - Quinta das Flores, parte São Gotardo, Polety, parte João XXIII, João VI/ Terça, Quinta e Sábado. |
|  | ROTA 10 - Parte Encoberta, partes São Gotardo, Prefeito Hélio Araujo, parte João XXIII/ Terça, Quinta e Sábado. |
|  | ROTA 11 - Parte Cerâmica, Napoleão, parte Aeroporto, Distrito Industrial, Bom Jesus, Florestal, Solare/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 12 - Safira, Augusto Abreu, Planalto, São Vicente/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 13 - Parte Cerâmica, parte Dornelas II, Domelas III, Franco Suíço, Santana I, II, III, parte Bom Pastor, parte Cardoso de Melo/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 14 - São Joaquim, Joanópolis, Napoleão II, parte Cardoso, parte Bom Pastor/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 15 - Dornelas, Domelas II, José Cirilo/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 16 - Panorama, União, Santa Rita, Gaspar, Santa Luzia/ Segunda, Quarta e Sexta. |
|  | ROTA 19 - Santa Helena, Nova Munique, Vermelho, Pisapanema/ Terça, Quinta e Sábado. |
| | *ROTA 17 - Oficinas, São João do Glória, Patrimônio dos Carneiros, Capitinga, Itamuri/ Segunda, Quarta e Sexta. |
| | *ROTA 18 - Hospitalar (Segunda à Sábado), São Fernando, Macuco, Boa Família, Divisório/ Segunda, Quarta e Sexta. |

Metodologia

▶ ROTAS:

- As rotas em mãos foram informadas pela equipe do DLU.



- Todas as rotas foram desenhadas e estão com uma kilometragem, caso a equipe sinalize alguma utilização, peço que me informem, o mais rápido possível, para atualizarmos o cadastro, a fim que o estudo fique fidedigno.

Metodologia

▶ COLETA DE DADOS:

- Os dados serão coletados na guarita de pesagem na entrada do aterro sanitário, por um colaborador do DEMSUR.
- Serão coletadas as informações de TODAS as rotas, utilizando o número para identificação, que deve ser informado ao colaborador da guarita pelo motorista.
- A guarita ficará com funcionário para coleta de dados 24 horas, logo todos os caminhões e rotas serão informados sem perda de informação.
- A planilha que ficará com o colaborador da guarita:

| PES. NR | DATA D/M/A | PLACA | HORA | PESAGEM (KG) | VEÍCULO | KM Saida | KM Chegada |
|---------|------------|-------|---------|--------------|------------|----------|------------|
| | | | SAÍDA | SAÍDA | PRENSA | | |
| | | | | | CAÇAMBA | | |
| | | | | | CARROCERIA | | |
| | | | ENTRADA | ENTRADA | CAMIONETE | | |
| | | | | | BAÚ | | |
| | | | | | TANQUE | | |

| MOTORESTA | ROTA | EMPRESA RESP. PELO TRANSPORTE | TIPO DE RESÍDUO | TEMPO MOMENTÂNEO |
|-----------|------|-------------------------------|----------------------------|------------------|
| | | | COMUM - COLETA URBANA | SOL |
| | | | PODA DE ÁRVORE E CAPINA | NUBLADO |
| | | | ENTULHO - CONSTRUÇÃO CIVIL | CHUVA FINA |
| | | | COLETA SELETIVA | CHUVA FORTE |
| | | | PNELIS INSERVÍVEIS | CHUVA NOITE |
| | | | EFFLUENTES EXTERNOS | ANTERIOR |

| NOME RESP. | OBSERVAÇÃO |
|------------|------------|
| | |

O que eu puder fazer para melhor o trabalho de vocês e tiver a meu alcance, podem contar comigo!

Agradeço a
atenção de todos!

“Sejam fortes e não desanimem,
pois o trabalho de vocês será
recompensado.”
2 Coríntio 15:7

ANEXO II

Análise quantitativa da cobrança pela prestação de serviços de manejo de resíduos domiciliares sob a perspectiva do consumo de água: Estudo de caso em município de médio porte

Quantitative analysis of charging for the provision of household waste management from the perspective of water consumption: Case study in a medium-sized municipality

Alan Gonçalves Fonseca; Thaís de Souza Miranda; Samuel Rodrigues Castro

Resumo

A gestão ambiental adequada dos resíduos sólidos enfrenta obstáculos consideráveis devido às dificuldades financeiras dos municípios. O arcabouço legal recente estabelece diretrizes para a garantia da sustentabilidade dos serviços de manejo de resíduos, ainda incipiente no país. A cobrança indireta, baseada no consumo de água, é sugerida como uma medida eficaz, incentivando a redução, a reciclagem de resíduos, e promovendo a equidade entre os usuários. Este estudo visa avaliar quantitativamente a relação entre a geração de resíduos sólidos domiciliares (RSD) e o consumo de água em um município de médio porte, além de analisar a autossuficiência financeira dos serviços. O estudo apontou uma geração de 3,5 kg de resíduos coletados por metro cúbico de água consumida no município e uma correlação linear positiva e significativa (95% confiança) entre esses dois parâmetros. Realizou-se o cálculo da tarifa para prestação do serviço de manejo dos RSD, empregando a metodologia de cálculo da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que determinou uma autossuficiência financeira de, aproximadamente, 100%. Por fim, verificou-se que arrecadação com base no consumo de água pode cobrir integralmente os custos dos serviços de manejo de RSD, garantindo a sustentabilidade econômico-financeira dos serviços para o município em questão.

Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos. Limpeza pública. Autossuficiência financeira. Poluidor-pagador. Custos da prestação de serviços.

Abstract

Proper environmental management of solid waste faces considerable obstacles due to the financial difficulties of municipalities. The recent legal framework establishes guidelines to ensure the sustainability of waste management services, still incipient in the country. Indirect charging, based on water consumption, is suggested as an effective measure, encouraging waste reduction and recycling, and promoting equity among users. This study aims to quantitatively evaluate the relationship between the generation of household solid waste (HSW) and water consumption in a medium-sized municipality, in addition to analyze the financial self-sufficiency of the services. The study showed a generation of 3.5 kg of collected waste per cubic meter of water consumed in the municipality and a significant positive linear correlation (95% confidence) between these two parameters. The calculation of the fee for the provision of HSW management services was carried out using the calculation methodology of the National Water Agency (ANA), which determined a financial self-sufficiency close to 100%. Finally, it was verified that the collection based on water consumption can fully cover the costs of HSW management services, ensuring the economic and financial sustainability of the services for the municipality in question.

Keywords: Waste management. Public cleaning. Financial self-sufficiency. Polluter pays principle. Service provision costs.

Introdução

A dificuldade financeira das cidades é indicada como um dos principais obstáculos para o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, sendo a cobrança pelo manejo crucial para melhorar o financiamento e equilibrar as contas dos gestores públicos municipais, responsáveis por esses serviços. A crescente preocupação e apelo popular, legislações mais rigorosas e o aumento da geração de resíduos têm determinado elevados custos dos serviços relacionados (Alzamora & Barros, 2020; Brumatti, Chaves & Siman, 2024).

A Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), instituída pela Lei nº 11.445 de 2007 (Brasil, 2007), estabeleceu um marco regulatório abrangente para a gestão dos serviços de saneamento básico no Brasil. Com o objetivo de universalizar esses serviços e garantir a sustentabilidade ambiental e a melhoria da qualidade de vida da população, a PNSB promove a integração das políticas de saneamento com outras políticas públicas. De acordo com o artigo 29 da referida lei, os serviços públicos de saneamento básico devem ter sua sustentabilidade econômico-financeira assegurada por meio de remuneração adequada, que será obtida pela cobrança dos serviços prestados (Brasil, 2007). Esta medida visa garantir os recursos necessários para a manutenção e melhoria contínua dos serviços, incentivando uma gestão eficiente e a prestação de serviços de qualidade à população.

Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 de 2010 (Brasil, 2010), veio complementar o arcabouço legal relacionado ao saneamento básico. A PNRS tem como objetivo a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, em que a regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização dos serviços prestados são realizadas através da adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira. Ainda, estabelece a responsabilidade compartilhada entre governo, setor empresarial e sociedade civil, promovendo a redução da geração de resíduos, reutilização, reciclagem, e a destinação final ambientalmente adequada.

Em 2020, a Lei nº 14.026 (Brasil, 2020), conhecida como Atualização do Marco Legal do Saneamento Básico, veio atualizar e consolidar as diretrizes estabelecidas pelos instrumentos legais supracitados. Esta lei visa acelerar a universalização dos serviços de saneamento, ampliando a participação do setor. Além disso, é enfatizado a importância de uma regulação eficiente e da transparência na prestação dos serviços, reforçando a necessidade de investimentos e a adoção de tecnologias modernas para melhorar a qualidade dos serviços. Outrossim, em seu artigo 31, § 2º, estabelece que deixar de instituir a cobrança pela prestação do serviço público pode significar renúncia de receita, condição que prevê penalidades, conforme a Lei Complementar nº 101, 2000 – Lei de Responsabilidade Fiscal (Brasil, 2000).

Apesar dos avanços em termos de regulação, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), para o ano base de 2022 a cobrança pelos serviços de manejo de resíduos sólidos ocorreu em apenas 44% dos municípios participantes (5.060). A taxa específica no boleto do IPTU é a forma mais amplamente adotada de cobrança, representando 81,9% desses municípios, seguida pela taxa no boleto de água (12,8%), boleto específico (4,9%) e tarifa (0,4%).

Sobre o cálculo do indicador da autossuficiência financeira, a receita arrecadada cobre, em média, 53,8% das despesas totais (SNIS, 2023a). Por isso, é importante uma adequação, mesmo para os municípios que já realizam alguma modalidade de cobrança, para que os valores arrecadados façam frente aos custos reais dos serviços prestados (ANA, 2021). Em geral, os serviços de limpeza pública e manejo de resíduos absorvem entre 7 e 15% dos recursos do orçamento municipal, dos quais mais de 50% são destinados às etapas de coleta e transporte (IPT, 2000). Segundo Sena et al. (2023), as despesas com o gerenciamento do resíduo domiciliar são advindas principalmente dos custos com disposição final de rejeitos, coleta convencional e seletiva, sendo fortemente influenciadas pela modalidade adotada e pelo agente executor.

Com base no princípio do poluidor-pagador, o arcabouço legal delega aos geradores a responsabilidade de custear possíveis impactos, bem como, os custos referentes ao manejo e gerenciamento de seus resíduos, algo semelhante ao que já ocorre com serviços de abastecimento de

água e eletricidade (Alzamora & Barros, 2020; Dutra et al., 2018). Porém, devido às restrições econômicas, especialmente nos países em desenvolvimento, e considerando os desafios de implementação de métodos diretos de medição da geração de resíduos sólidos, estudos vêm se pautando na quantificação indireta, utilizando como base o consumo de água ou de energia elétrica em unidades habitacionais (Franco, Castilhos Junior & Souza, 2014; Pisani Jr., Castro & Costa, 2018).

Com a necessidade de regulamentação e normatização, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) publicou a Resolução 79, aprovando a Norma de Referência nº 1 (NR1) (ANA, 2021). Esta norma estabelece diretrizes gerais para a cobrança pelos serviços de manejo de resíduos sólidos, visando garantir a sustentabilidade econômica e financeira dos serviços. A NR1 enfatiza a importância de uma cobrança justa e proporcional ao volume de resíduos gerados, incentivando práticas de redução e reciclagem, e promovendo a equidade entre os usuários.

No Brasil, onde a cobrança pela prestação de manejo de resíduos existe, o cálculo tem como base a área construída das propriedades, o que pode não refletir precisamente a geração de resíduos, como evidenciado por Franco, Castilhos Júnior e Souza (2014). Sendo assim, uma proposta eficaz para a cobrança poderia ser feita com base no consumo de água, ou seja, relacionar tal consumo com a geração de resíduos para cada ligação de água, situação que, poderia estar mais bem relacionada, e expressar com maior fidelidade a geração de resíduos de cada economia (Beserra et al., 2006; Alzamora & Barros, 2020; Alzamora et al., 2022).

A literatura correlata (Mannarino, Ferreira & Gandolla, 2016; Slavík, Pavel & Arltová, 2020; Sasao, Jaeger & Weerd, 2021) tem reportado que os encargos variáveis, especialmente os baseados em massa e volume, impulsionam as ações da população. Nesse sentido, a cobrança por tarifas não apenas determina impactos positivos no equilíbrio orçamentário, mas se mostra ambientalmente eficaz por contribuir com a diminuição da geração de RSU e aumentar a quantidade de materiais recicláveis recuperados no sistema.

Diante do contexto apresentado, o presente estudo tem por objetivo avaliar quantitativamente a relação entre geração de resíduos sólidos domiciliares e o consumo de água em município de médio porte, evoluindo para uma análise da autossuficiência financeira da prestação dos serviços à luz do que determina a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

Metodologia

Caracterização da área de estudo e levantamento de dados

O município em estudo fica localizado no estado de Minas Gerais, na região da Zona da Mata Mineira e seu território é totalmente inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (IBGE, 2022). A altitude varia de 328 m a 1.575 m, indicando um relevo com grande variação de altitude e declividade (Prefeitura Municipal & DRZ Geotecnologia e Consultoria, 2023).

A população do município é de 104.108 habitantes e possui uma área territorial de 841,693 km² (IBGE, 2022). Além do distrito Sede, o município é composto por outros sete distritos, quatro povoados e possui uma área rural abrangente (Prefeitura Municipal & DRZ Geotecnologia e Consultoria, 2023).

O município apresenta um PIB per capita de R\$ 24.137,53, com 93,67% dos domicílios abastecidos com água pela rede geral e 96,73% de cobertura de coleta de resíduos sólidos (IBGE, 2022). Além disso, de acordo com dados levantados junto ao Departamento Municipal de Saneamento (DEMSUR), em outubro de 2023 havia um total de 38.381 contas de água registradas, com um consumo mensal médio de 7,46m³ de água por domicílio.

A autarquia municipal é responsável pelo abastecimento de água, bem como pela limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, realizando os serviços de coleta, transporte e destinação final, assim como a capina, poda e varrição nas áreas públicas da Sede, distritos e povoados (Prefeitura Municipal & DRZ Geotecnologia e Consultoria, 2023).

A coordenação do Departamento de Limpeza Urbana (DLU), vinculado ao DEMSUR, foi consultada para a devida demarcação da roteirização de coleta a cidade, sendo traçado um mapa com todos itinerários até o aterro sanitário do município. As informações geográficas foram compiladas com o

auxílio do *software* QGIS (versão 3.36.3), obtendo-se as rotas e regiões de abrangência, com as respectivas distâncias de percurso.

As coletas são divididas em 23 rotas, com frequências devidamente estabelecidas pela autarquia. Destas, foram selecionadas três rotas para o presente estudo, devido a representatividade das mesmas em relação às demais rotas do município, tanto em extensão quanto em geração de resíduos e consumo de água. A Figura 1 ilustra a localização do município e das rotas de estudo.

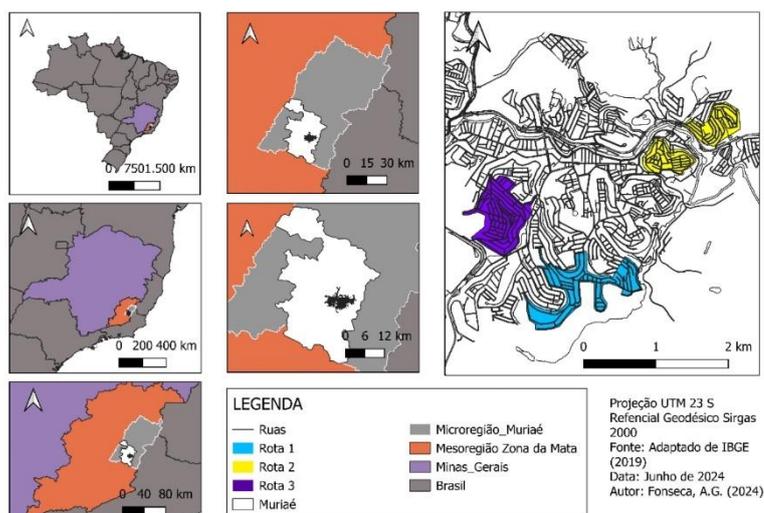


Figura 1 - Mapa de localização do município de estudo e das rotas selecionadas. Fonte: Autores.

A distância linear percorrida pelos caminhões para a coleta dos resíduos sólidos domiciliares (RSD) no município é de 277,11 km, enquanto o percurso total de coleta é de 356,35 km, considerando trechos improdutivos e sentido de direção. A distância linear total das rotas consideradas no estudo é de 32,26 km, representando 12% da extensão linear das vias do município, que abriga cerca de 15% da população do município. A Tabela 1 exibe resumidamente as características das rotas – Rota 1 (R1), Rota 2 (R2) e Rota 3 (R3) – considerando a população atendida, bem como, o número de domicílios, dias da semana em que as coletas são realizadas e extensão.

Tabela 1 - Características das rotas de estudo.

| ROTAS | POPULAÇÃO (hab) | DOMICÍLIOS (nº) | COLETAS (dias) | DISTÂNCIA LINEAR (km) | PERCURSO DE COLETA (km) |
|-----------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| R1 | 5.564 | 2004 | Ter, Qui, Sáb | 11,73 | 15,9 |
| R2 | 4.677 | 2242 | Ter, Qui, Sáb | 9,76 | 11,96 |
| R3 | 5.522 | 2153 | Seg, Qua, Sex | 11,77 | 14,41 |
| MUNICÍPIO | 104.108 | 38.381 | -- | 277,11 | 356,35 |

Fonte: Autores.

Após esse levantamento inicial, foi realizada uma visita ao pátio de apoio do município, onde foram catalogados os caminhões compactadores utilizados na coleta de RSD, relacionando-os às respectivas rotas. Para aferição da quantidade de massa de RSD em cada rota, foi realizado um monitoramento dos dados da balança do aterro sanitário do município nos meses de agosto, setembro e outubro de 2023. De acordo com a caracterização realizada pelo Plano Diretor do município 2018-2028 (Prefeitura Municipal, 2021), as rotas R1, R2 e R3 estão inseridas em áreas predominantemente residenciais.

A análise socioeconômica para enquadramento das rotas foi realizada considerando os valores genéricos do metro quadrado (m²) estabelecidos para preços de construção, segundo o Código Tributário do Município (Decreto Municipal 11.652/2023) (Prefeitura Municipal, 2023), apresentado

na Figura 2, em que os quartis desse conjunto de dados determinaram os limites entre as classes A, B, C e D, consideradas no presente estudo.

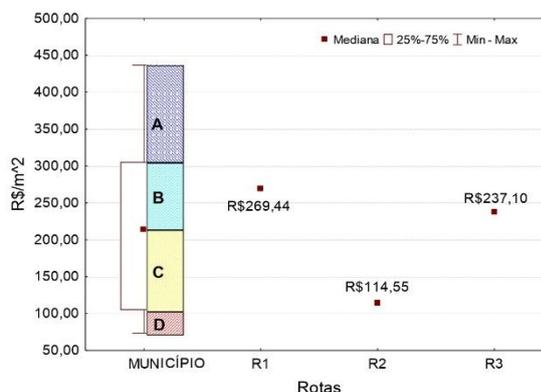


Figura 2 - Enquadramento das rotas do estudo por classes socioeconômicas (A, B, C e D) com base nos valores do m² estabelecidos para construção. Fonte: Autores.

Destaca-se que as rotas R1 e R3 foram enquadradas na Classe B, com valores do m² iguais a R\$269,44 e R\$237,10, respectivamente. Já a rota R2, foi enquadrada na Classe C, com valor do m² igual a R\$114,55.

Análise da autossuficiência financeira

Realizou-se uma análise da autossuficiência financeira do município, conforme metodologia estabelecida pela ANA (2021). Os resultados obtidos com base no cálculo segundo a teoria estabelecida foram avaliados, de forma comparativa, com os estudos econômicos realizados por ARIS-ZM (2022) em termos da autossuficiência reportada pelo próprio município. Para o cálculo da receita requerida para a prestação de manejo de resíduos do ano de 2023 foi consultado o Quadro de Detalhamento da Despesa (QDD) referente à Lei Municipal nº 6.546/2022 (Prefeitura Municipal, 2022), que dispõe sobre o orçamento anual do município de estudo. Na Tabela 2 é apresentada a síntese das despesas relacionadas para cada sub setor do DEMSUR.

Tabela 2 - Detalhamento das despesas dos sub setores do DEMSUR.

| SUB SETOR | DESPESA |
|-------------------|--------------------------|
| ADMINISTRAÇÃO | R\$ 14.530.248,22 |
| ÁGUA POTÁVEL | R\$ 19.763.649,61 |
| ÁGUA PLUVIAL | R\$ 2.510.000,00 |
| ESGOTO | R\$ 11.356.831,34 |
| LIMPEZA URBANA | R\$ 416.000,00 |
| AMBIENTAL | R\$ 21.280.002,17 |
| CONTINGENCIAMENTO | R\$ 3.000,00 |
| TOTAL | R\$ 69.859.731,34 |

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal (2022).

Com base em estudo econômico realizado pela ARIS-ZM (2022), apurou-se que alguns centros de custos são comuns a mais de uma atividade desenvolvida pelo DEMSUR. Sendo assim, para tais casos, foram estipulados critérios de rateio. Os critérios adotados levaram em conta o número de funcionários e o número de veículos demandados em cada atividade (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo dos critérios de rateios adotados para o rateio das despesas.

| CENTRO DE CUSTOS | CRITÉRIO DE RATEIO ADOTADO |
|---|--|
| Manutenção da coleta seletiva, Operação do aterro sanitário, Ampliação/reforma do aterro sanitário. | Absorção integral |
| Varrição dos logradouros públicos e coleta do lixo domiciliar, Manutenção dos sistemas de limpeza urbana, Aquisição de veículos, máquinas e equipamentos. | Absorção de 66,7% dos custos, conforme a representatividade do número de automóveis envolvidos nos serviços de manejo de RSU em relação ao total. |
| Uniformes e EPIs, Pessoal e encargos, Auxílio alimentação. | Absorção de 51,4% dos custos, conforme a representatividade do número de funcionários envolvidos com os serviços de manejo de RSU em relação ao total. |
| Manutenção dos serviços administrativos. | Rateio igualitário entre os serviços prestados pelo DEMSUR (resíduos, água, esgoto e drenagem) |

Fonte: Adaptado de ARIZ-ZM (2022).

Com base nos critérios de rateio e de posse do valor das despesas, foi possível calcular a receita requerida (RR) para o setor de limpeza urbana relacionado aos serviços de manejo de RSD, utilizada para o cálculo do valor unitário com base no consumo de água (VU_a), segundo a Eq. 1 (ANA, 2021):

$$VU_a = \frac{RR}{VAF_{total}} \quad (Eq. 1)$$

Onde:

VU_a : Valor Unitário da RR com base no consumo de água (R\$/m³);
 RR : Receita Requerida anual (R\$);
 VAF_{total} : Volume de água faturado no ano (m³).

De acordo com o Manual Orientativo sobre a Norma de Referência nº 1/ANA/2021 (ANA, 2021), ao analisar os elementos: Recuperação dos custos dos serviços – Riscos de arrecadação e aplicação dos recursos; Relação entre o valor cobrado e o serviço prestado; e Custos de implantação ou adequação e operação do sistema de cobrança mais adequado, a melhor estrutura de cobrança se dá pela Estrutura I - Alternativa 3 - modelo de rateio: Taxa ou Tarifa Progressiva em Relação ao Consumo de Água. Para essa alternativa, é considerada a adoção de fatores diferenciados de cálculo, por categorias de usuários e por faixas de consumo, com classificação e configuração similares às adotadas para o serviço público de abastecimento de água.

Para a modalidade considerada, a equação geral de cálculo da Tarifa/Taxa ($TMRS$), segundo a Eq. 2 (ANA, 2021):

$$TMRS = TBD + VU_a \times FFC \times (VAF_i - FTB_i) \quad (Eq. 2)$$

Onde:

$TMRS$: Valor mensal da Tarifa/Taxa de manejo de resíduos sólidos de cada usuário (R\$);
 TBD : Tarifa/Taxa básica mensal de disponibilidade da respectiva categoria/subcategoria, aplicável a todos os imóveis atendidos ou com o serviço de manejo de RSU à disposição, inclusive para imóveis, edificados ou não, que não tenham consumo ou não sejam usuários do serviço de abastecimento de água (caso outra regra não seja estabelecida), considerando o fator de cálculo específico e o valor unitário da receita requerida com base no volume de água (R\$);
 VU_a : Valor unitário da RR (R\$/m³);
 FFC : fator adimensional de cálculo atribuído para a faixa de consumo da categoria/subcategoria do imóvel em que se enquadra o usuário;
 VAF_i : consumo de água faturado mensal do imóvel (economia), observado consumo mínimo faturado igual ou maior que FTB e o limite máximo da categoria, se for o caso (m³);
 FTB_i : Fator de cálculo da TBD da respectiva categoria/subcategoria do imóvel (múltiplos de 1 m³).

Assim, foram calculadas as tarifas para cada faixa de consumo nas categorias: residência social, residência normal, comercial/serviços, industrial e pública/filantrópica. A distribuição relativa das

economias de cada faixa de consumo e sua respectiva categoria foram estimadas com base no estudo econômico realizado por ARIS-ZM (2022).

Tratamento estatístico de dados

Com o uso do *software* Statistica (V. 8.0) foram realizados testes estatísticos a 95% de confiança, possibilitando o tratamento dos dados, análises comparativas e interpretações sobre a possível correlação entre a geração de resíduos domiciliares e o consumo de água para as rotas em questão e o município como um todo.

A estatística descritiva orientou a seleção de procedimentos inferenciais adequados, o que permitiu conclusões ampliadas para a população (Teixeira et al., 2014). A distribuição de normalidade dos grupos foi testada recorrendo aos testes de *Kolmogorov-Smirnov* ou *Shapiro-Wilk*, sendo rejeitada a hipótese de aderência à distribuição normal (p-valor <0,05). Com base em tal resultado preliminar, o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis* foi utilizado para a comparação múltipla das distribuições populacionais (R1 vs R2 vs R3). Sempre que os resultados foram mais consistentes com a hipótese alternativa (H_1), evidenciando possíveis diferenças significativas, foi realizado um teste *post hoc* (*Multiple comparisons of mean ranks*) para a identificação dos grupos específicos que apresentaram diferenças entre si (Sheskin, 2011; Gibbons & Chakraborti, 2014).

A relação linear entre duas variáveis quantitativas pode ser estimada pelo coeficiente de correlação (r), uma medida adimensional que varia de -1 a +1, onde os valores extremos desse intervalo indicam uma maior força da relação entre tais variáveis (Sperlin, Verbyla & Oliveira, 2020). Utilizou-se o teste não paramétrico de correlação de *Spearman* para a análise da relação entre a geração de resíduos e o consumo de água, evidenciados para os domicílios contemplados nas rotas objeto do estudo (R1, R2 e R3).

Resultados e Discussão

Caracterização da coleta de resíduos sólidos domiciliares e consumo de água tratada

Na Figura 3 é apresentado o somatório de resíduos domiciliares coletados (3a), além do consumo de água (3b), para as rotas R1, R2, R3 e para o município, nos meses de monitoramento considerados no estudo.

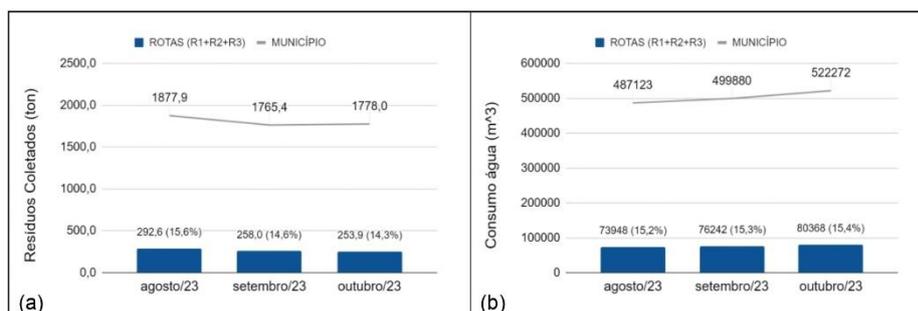


Figura 3 - Análise mensal dos (a) Resíduos coletados; e (b) consumo de água nas rotas consideradas e no município. Fonte: Autores.

As rotas representam em torno de 15% do total de resíduos coletados e consumo de água do município, como pode ser observado na Figura 3. Destaca-se que esse valor relativo representa 268 toneladas mensais de resíduos domiciliares e 76.853 m³ de água tratada. A geração de resíduos e

consumo de água reportados apresentam-se proporcionalmente coerentes com a representatividade da população em domicílios alocados em R1, R2 e R3.

A geração de RSU no Brasil varia conforme a faixa populacional dos municípios, para município entre 100 e 250 mil habitantes a massa coletada *per capita* em relação à população total atendida em 2022 foi de 0,96 kg/hab.dia (SNIS, 2023). No município de estudo, se tratando apenas da fração de RSD coletada *per capita*, obteve-se cerca de 0,57 kg/hab.dia para as rotas em questão. Em relação ao consumo de água *per capita*, no Brasil é de 0,148 m³/hab.dia, na região Sudeste é de 0,159 m³/hab.dia e no estado de Minas Gerais é de 0,167 m³/hab.dia (SNIS, 2023b). Para as rotas estudadas, o consumo de água *per capita* nos meses de estudo foi em torno de 0,163 m³/hab.dia, quantitativo próximo aos valores reportados para o estado e região.

Não foi observada variações consideráveis na geração de RSD e consumo de água ao longo dos meses de estudo (agosto, setembro e outubro). Segundo Barros (2012), a sazonalidade, variações temporais, dias da semana, meses do ano, dentre outros fatores podem influenciar tanto na quantidade quanto na qualidade dos resíduos gerados. Em estudo realizado por Dornelas e Guimarães (2023) em município de grande porte localizado em Minas Gerais, observou-se que os meses de janeiro e dezembro determinaram os maiores quantitativos na geração e coleta de RSU, em contrapartida, os meses de maio a junho foram aqueles reportados com os menores quantitativos. Tais resultados foram corroborados por estudos de Merelles et. al. (2019).

Os resultados de coleta de RSD e consumo de água por rota e para o município foram avaliados estatisticamente por meio de testes de hipóteses e os resultados reportados na Figura 4.

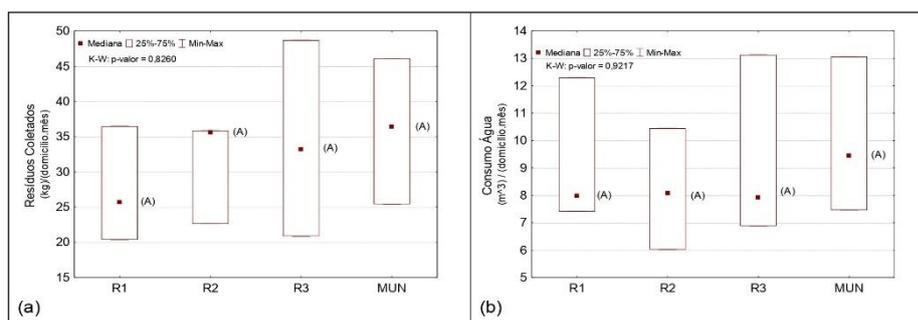


Figura 4 - Teste estatístico de comparações múltiplas para (a) resíduos coletados e (b) consumo de água entre as rotas R1, R2, R3 e para o município. Fonte: Autores.

Os testes de *Kruskal Wallis*, para ambos os casos avaliados, não evidenciaram diferenças significativas entre os valores mensais obtidos para os domicílios contemplados nas rotas - R1, R2, R3 e município (p-valores > 0,05). O município reportou valores mensais medianos em torno de 36 kg/domicílio e um consumo de água em torno de 9,5 m³/domicílio, valores levemente superiores às medianas evidenciadas para as rotas. Observa-se que tal resultado pode estar relacionado ao fato das rotas objeto de estudo (R1, R2 e R3) contemplarem áreas exclusivamente residenciais e o município, além dessas, contempla economias que podem determinar maior geração de resíduos e consumo de água, tais como, os setores do comércio, serviços e indústria, contribuindo para o incremento dos valores calculados para a medida de tendência central.

De acordo com Pisani Jr., Castro e Costa (2018), Monteiro et al. (2019) e Alzamora et. al. (2022), o aumento da renda e do poder aquisitivo podem determinar maior consumo de água e energia elétrica em residências, devido ao uso de aplicações que proporcionam conforto e praticidade. Esses mesmos fatores podem resultar em maior geração de resíduos, conforme já havia sido reportado no Brasil por Campos (2012), com impacto predominante na fração de recicláveis. O resultado do teste estatístico apresentado na Figura 4 demonstra que, apesar de R2 (classe C) ter tido um enquadramento socioeconômico diferente das demais rotas (classe B), isso não determinou diferenças significativas no padrão quantitativo de geração de resíduos e consumo de água para o município em questão, nos meses monitorados.

Relação entre a geração de resíduos domiciliares e consumo de água tratada

A Figura 5 traz o indicador que reporta a razão entre a quantidade de resíduos domiciliares coletados nas rotas, ao longo dos meses monitorados, e o consumo de água tratada nos domicílios integrantes a R1, R2 e R3, além do resultado comparativo apresentado também para o município pelo teste estatístico de *Kruskal-Wallis*.

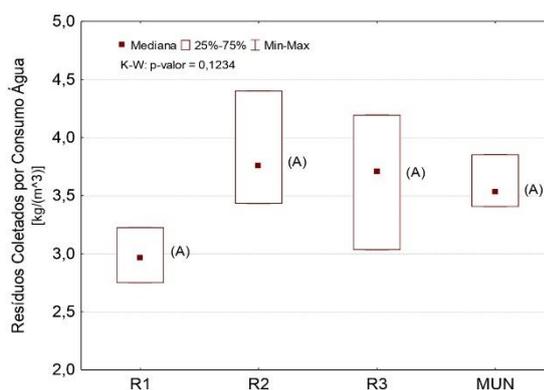


Figura 5 - Resíduos coletados por consumo de água para as rotas (R1, R2 e R3) e para o município. Fonte: Autores.

O teste estatístico de comparações múltiplas não evidenciou diferenças significativas entre os valores do indicador obtidos entre as rotas e o município, a 95% de confiança, não sendo possível descartar a hipótese nula (H_0). O valor reportado para o município, igual a cerca de $3,5 \text{ kg/m}^3$ encontra-se superior aos valores reportados por D'Ella (2000) em estudo conduzido em município de pequeno porte, no estado de São Paulo, com valores que variaram de 1,88 a $2,18 \text{ kg}$ de resíduos por m^3 de água consumidos. Leite (2006), apontou um valor igual a $2,01 \text{ kg/m}^3$ para um estudo também em município do mesmo estado. A diferença entre o porte dos municípios, particularidades regionais e locais, além do tempo decorrido desde a aferição desses últimos valores podem ter determinado a diferença observada.

A literatura correlata tem demonstrado, em diferentes cenários (Santos, Leite & Schalch, 2020; Faria, 2012; Onofre, 2011), evidências de uma correlação linear positiva entre a geração de resíduos sólidos e o consumo de água. Isto é, à medida que o consumo de água aumenta, a quantidade de resíduos sólidos domiciliares também tende a crescer.

A Figura 6 traz o resultado da análise de correlação de *Spearman*, apresentado em um gráfico de dispersão, com dados da geração de RSD e o consumo de água para os dados coletados nas rotas do município objeto do estudo.

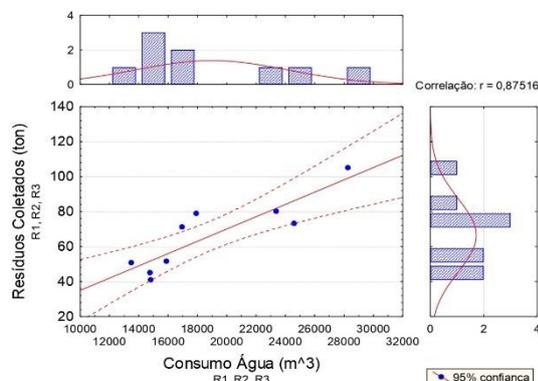


Figura 6 - Resíduos coletados mensalmente nas rotas consideradas em função do consumo de água.
Fonte: Autores.

O estudo estatístico realizado revelou uma relação positiva, significativa a 95% de confiança, entre a geração de RSD e o consumo de água, com um coeficiente de correlação $r = 0,875$. Esse valor indica uma correlação forte entre as variáveis, sugerindo que, à medida que o consumo de água aumenta, a geração de RSD também tende a aumentar de forma consistente, indicando que a quantificação indireta como método variável e proporcional de tarifação dos serviços de manejo de resíduos sólidos nesse contexto, apresenta-se como uma alternativa viável.

Segundo a NR1 (ANA, 2021), a arrecadação das tarifas ou taxas deve cobrir integralmente os custos dos serviços de manejo de resíduos sólidos, garantindo a sustentabilidade econômico-financeira do serviço, representada pela receita requerida. A cobrança pode ser baseada em parâmetros como consumo de água, área do imóvel, peso dos resíduos coletados ou frequência de coleta, em consonância com o que preconiza a Lei Federal 14.026 (Brasil, 2020). Medir a quantidade exata de resíduos por usuário torna-se desafiador, considerando que, enquanto o serviço público de manejo de resíduos sólidos domiciliares é serviço divisível, o serviço público de limpeza urbana é indivisível (Jordão, 2024). Dessa forma, integrar a cobrança a um sistema já estabelecido, como o sistema de abastecimento de água, pode ser uma estratégia eficiente, por aproveitar de uma base cadastral consolidada e abrangente, reduzindo a inadimplência (ANA, 2021).

Cobrança pela prestação do serviço de manejo de resíduos sólidos domiciliares e autossuficiência financeira

Com base nos critérios de rateio e de posse do valor das despesas disponibilizadas no QDD do município segundo a Lei Municipal nº 6.546/2022 (Prefeitura Municipal, 2022), foi possível calcular a receita requerida para o setor de limpeza urbana relacionado aos serviços de manejo de RSU (Tabela 4).

Tabela 4 - Despesas relacionadas aos serviços de manejo de resíduos domiciliares.

| DESCRIÇÃO DO SETOR | CUSTO DESCRITO NO QDD (ARIS-ZM, 2022) | % RATEIO | VALOR DA DESPESA |
|---|--|----------|--------------------------|
| Manutenção da coleta seletiva | R\$ 200.000,00 | 100,0 | R\$ 200.000,00 |
| Capina roçagem, variação dos logradouros públicos e coleta de lixo domiciliar, comercial e industrial | R\$ 2.100.000,00 | 66,7 | R\$ 1.400.070,00 |
| Operar o aterro sanitário | R\$ 2.090.202,17 | 100,0 | R\$ 2.090.202,17 |
| Adquirir uniformes e EPIs | R\$ 100.000,00 | 51,0 | R\$ 51.040,00 |
| Pagamento pessoal, adicional e encargos sociais | R\$ 11.050.100,00 | 51,0 | R\$ 5.636.971,04 |
| Manutenção sistema de limpeza urbana | R\$ 3.769.900,00 | 66,7 | R\$ 2.513.392,33 |
| Incentivos à associação de catadores de lixo | R\$ 10.000,00 | 100,0 | R\$ 10.000,00 |
| Ampliação/reforma do aterro sanitário | R\$ 1.309.800,00 | 100,0 | R\$ 1.309.800,00 |
| Aquisição de veículos leves, pesados, máquinas e equipamentos | R\$ 300.000,00 | 66,7 | R\$ 200.010,00 |
| Pagamento cartão alimentação | R\$ 350.000,00 | 51,0 | R\$ 178.640,00 |
| Fração do custo da administração | | | R\$ 2.906.049,64 |
| RECEITA REQUERIDA (RR) | | | R\$ 16.496.175,18 |

Fonte: Autores.

Dessa forma, considerando a mediana do volume de água levantado nos meses de estudo, foi calculado o volume de água total para o ano de 2023, igual a 5.998.560 m³, o valor unitário com base no consumo de água (VU_a), calculado segundo a Eq. 1, foi de R\$ 2,7505. O resultado detalhado das *TMRS* calculadas, como proposta de revisão tarifária, e o número de economias relativas para cada tipo de consumo pode ser consultado em **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

No estudo econômico da ARIS-ZM (2022) foi feito o cálculo do valor unitário da *RR* com base no consumo de água (R\$ 2,3087). Na Tabela 5 é apresentado o resumo comparativo da receita arrecadada com base no que foi calculado nesse estudo (CALCULADO), segundo a aplicação na íntegra da metodologia estabelecida pela ANA (2021), e o cálculo reportado para o município (ARIS-ZM, 2022).

Tabela 5 - Receita arrecadada com a tarifa por categoria do imóvel.

| | CALCULADO | | MUNICÍPIO | | Δ (%) |
|----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|
| RESIDENCIAL SOCIAL | R\$ | 92.638,70 | R\$ | 68.618,26 | 35% |
| RESIDENCIAL NORMAL | R\$ | 14.377.683,86 | R\$ | 12.460.366,96 | 15% |
| COMERCIAL/SERVIÇOS | R\$ | 1.876.815,83 | R\$ | 1.380.838,55 | 36% |
| INDUSTRIAL | R\$ | 21.331,95 | R\$ | 14.681,95 | 45% |
| PÚBLICA/FILANTRÓPICA | R\$ | 224.610,98 | R\$ | 92.798,66 | 142% |
| TOTAL | R\$ | 16.593.081,32 | R\$ | 14.017.304,37 | 18% |

Fonte: Autores.

No Manual Orientativo sobre a Norma de Referência nº 1/ANA/2021 é reportado que, para que haja a sustentabilidade econômico-financeira é necessária a cobrança, a arrecadação e a efetiva disponibilização ao prestador de serviço de recursos financeiros, de modo que estes sejam suficientes para fazer frente aos custos eficientes de operação e de manutenção (OPEX), de investimentos prudentes e necessários (CAPEX), assim como a remuneração adequada do capital investido para a prestação adequada dos serviços de manejo de resíduos no longo prazo, designado como receita requerida (ANA, 2021).

Além disso, o Manual Orientativo supracitado ratifica que os serviços de manejo de RSD englobam as etapas de coleta, transporte, triagem, tratamento e destinação, além dos serviços de limpeza pública, que incluem as etapas de varrição, capina, poda e limpeza de áreas públicas. Os serviços de limpeza pública não podem ser tarifados diretamente devido à sua característica de indivisibilidade (Jordão, 2024).

No cálculo apresentado para o município (ARIS-ZM, 2022), foi considerado que a correlação entre consumo de água e resíduos torna-se ligeiramente decrescente a partir de determinados níveis de consumo de água, geralmente a partir de 50m³, sendo uma adaptação da metodologia proposta pela ANA (2021). Dessa forma, foram definidos limites superiores para os níveis de consumo, de forma que a incidência do multiplicador *FFC* fosse neutralizado a partir desses valores limites definidos por categoria. Dessa forma, o resultado da receita arrecadada reportada pelo município determinou uma autossuficiência financeira de 84,97%.

Com base na receita arrecadada calculada no presente estudo, a autossuficiência financeira do serviço de manejo de resíduos domiciliares passaria para 100,59%, com um aumento de R\$2.575.776,95 (+18%) no valor arrecadado para o município, o que representaria um incremento de custos significativo para as economias, principalmente públicas e filantrópicas. Essa alternativa metodológica de estabelecimento de tarifas proposto pela ANA (2021), capta a fraca correlação entre renda e consumo de água existente nas faixas iniciais da categoria residencial e mantém a diferenciação por categoria de uso do imóvel. Entretanto, acrescenta o critério de progressividade do valor unitário da tarifa ou taxa, conforme aumenta a faixa de consumo, assumindo a provável correlação positiva entre renda e geração de resíduos domiciliares, para a categoria residencial, e entre o potencial de geração de resíduos e o consumo de água, para as demais categorias. Quando aplicada na íntegra, a metodologia apresentou-se economicamente viável em favor da autossuficiência financeira do município em questão.

Conforme estudo de Brumatti, Chaves e Siman (2024), um dos principais aspectos para se alcançar um eficiente gerenciamento de RSU é a questão ligada à sustentabilidade financeira. Para Santos, Leite e Schalch (2020), além de gerar receita, a cobrança pode ter um efeito educativo. O estudo de Brumatti, Chaves e Siman (2024) destaca, ainda, que a dificuldade financeira das cidades é um dos principais

obstáculos para o gerenciamento adequado dos resíduos. Problemas como orçamentos inadequados, fluxo de caixa desequilibrado, tarifas desatualizadas, arrecadação insuficiente e falta de linhas de crédito contribuem para a inviabilidade das mudanças necessárias para alcançar a sustentabilidade financeira (Leal Filho et al., 2016).

Conclusões

Apesar de tratar de uma demanda legal estabelecida de longa data e ratificada por instrumentos recentes, a cobrança pela prestação de serviços de manejo de resíduos apresenta-se, literalmente, como um tema muito caro para a gestão pública municipal; além de desafiadora, pelas diversas nuances que a perpassam, inclusive, políticas e sociais. A análise quantitativa da cobrança pela prestação de serviços de manejo de RSD em um município de médio porte, com base no consumo de água, revelou uma forte correlação, significativa, entre esses dois indicadores, com um $r = 0,875$. Nesse sentido, à medida que o consumo de água aumenta, a quantidade de resíduos sólidos domiciliares também tende a crescer, com uma razão reportada igual a $3,5 \text{ kg/m}^3$.

A autossuficiência financeira dos municípios, estabelecida por lei, é fundamental para garantir a qualidade e a continuidade dos serviços públicos de manejo de RSD. A cobrança pela prestação desses serviços desempenha um papel crucial na viabilidade financeira das operações de coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos.

Os resultados obtidos utilizando na íntegra a formulação de cálculo da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) indicam que a autossuficiência financeira do manejo de RSD pode ser alcançada ($\approx 100\%$) através da cobrança indireta, proporcional ao consumo de água, levando em consideração as diferentes categorias tarifárias. Além disso, essa metodologia de cobrança pode ser uma ferramenta eficaz para incentivar a redução da geração de resíduos e promover a sustentabilidade ambiental.

Ao correlacionar a tarifa de resíduos ao consumo de água, os municípios podem promover a responsabilidade ambiental e a justiça social, garantindo que os custos sejam distribuídos de maneira equitativa entre os usuários. Essa abordagem contribui para a autossuficiência financeira, permitindo que os municípios invistam na melhoria contínua dos serviços e na implementação de tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

No entanto, a implementação dessa abordagem requer um planejamento cuidadoso, levando em consideração as peculiaridades socioeconômicas do município, além da necessidade de campanhas educativas e de conscientização para a população. A colaboração entre as autoridades municipais, as empresas de saneamento e a sociedade civil é fundamental para o sucesso dessa iniciativa, destacando-se a importância do monitoramento contínuo de indicadores que possam aferir uma possível relação entre a geração de resíduos e o consumo de água, e reflitam as especificidades dos municípios, bem como o dinamismo dos mesmos. Por fim, a cobrança indireta dos serviços de manejo de resíduos pode ser uma estratégia eficiente para a gestão ambientalmente adequada e planejamento urbano, promovendo a sustentabilidade e a responsabilidade compartilhada entre os diferentes atores.

Referências

- ANA, Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (2021). *Manual orientativo sobre a norma de referência N° 1/ANA/2021: Cobrança pela prestação do serviço público de manejo de resíduos sólidos urbanos*. Brasília, DF. Recuperado de <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/normativos-publicados-pela-ana-para-o-saneamento-basico/normativos-referentes-aos-servicos-de-limpeza-urbana-e-manejo-de-residuos-solidos-urbanos>.
- Alzamora, B. R., & Barros, R. T. V. (2020). Review of municipal waste management charging methods in different countries. *Waste Management*, 115, 47-55. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.020>
- Alzamora, B. R., Barros, R. T. V., Oliveira, L. K., Gonçalves, S. S. (2022). Forecasting and the influence of socioeconomic factors on municipal solid waste generation: A literature review. *Environmental Development*, 44, 100734. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100734>

- ARIS-ZM. (2022). *Parecer Técnico DAF/ARIS-ZM Nº 003/2023 - Estudo Econômico Muriae - SMRS-1 (Parecer técnico)*. Agência Reguladora Intermunicipal dos Serviços de Saneamento da Zona da Mata de Minas Gerais, Minas Gerais. Recuperado de https://arizsm.mg.gov.br/wp-content/uploads/2023/03/Parecer_Tecnico_DAF_ARIS-ZM_no-003-2023_-_Estudo_Economico_Muriae_SMRS-1.pdf.
- Barros, R. T. V. (2012). *Elementos de gestão de resíduos sólidos*. Tessitura. Belo Horizonte, MG, Brasil. 424 p.
- Beserra, L. B. S., Seixas, M. G., Fagundes, G. S., & Júnior, G. B. A. (2006). Estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares a partir do consumo de água. *In Anais do VIII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Fortaleza, CE: ABES.
- Brasil (2000). *Lei Complementar nº 101, de 4 de maio de 2000*. Estabelece normas de finanças públicas voltadas para a responsabilidade na gestão fiscal e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Brasil (2007). *Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007*. Institui a Política Nacional de Saneamento Básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Brasil (2010). *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Brasil (2020). *Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020*. Atualiza o marco legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Brumatti, D. V., Chaves, G. de L. D., & Siman, R. R. (2024). Barreiras que afetam a sustentabilidade financeira de sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. *Urbe. Revista Brasileira De Gestão Urbana*, 16, e20230020. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/2175-3369.016.e20230020>.
- Campos, H. K. T. (2012). Renda e evolução da geração *per capita* de resíduos sólidos no Brasil. *Revista Engenharia Ambiental e Sanitária*, 17(2), 171-180. Recuperado de
- D'Ella, D.M.C. (2000). Relação entre utilização de água e geração de resíduos sólidos domiciliares. *Revista Saneamento Ambiental*, 65, 38-41.
- Dornelas, J. M., Guimarães, E. C. (2023). Resíduos Sólidos Urbanos em Uberlândia-MG: Análise Temporal. *Geosul*, 38(45), 109-131. Florianópolis, SC, Brasil. Recuperado de <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/86931/52845>.
- Dutra, R. M. S., Coimbra, T. C., Nascimento, R. M., Catto, J. A., & Siman, R. R. (2018). Avaliação de metodologias de cobrança para o gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos para municípios brasileiros. *In Anais do XIV Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Foz do Iguaçu, PR. Recuperado de <https://lagesa.ufes.br/sites/lagesa.ufes.br/files/field/anexo/III-097.pdf>
- Faria, A. P. M. (2012). *Geração de resíduos sólidos urbanos e consumo de água* (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Recuperado de <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/8c601e6d-b720-493c-98bd-cf89e3b039ec/content>.
- Franco, D., Castilhos Junior, A. B. de., & Souza, K. da S. de. (2014). Estudo da relação entre a geração de resíduos sólidos domiciliares e o consumo de água e energia elétrica: alternativas de tarifação da coleta de resíduos sólidos. *Revista Brasileira De Gestão E Desenvolvimento Regional*, 10(4). Recuperado de <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/1538>.
- Gibbons, J.D.; Chakraborti, S. (2014). *Nonparametric Statistical Inference: Revised and Expanded*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Cidades e Estados: Muriaé, MG*. Recuperado de <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/muriae.html>
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)/USP-CEMPRE (2000). *Manual de gerenciamento integrado – lixo municipal*. 2ª ed. 370p. São Paulo, SP, Brasil.
- Jordão, T. R., (2024) A divisibilidade ou a indivisibilidade de serviços públicos é relevante para decidir sobre o uso de tarifas em concessões? *Revista Jurídica Profissional*, 3(1), 6-19. Recuperado de <https://periodicos.fgv.br/rjp/article/view/90469/85962>

- Leal Filho, W., Brandli, L., Moora, H. Kruopiene, J., Stenmarck, A. (2016). Benchmarking approaches and methods in the field of urban waste management. *Journal of Cleaner Production*, 112,4377-4386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.065>.
- Leite, M. F. (2006). *A taxa de coleta de resíduos sólidos domiciliares*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Mannarino, C. F., Ferreira, J. A. & Gandolla, J. (2016). Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Européia. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(2), 379-385. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016146475>
- Merelles, L. R. O., Silva, C. O., Luz, M. P., Menezes, J. E., Dias, V. S. (2019). Previsão de geração de resíduos sólidos para o aterro de Aparecida de Goiânia (GO) por séries temporais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24(3), 537-546. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/esa/a/GVcxLZK3b58GHjSLjXS7TqD/?format=pdf>.
- Monteiro, A. A., Bezerra, J. P., Silva, J. L. A., Barbosa Filho, C. M., & Leite, J. M. B. (2019). Análise da correlação entre indicadores de geração de resíduos sólidos domiciliares e consumo de água tratada e energia elétrica no estado do Ceará. In Anais do 10º Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental (pp. 1-10). IBEAS, plano
- Onofre, F. L. (2011). *Estimativa da Geração de Resíduos Sólidos Domiciliares* (Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Recuperado de <http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/5448/1/arquivototal.pdf>.
- Pisani Jr., R., Castro, M. C., A. A., Costa, A. A. (2018). Desenvolvimento de correlação para estimativa da taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: influências da população, renda per capita e consumo de energia elétrica. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23(2), 415-424. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018167380>
- Prefeitura Municipal. (2021). *Revisão da Lei de Uso e Ocupação do Solo, do Código de Obras, do Código de Posturas e Lei de Parcelamento do Solo no Município de Muriaé- MG*. Recuperado de <https://muriae.mg.gov.br/planodiretor/>.
- Prefeitura Municipal. (2022). *Lei nº 6.546/2022*. Dispõe sobre o Orçamento Anual do Município de Muriaé para o exercício financeiro de 2023. Muriaé, MG, Brasil. Recuperado de <https://muriae.mg.gov.br/wp-content/uploads/2022/12/Lei-6.546-22-LOA-2023.pdf>.
- Prefeitura Municipal. (2023). *Decreto nº 11.652, de 11 de janeiro de 2023*. Aplica para o exercício 2023 o índice de reajuste previsto no §3º do art. 208 da Lei Complementar nº 3.195, de 27 dezembro de 2005 - Código Tributário do Município de Muriaé (CTM), sobre a Planta de Valores Genéricos e Tabela de Preços de Construção.. Recuperado de <https://www.diariomunicipal.com.br/amm-mg/materia/B76257A3/7c496ad37b64ee18d79c0040b93be93e7c496ad37b64ee18d79c0040b93be93e>.
- Prefeitura Municipal & DRZ Geotecnologia e Consultoria Ltda. (2023). *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Produto 7 - Versão Final do PMGIRS*. Muriaé, MG. 362 p. Recuperado de: <https://www.demsur.com.br/pagina/100/plano-municipal-de-gestao>.
- Santos, W. J., Leite, W. C. A., Schalch, V. (2020). A sustentabilidade econômico-financeira da gestão de resíduos sólidos domiciliares, em um município de porte médio do interior do estado de São Paulo. *Brazilian Journal of Development*, 6(4). Recuperado de <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/8592>.
- Sasao, T., Jaeger, S. D., Weedt, L. D. (2021). Does weight-based pricing for municipal waste collection contribute to waste reduction? A Dynamic panel analysis in Flanders. *Waste Management*, 128(1), 132-141. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.056>
- Sena, L. G., Calixto, L. M., Galavote, T., Chaves, G. L. D., & Siman, R. R. (2023). Gestão de resíduos domiciliares: Uma análise sistêmica sob a ótica da sustentabilidade financeira de municípios e rendimentos de catadores de materiais recicláveis no Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 15, e20220212. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/2175-3369.015.e20220212>
- Sheskin, D. J. (2011) *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, v.1-1928. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.

Slavík, J., Pavel, J., Arltová, M. (2020). Variable charges and municipal Budget balance: Communicating vessels of the waste management. *Journal of Environmental Management*, 257(1), 109976. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109976>

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2023a). *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos*. Brasília, DF: Ministério das Cidades. Recuperado de: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Snis/RESIDUOS_SOLIDOS/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2023_ATUALIZADO.pdf.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2023b). *Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto*. Brasília, DF: Ministério das Cidades. Recuperado de: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf.

Sperlin, M. V., Verbyla M. E., Oliveira, S. M. A. C. (2020). Assessment of treatment plant performance and water quality data: A guide for students, researchers and practitioners. IWA Publishing, Alliance House, London.

Teixeira, C. A., Avelino, C., Ferreira, F., Bentes, I. (2014). Statistical analysis in MSW collection performance assessment. *Waste Management*, 34(9), 1584-1594. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.007>