

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CAMPUS MACAÉ
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MAÍRA MORAES DUARTE

**OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
DOMICILIARES A PARTIR DO ROTEAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE UMA
ESTAÇÃO DE TRANSBORDO E TRIAGEM: O CASO DE CARAPEBUS-RJ**

Macaé
2020

MAÍRA MORAES DUARTE

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
DOMICILIARES A PARTIR DO ROTEAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO
DE TRANSBORDO E TRIAGEM: O CASO DE CARAPEBUS-RJ

Trabalho de Conclusão de Curso de
graduação submetida à Universidade
Federal do Rio de Janeiro – Campus
Macaé como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Conrado Vidotte Plaza

Macaé

2020

MAÍRA MORAES DUARTE

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
DOMICILIARES A PARTIR DO ROTEAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE UMA
ESTAÇÃO DE TRANSBORDO E TRIAGEM: O CASO DE CARAPEBUS - RJ

Trabalho de Conclusão de Curso de
graduação submetida à Universidade
Federal do Rio de Janeiro – Campus
Macaé como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em Macaé, 20 de agosto de 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Conrado Vidotte Plaza, MSc.

Profa. Beatriz Rohden Becker, MSc.

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, PhD.

DD812o Duarte, Maira Moraes
Otimização de um sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares a partir de roteirização e implantação de uma estação de transbordo e triagem: o caso de Carapebus-RJ / Maira Moraes Duarte. -- Rio de Janeiro, 2020.
102 f.

Orientador: Conrado Vidotte Plaza.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé Professor Aloísio Teixeira, Bacharel em Engenharia Civil, 2020.

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Gerenciamento de Resíduos. 3. Sistemas de Informações Geográficas para Transporte. 4. Coleta Seletiva. I. Plaza, Conrado Vidotte, orient. II. Título.

Dedico este trabalho a minha amada vó,
Maria da Graça de Moraes Lima, por não
medir esforços para ver meu sonho
realizado. Por tudo que a Senhora é, fez e
faz por mim, meu muito obrigada!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por ter me sustentado e capacitado durante todo esse tempo.

A minha mãe, minha irmã, e meus avós, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao meu amado esposo, por ser meu porto seguro, meu lugar de descanso e aconchego.

Ao meu professor Conrado Vidotte Plaza, pela confiança, dedicação, amizade e orientação.

Aos amigos que fiz no caminho, que deixaram um pouco de si comigo, que trouxeram leveza, risadas e doses de ânimo nos momentos mais difíceis.

A toda a equipe envolvida na elaboração do PMSB de Carapebus, que compartilharam, apoiaram e trocaram conhecimento. Vocês foram fundamentais para meu crescimento profissional.

A Universidade Federal do Rio de Janeiro –Campus Macaé, juntamente com seu corpo docente e coordenadores, por todo aprendizado a mim direcionado, que foram cruciais para minha formação.

E, ao meu querido cão, Baruc, pela fidelidade e companhia diária enquanto fazia este trabalho.

A todos vocês, minha gratidão eterna.

RESUMO

O crescimento populacional nos centros urbanos, a quantidade de resíduos gerados pelas atividades humanas, aliada à escassez de locais apropriados para o descarte de resíduos sólidos urbanos, juntamente com o aumento nas distâncias percorridas para a disposição final têm se apresentado como um dos grandes desafios a serem enfrentados pelas administrações municipais e por toda a comunidade geradora de resíduos. Diante deste cenário, este trabalho teve como objetivo estudar e elaborar propostas de otimização para o sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares do município de Carapebus - RJ, de forma a diminuir os custos relacionados ao transporte e avaliar os benefícios da implantação de uma Estação de Transferência e Triagem na logística da coleta e para a implementação da coleta seletiva. Para isso, utilizou-se de uma metodologia composta por três etapas: i) levantamento de dados; ii) elaboração dos cenários e; iii) modelagem e avaliação dos cenários. A modelagem e simulação foram realizadas através de um software SIG-T, que permitiu modelar cenários e gerar simulações capazes de determinar rotas ótimas, segundo restrições impostas, para o sistema de coleta em estudo. A análise dos resultados obtidos, quando comparados ao sistema atual (Cenário 0), indicou melhora nos índices para todos os cenários modelados. Porém, as maiores reduções, tanto na quilometragem quanto nas emissões de CO₂, ocorreram nos cenários no qual foi alterado o sistema de coleta porta-a-porta para o sistema contendo os Pontos de Entrega Voluntária - PEVs e implantado a Estação de Transferência e Triagem - ETT, alcançando uma redução de até 53,7 % desses indicadores. Já a avaliação da coleta seletiva (Cenário 2B), para o modelo mais otimista, indicou uma redução de 154,4t mensais de resíduos encaminhados para a disposição final em aterros sanitários. Assim, em termos gerais, pode-se constatar que os principais problemas logísticos existentes no caso de Carapebus são consequência direta das longas distâncias percorridas até o aterro sanitário e da má estruturação da coleta como um todo. Portanto, espera-se que este estudo possa contribuir para a gestão dos RSU nos municípios e evidenciar a aplicabilidade de ferramentas computacionais para o planejamento logístico da coleta de resíduos sólidos urbanos.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos, Gerenciamento de Resíduos, Sistemas de Informações Geográficas para Transporte, Coleta Seletiva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O processo dos resíduos sólidos e suas inter-relações.	23
Figura 2. Contentor móvel em PEAD de 120l.	27
Figura 3. Contentor metálico de 1600l.	27
Figura 4. Coletores urbanos do município de Paulínia, SP.	28
Figura 5. Veículo coletor do tipo Baú ou Prefeitura	35
Figura 6. Veículos coletores compactadores.	35
Figura 7. Caminhão roll on roll off.	38
Figura 8. Representação de um grafo.	43
Figura 9. Grafos (a) Orientado (b) Não Orientado.	43
Figura 10. Representação de rede viária em forma de grafo.	44
Figura 11. Representação do espaço real na forma de rede.	44
Figura 12. Estado do Rio de Janeiro com destaque ao município de Carapebus e seus vizinhos.	48
Figura 13. Recipientes para acondicionamento dos resíduos domésticos no município de Carapebus/RJ.	50
Figura 14. Caminhões coletores com resíduo na garagem da Secretaria de Transporte e Serviços Públicos após término da coleta.	51
Figura 15. Percurso entre o município de Carapebus e o Aterro MRT pela RJ-182.	52
Figura 16. Percurso entre o município de Carapebus e o Aterro MRT passando pela RJ-182 e RJ-190.	52
Figura 17. Densidade demográfica por região administrativa no município de Carapebus-RJ.	55
Figura 18. Sistema Viário Georreferenciado do Município de Carapebus, RJ.	56
Figura 19. Esquema de coleta seletiva com carroceria adaptada.	60
Figura 20. Localização do bota fora em Carapebus.	62
Figura 21. Base de Dados do sistema viário de Carapebus.	64
Figura 22. Mapa Viário de Carapebus com divisões dos bairros.	64
Figura 23. Base de dados dos arquivos geográficos de linha para o modelo de coleta porta-a-porta.	67
Figura 24. Distância mínima entre ponto onde o veículo atingiu capacidade máxima durante a coleta (ponto 1) e o aterro sanitário (ponto 2)	68
Figura 25. Localização dos PEVs utilizando a rotina facility location.	69
Figura 26. Base de dados do arquivo geográfico de pontos que contém informações das paradas e do depósito.	70
Figura 27. Base de dados geográficos da camada de pontos para aplicação da rotina de roteamento por nó.	70
Figura 28. Base de dados do arquivo geográfico de linhas para aplicação da rotina de roteamento por nó.	71
Figura 29. Fluxograma da metodologia.	71
Figura 30. Rota 1, 2 e 3 de segunda-feira separada por cores para o Cenário 0.	73
Figura 31. Rota 1 da coleta noturna nos bairros centro e Ubás para o Cenário 0.	75
Figura 32. Rotas 1, 2 e 3 de terça-feira separadas por cores considerando o Cenário 0.	75
Figura 33. Rota 1 de quarta-feira considerando o Cenário 0.	76
Figura 34. Rota 1, 2 e 3 de quinta-feira para o Cenário 0.	76
Figura 35. Rotas 1,2,3,4 e 5 de sexta-feira considerando o Cenário 0.	77
Figura 36. Rota referente a coleta noturna para o Cenário 1.	78
Figura 37. Rota 1 de segunda, quarta e sexta-feira para o Cenário 1.	79
Figura 38. Rota 2 de sexta-feira para o Cenário 1.	79
Figura 39. Rotas 1 e 2 de terça, quinta e sábado para o Cenário 1.	80

Figura 40. Rota da coleta noturna para o Cenário 2A.	82
Figura 41. Rota 1 de segunda, quarta e sexta-feira para o Cenário 2A.	82
Figura 42. Rota 1 e 2 de terça, quinta e sábado para o cenário 2A.	83
Figura 43. Rota 2 de sexta-feira para o Cenário 2A.	83
Figura 44. Rotas da terça, quinta-feira e sábado para o Cenário 2B, considerando 20% de participação da população aderindo a coleta seletiva.	86
Figura 45. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 40% de participação da população aderindo a coleta seletiva.	86
Figura 46. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 60% de participação da população aderindo a coleta seletiva.	87
Figura 47. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 80% de participação da população aderindo a coleta seletiva.	87
Figura 48. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 100% de participação da população aderindo a coleta seletiva.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos resíduos, segundo sua origem.	19
Tabela 2. Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil.	20
Tabela 3. Estimativa de gravimetria dos resíduos gerados no estado do Rio de Janeiro.	21
Tabela 4. Caracterização dos RSU da cidade de Ji-Paraná/RO por áreas centrais e periféricas. .	22
Tabela 5. Comparativo entre a coleta seletiva e a coleta convencional.	31
Tabela 6. Código de cores dos resíduos sólidos recicláveis.	33
Tabela 7. Cronograma da coleta de resíduos domiciliares em Carapebus.	51
Tabela 8. Número de residências, habitantes e quantidade de resíduo gerado por região administrativa em Carapebus, RJ.	54
Tabela 9. Programação das rotas para o Cenário 1.	58
Tabela 10. Campos a serem preenchidos na base de dados do arquivo geográfico de pontos.	65
Tabela 11. Campos a serem preenchidos na base de dados do arquivo geográfico de linhas.	65
Tabela 12. Resultados da rotina de roteamento em arco para o Cenário 0.	74
Tabela 13. Resultados obtidos após aplicação da rotina de roteamento em arcos para o Cenário 1.	78
Tabela 14. Resultados obtidos após aplicação da rotina de roteamento por nó para o Cenário 2.	81
Tabela 15. Resultados do roteamento para o Cenário 2B.	85
Tabela 16. Resumo dos resultados obtidos para os cenários de simulação.	89
Tabela 17. Total de lixo úmido e reciclável coletados semanalmente considerando o percentual de participação da população na coleta seletiva, de acordo com o Cenário 2B.	90
Tabela 18. Emissões de CO ₂ pelo sistema de coleta de lixo considerando o período de um ano.	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolução do custo da coleta seletiva comparada a coleta convencional no Brasil. ...	30
Gráfico 2. Quilometragem percorrida semanalmente pelo caminhão coletor em cada cenário de simulação.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS

- ETRS- Estação de Transferência de Resíduos Sólidos
- ETT – Estação de Transferência e Triagem
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPEA- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
- MMA- Ministério do Meio Ambiente
- PEAD – Polietileno de alta densidade
- PERS-RJ – Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro
- PEV – Ponto de Entrega Voluntária
- PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico
- PNAD - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD
- PNRS- Plano Nacional de Resíduos Sólidos
- RSD – Resíduos Sólidos Domiciliares
- RSU –Resíduos Sólidos Urbanos
- SIG – Sistema de Informações Geográficas
- SIG-T – Sistemas de Informações Geográficas para Transportes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Motivação.....	16
1.4	Objetivos	16
1.4.1	Objetivos Gerais	16
1.4.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Definição, Classificação e Características dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	18
2.2	Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos e a Coleta Seletiva.....	22
2.2.1	Geração de Resíduos	24
2.2.2	Acondicionamento	25
2.2.3	Coleta dos Resíduos sólidos domiciliares.....	29
2.2.4	Transporte dos Resíduos sólidos domiciliares	34
2.2.5	Disposição Final dos RSU.....	36
2.2.6	Estação de Transferência de resíduos.....	37
2.3	Roteamento de Veículos	40
2.3.1	Teoria dos Grafos	42
2.3.2	Sistemas de Informação Geográfica –SIG	44
2.3.3	Formulação de Problemas para Roteamento de Veículos de Coleta de Lixo	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	Objeto de estudo.....	48
3.2	Levantamento e Coleta de Dados	50
3.2.1	Descrição do Sistema atual de Manejo de RSU.....	50
3.2.2	Geração de RSU.....	53
3.2.1	Sistema Viário.....	55
3.3	Elaboração dos Cenários	56
3.3.1	Cenário 0 – Sistema atual de coleta.....	56
3.3.2	Cenário 1 - Reestruturação das Rotas	57
3.3.3	Cenário 2 - Reformulação do sistema de coleta (ETT e PEVs).....	58
3.3.3.1	Cenário 2A: Implantação de ETT e PEVs.....	59
3.3.3.2	Cenário 2B: Implantação de ETT, PEVs e Coleta Seletiva	59
3.3.3.3	Localização e Capacidade da Estação de Transbordo e Triagem	60
3.4	Avaliação dos cenários: modelagem e simulação.....	62
3.4.1	Preenchimento da Base de dados.....	63

3.4.2	Roteamento em arcos: coleta porta-a-porta	65
3.4.3	Roteamento em nós: coleta por PEVs.....	68
3.5	Síntese da Metodologia	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1	Resultados das rotinas de roteamento	72
4.1.1	Cenário 0 – Sistema Atual de Coleta	72
4.1.2	Cenário 1 – Reestruturação das Rotas	77
4.1.3	Cenário 2 - Reformulação do sistema de coleta (ETT e PEVs).....	80
4.1.3.1	Cenário 2A – Implantação de ETT e PEVs.....	80
4.1.3.2	Cenário 2B - Implantação de ETT, PEVs e Coleta Seletiva	84
4.2	Análise Geral dos Resultados	88
4.3	Implantação da coleta seletiva e redução dos resíduos encaminhados ao aterro sanitário.....	90
4.4	Emissão de CO ₂	91
5	CONCLUSÕES.....	93
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contém uma breve apresentação sobre o tema abordado, indicando a importância de políticas e ações voltadas ao manejo dos resíduos sólidos urbanos. Ao longo desta seção, serão abordados, também, a justificativa, os objetivos e a motivação deste trabalho.

1.1 Contextualização

Os empasses ligados aos recursos básicos para manter uma cidade em funcionamento têm aumentado devido ao rápido crescimento populacional e ao processo de urbanização que ocorreu nas últimas décadas. Um estudo realizado pelo IBGE (2006) mostrou que a população brasileira quase decuplicou entre os anos de 1900 e 2000, passando de 17 milhões para quase 170 milhões. Segundos dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD, no início do século XX, cerca de 52% da população ocupada trabalhava na zona rural. Porém, em 2000, essa proporção caiu para aproximadamente 17%, com 80% da população vivendo na área urbana. Em 2015, ainda de acordo com dados da PNAD, a maior parte da população brasileira, cerca de 85%, vivia em áreas urbanas e o restante em áreas rurais (IBGE, 2018).

Estima-se que a população mundial, hoje de 7,4 bilhões de habitantes, esteja gerando entre 2 a 3 bilhões de toneladas de lixo por ano. Só no Brasil, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU de 2018 à 2019, segundo a ABRELPE (2019), foi de 79 milhões de toneladas, representando um aumento de cerca de 1% em relação ao ano anterior. O crescimento populacional nos centros urbanos, a quantidade de resíduos gerados pelas atividades humanas, aliada à escassez de locais apropriados para o descarte de RSU, juntamente com o aumento nas distâncias percorridas para a disposição final têm se apresentado como um dos grandes desafios a serem enfrentados pelas administrações municipais e por toda a comunidade geradora de resíduos.

Assim, é usual o transporte de resíduos para áreas distantes das concentrações urbanas, uma vez que a maioria das cidades no Brasil não possuem aterro sanitário próprio, devido aos altos preços dos terrenos que necessitam de grandes extensões, às exigências ambientais e à resistência da população em aceitar a implantação próximo de suas residências (IBAM, 2018).

Nesse contexto, o aumento na geração de resíduos e o distanciamento cada vez maior dos locais de disposição final em relação aos centros de geração e coleta tem proporcionado algumas consequências significativas nos sistemas de gerenciamento de resíduos. Pode-se citar, como uma das mais relevantes, o alto custo para transportá-los, proporcional aos longos trajetos percorridos até o aterro sanitário. Por conta disso, a Estação de Transferência de Resíduos Sólidos (ETRS) vem se tornando uma parte integrante dos atuais sistemas de gestão municipal de resíduos sólidos (MEDEIROS, 2013). Trata-se de uma estação instalada próxima ao centro de massa de geração de resíduos, onde se faz a transferência dos volumes coletados por caminhões de menor capacidade para caminhões maiores. Dessa maneira, reduz-se o número de veículos de transporte e a quantidade de viagens.

Portanto, dada a importância do gerenciamento adequado dos RSU este trabalho tem como objetivo o estudo e otimização das rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares e a implantação de uma Estação de Transferência e Triagem - ETT no município de Carapebus - RJ. A implantação da ETT tem a finalidade de promover a separação adequada dos resíduos, permitindo a reciclagem de parte do RSU, diminuindo, conseqüentemente, a quantidade de lixo enviada para o aterro sanitário, podendo trazer tanto ganhos ambientais (redução na emissão de CO₂ e aumento da vida útil de aterros sanitários) quanto econômicos (associados aos custos logísticos).

1.2 Justificativa

O município de Carapebus, localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, enfrenta problemas semelhantes aos de muitas cidades brasileiras. De acordo com dados do IBGE, a população do município cresceu a uma taxa média anual de 4,08% no período de 2000 a 2010, enquanto, no estado, o crescimento para o mesmo período foi de 1,06%.

Com o crescimento populacional, somado à expansão das atividades industriais voltadas ao comércio e prestação de serviços, houve um aumento significativo da geração per capita de resíduos no município, o que elevou os custos com a coleta, transporte e destinação final de RSU. Um dos fatores que contribui para elevar os preços é o trajeto de 37 km percorridos até o aterro sanitário, localizado no município de Santa Maria Madalena - RJ e a falta de coleta seletiva no município.

Diante dessas observações, buscou-se, neste trabalho, realizar um estudo de roteamento para a coleta de resíduos sólidos domiciliares, e avaliar o impacto que uma estação de transferência e triagem teria no município de Carapebus - RJ, no sentido de redução dos custos com transporte e redução da quantidade de resíduos enviados para o aterro sanitário.

1.3 Motivação

A motivação teve início com a oportunidade de participar da elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do município de Carapebus – RJ, a partir de um Acordo de Cooperação Técnica com a AGEVAP e a UFRJ-Macaé em 2018.

Com o objetivo de se adequar às diretrizes nacionais de Saneamento Básico impostas pela Lei 11.445/2007, o PMSB de Carapebus, ainda em elaboração, irá contemplar programas e ações de curto, médio e longo prazo para os quatro eixos do saneamento: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos e drenagem e manejo de águas pluviais.

Foi, neste contexto, que se motivou a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso, com a intenção de contribuir com as propostas do PMSB de Carapebus e auxiliar os gestores no planejamento e tomada de decisão acerca do manejo dos Resíduos Sólidos do município.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar e elaborar propostas de otimização para o sistema de coleta de RSD do município de Carapebus - RJ, de forma a diminuir os custos relacionados ao transporte e avaliar os benefícios da implantação de uma Estação de Transferência e Triagem na logística da coleta e para a implementação da coleta seletiva.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Levantamento bibliográfico acerca dos conceitos que embasam o gerenciamento de resíduos sólidos em cidades brasileiras e roteamento de veículos;

- Propor alternativas ao sistema atual de coleta de resíduos domiciliares, através da elaboração de cenários de avaliação, e verificação de seus impactos a partir da modelagem e simulação em um SIG-T;
- Avaliar o impacto da implantação de coleta seletiva e criação de uma estação de transbordo e triagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o arcabouço teórico construído a partir do levantamento bibliográfico. São apresentados os conceitos que definem os resíduos sólidos urbanos, o gerenciamento dos resíduos e o roteamento de veículos.

2.1 Definição, Classificação e Características dos Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos, conhecidos vulgarmente por “lixo”, podem ser constituídos de uma mistura de resíduos produzidos nas residências, comércio e serviços e nas atividades públicas, na preparação de alimentos, na varrição de logradouros até resíduos especiais, provenientes de processos industriais e de atividades médico-hospitalares (BRAGA et al.,2005, p. 147).

Alguns autores afirmam que a palavra lixo vem do latim *lix*, que significa cinza, vinculada às cinzas dos fogões. Antigamente, na Europa, a maioria dos resíduos domésticos vinham do fogão e da lareira, eram restos de comida, de lenha, carvão e cinzas. Os restos dos alimentos eram utilizados para ração animal ou dispostos em hortas e pomares, já as cinzas eram aproveitadas para fabricar sabão. (SILVA et al., 2015)

De acordo com a NBR 10.004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004, p.01), resíduos sólidos podem ser definidos como:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Segundo Deluqui (1998 apud Souza, 2009), os resíduos sólidos podem ser classificados de várias formas, tais como o local de produção, a natureza física dos resíduos (seco ou molhado), a composição química (matéria orgânica ou inorgânica) e o grau de biodegradabilidade (facilmente, moderadamente e não biodegradáveis).

Para classificar os resíduos considerando aspectos práticos e de natureza técnica ligados principalmente aos riscos potenciais ao meio ambiente, a NBR 10.004:2004 distingue-os em duas classes: Classe I (ou Perigosos) e Classe II (ou Não Perigosos), sendo esta ainda subdividida em Classe II A (ou Não Inertes) e Classe II B (ou Inertes).

Tchobanoglous *et al.* (1993 apud Castro, 2006) estudou e propôs uma classificação mais detalhada dos resíduos sólidos segundo sua origem, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos resíduos, segundo sua origem.

Origem	Unidades típicas, atividades ou localização onde os resíduos são gerados	Tipos de resíduos Sólidos
Residência	Família simples, várias famílias em residências independentes e apartamentos	Resíduos de alimentos, papel, papelão, plásticos, tecidos, couros, resíduos de jardinagem e poda, madeira, vidro, latas, cinzas, resíduos de varrição, resíduos especiais (itens volumosos, artigos eletrônicos, baterias, pneus e óleos), resíduos sólidos perigosos.
Comércio	Lojas, restaurantes, mercados, escritórios, hotéis, motéis, lojas de impressão, serviços mecânicos, etc.	Papel, papelão, plásticos, madeira, resíduos de alimentos, vidro, metal, resíduos especiais, resíduos perigosos, etc.
Instituições	Escolar, hospital, prisões, centros governamentais.	Papel, papelão, plásticos, madeira, resíduos de alimentos, vidro, metal, resíduos especiais, resíduos perigosos, etc.
Construção e Demolição	Áreas de novas construções, recuperação/renovação de estradas, entulhos de pavimentação.	Madeira, aço, concreto, poeira, etc.
Serviços Municipais (exceto unidades de tratamento)	Varrição, limpeza de boca de lobo, parques e praias, outras áreas de recreação.	Resíduos especiais, refugos de varrição, podas de árvores e de parques em geral, praias e áreas de recreação.
Unidades de tratamento; incineradores municipais	Processos de tratamento de água, efluentes e resíduos industriais.	Resíduos das unidades de tratamento, principalmente compostos por lodos residuais.
Município	Todos os citados anteriormente.	Todos os citados anteriormente.
Indústria	Construção, fabricação, indústrias pesadas e leves, refinarias, unidades geradoras de energia, demolições, etc.	Resíduos de processo industrial, sucata, etc. Resíduos não industriais, incluindo alimentos, refugos, cinzas, resíduos de demolição e construção, resíduos especiais, resíduos perigosos.
Agricultura	Colheita, pomares, videiras, leiteiras, fazendas, etc.	Resíduos de alimentos estragados, resíduos de agricultura, refugos, resíduos perigosos.

Fonte: Tchobanoglous et al. (1993 apud Castro, 2006).

Para Guadagnin (2001) apud Souza (2009), é fundamental identificar e caracterizar os constituintes dos resíduos para determinar a alternativa tecnológica mais adequada desde a etapa de coleta, transporte, reaproveitamento, reciclagem até a destinação final dos rejeitos. No âmbito da composição dos resíduos sólidos (RS), destaca-se o conceito de composição gravimétrica dos resíduos sólidos, que permite avaliar frações recicláveis ou orgânicas, permitindo melhor diagnosticar, respectivamente, frações para comercialização ou produção de composto orgânico.

A Tabela 2 destaca a estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil a partir de uma amostra com 93 municípios brasileiros. A partir deste levantamento, verifica-se que os resíduos sólidos são compostos majoritariamente por matéria orgânica (cerca de 51%), seguido por materiais recicláveis (cerca de 32%). A partir desta análise, pode-se verificar a importância de implantação de uma ETT.

Tabela 2. Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil.

Materiais	Participação %	Quantidade	
		2000 t/dia	2008 t/dia
Material reciclável	31,9	47.558,5	58.527,4
Metais	2,9	4.301,5	5.293,5
Papel, papelão e tetrapak	13,1	19.499,9	23.997,4
Plástico	13,5	29.191,1	24.847,9
Vidro	2,4	3.566,1	4.388,6
Matéria orgânica	51,4	76.634,5	94.309,5
Outros	16,7	24.880,5	30.618,9
Total coletado	100	149.094,3	183.481,5

Fonte: adaptado de IPEA, 2012.

No entanto, cabe ressaltar que a composição dos resíduos sólidos domiciliares pode variar de localidade para localidade. O número de habitantes e seus costumes, poder aquisitivo, nível educacional, condições climáticas e o desenvolvimento local são alguns dos fatores que influenciam em sua composição (LACERDA, 2003).

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (PERS-RJ), elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (2013), apresenta estimativas para a composição

gravimétrica dos resíduos gerados nos municípios do estado do Rio de Janeiro em função da população (pequeno, médio e grande porte), como apresentado na *Tabela 3*. Observa-se, independentemente do porte do município, a presença majoritária de matéria orgânica (de 53% a 56%) e de materiais recicláveis (de 36% a 40%).

Tabela 3. Estimativa de gravimetria dos resíduos gerados no estado do Rio de Janeiro.

Municípios	Matéria Orgânica	Papel, papelão	Plásticos	Vidro	Metais	Outros
Pequeno porte (população até 100.000 habitantes)	56,72%	13,45%	18,63%	2,83%	1,58%	6,79%
Médio porte (população de 100.001 a 1.000.000 habitantes)	53,03%	16,57%	19,69%	2,95%	1,49%	6,27%
Grande porte (população acima de 1.000.001 habitantes)	53,28%	15,99%	19,14%	3,28%	1,57%	6,74%

Fonte: Adaptado de Ministério do Meio Ambiente (2013).

Em outro estudo, Oliveira et al. (2018), a partir de informações coletadas no município de Ji-Paraná – RO, apresentam as composições gravimétricas dos resíduos sólidos originados tanto da coleta convencional nas áreas periféricas quanto das áreas centrais, conforme apresentado na Tabela 4. Para a região central, observa-se maior parte de materiais recicláveis (cerca de 45%, ao considerar plástico, papel, papelão, vidro e metal), seguido de matéria orgânica (42%). Já nas periferias, observa-se dominância de matéria orgânica (49%), seguido dos materiais recicláveis (aproximadamente 35%).

Tabela 4. Caracterização dos RSU da cidade de Ji-Paraná/RO por áreas centrais e periféricas.

Categoria Dos Resíduos	Composição (%)	
	Centros	Periferias
Matéria Orgânica	41,92	49,1
Plástico	21,45	21,47
Papel, Papelão	19,52	8,12
Vidro	2,02	3,61
Metal	2,36	1,4
Couro E Borracha	1,59	1,24
Têxtil	1,06	3,52
Rejeitos	9,14	9,34
Diversos	0,94	2,21

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2018).

Vale destacar a crescente presença de outros materiais na composição dos resíduos sólidos urbanos, dentre estes: trapos, couro, panos, borrachas, pilhas, baterias, celulares, lâmpadas fluorescentes, brinquedos eletrônicos e muitos outros produtos descartáveis. A produção dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) apresenta uma tendência de crescimento mundial. Esses resíduos contêm substâncias perigosas que geram impactos significativos ao meio ambiente quando não tratados adequadamente após o seu uso; e o não aproveitamento de seus resíduos representa também, um desperdício de recursos naturais não renováveis (JACOB & BESEN, 2005)

Ante o apresentado nesta seção, corrobora-se que a composição dos resíduos sólidos domiciliares pode variar de localidade para localidade, em função de fatores como o número de habitantes e seus costumes, poder aquisitivo, nível educacional, condições climáticas e o desenvolvimento local. Verificou-se, ainda, ser fundamental identificar e caracterizar os constituintes dos resíduos sólidos para determinar a alternativa tecnológica mais adequada para as etapas de coleta e tratamento dos rejeitos, como será discutido na próxima seção.

2.2 Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos e a Coleta Seletiva

Philipp Jr e Aguiar (2005 apud Dos Santos Pinto, 2017) afirmam que a urbanização brasileira foi conduzida sem uma infraestrutura adequada para atender toda a demanda populacional crescente, assim como não foi seguida de melhorias dos serviços públicos disponíveis à população. Como resultado, verificou-se o agravamento de

problemas socioambientais, disseminação de doenças e a necessidade de um novo olhar para a gestão de resíduos sólidos.

Diante desse contexto, em 2010, o Brasil vivenciou um grande avanço na gestão dos RSU através da Lei nº 12.305, também conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS. A lei reúne o conjunto de diretrizes e ações a ser adotado com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

O gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos, de acordo com Vilhena (2010 apud Medeiros, 2013), é o conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento que a administração pública municipal desenvolve para coletar, transportar, tratar e dispor os resíduos gerados na cidade. Tais etapas, que envolvem o gerenciamento dos RSU, se tornaram um desafio aos responsáveis pelas tomadas de decisão devido, na maioria das vezes, à falta de recursos financeiros e humanos. Techobanoglous (1977 apud Cunha e Caixeita Filho, 2002) agrupa as atividades ligadas aos resíduos sólidos em seis elementos funcionais, conforme ilustra a Figura 1.

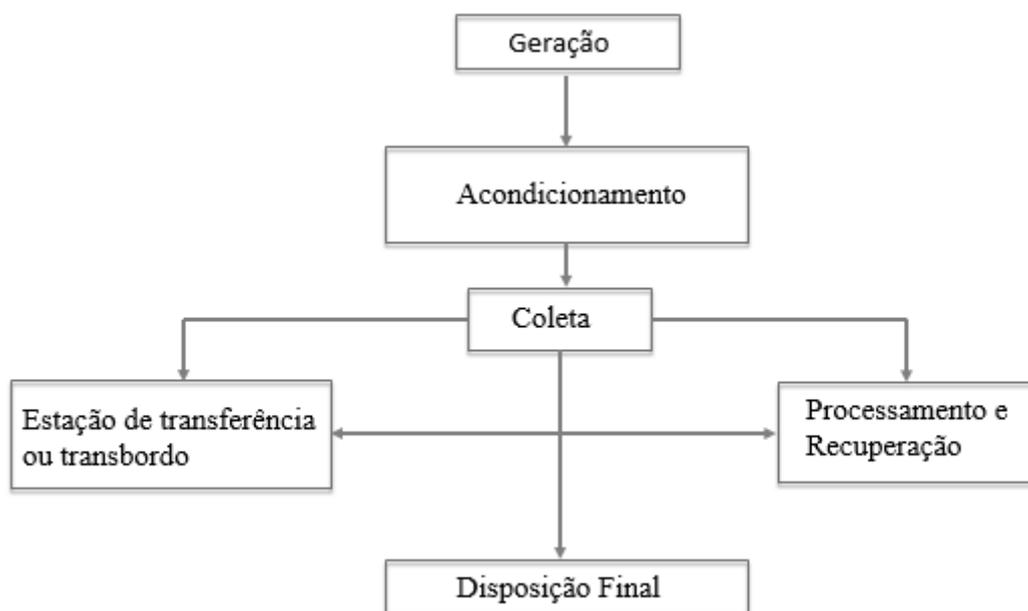


Figura 1. O processo dos resíduos sólidos e suas inter-relações.

Fonte: Adaptado de Techobanoglous (1977 apud Cunha e Caixeta Filho, 2002).

Para o gerenciamento dos RSU é necessário também considerar três conceitos fundamentais: Reduzir, Reutilizar e Reciclar. O conhecimento e prática da política dos 3R's pela população é fundamental para o cumprimento dos objetivos da PNRS. Independente da região, para a utilização dos 3R's é indispensável respeitar a seguinte hierarquização (SALVADOR, 2014):

- Reduzir: redução do lixo gerado por pessoa, através de um consumo mais consciente;
- Reutilizar: reaproveitar, dar uma nova utilidade para algo que normalmente seria jogado fora;
- Reciclar: transformação de um produto que não pode ser mais utilizado em um novo produto ou matéria-prima.

É importante que cada município busque seu próprio modelo de gerenciamento, pois a quantidade e qualidade dos RSU são funções de sua população, economia e grau de urbanização. Quando um município executa ações planejadas, de forma racional e integrada, leva a um gerenciamento adequado do resíduo. Isso assegura saúde, qualidade de vida, economia de recursos públicos e garante uma boa aceitação da administração municipal por parte da população (LACERDA, 2003).

2.2.1 Geração de Resíduos

A primeira etapa do gerenciamento dos RSU é a geração, que tem relação com a quantidade e com o tipo de resíduo produzido pela população. Apesar de se encontrar no início da cadeia, a geração tem um impacto expressivo no sistema, visto que, quanto mais resíduos gerados, maiores serão os volumes a serem coletados, transportados e dispostos. (BRITO, 2006).

A geração de RSU no período de 2018 a 2019, segundo a ABRELPE (2019) foi de 79 milhões de toneladas no país, representando um aumento de cerca de 1% em relação ao ano anterior. Desses, 6,3 milhões não foram nem sequer coletados, tendo consequentemente um destino inapropriado.

Segundo o relatório da WWF (2019), a geração anual de resíduos plásticos pode aumentar 41% nos próximos 15 anos, devido a sua produção acelerada movida pela queda nos custos de produção. A preocupação é que esses resíduos sejam mal administrados e

que virem poluição, visto que um terço dos resíduos plásticos gerados atualmente tornam-se poluição terrestre ou marinha.

O aumento na geração de resíduos tem várias consequências negativas: custos cada vez mais elevados para coleta e tratamento de lixo, dificuldade para encontrar áreas disponíveis para a sua disposição final, além do grande desperdício de matéria prima. Nota-se, portanto, a importância de gerir os resíduos, desacelerar a sua geração e investir em tecnologias que permitam diminuir a geração, além da reutilização e da reciclagem dos materiais em desuso.

2.2.2 Acondicionamento

A etapa de acondicionamento inicia-se logo após a geração dos resíduos sólidos, e representa a primeira etapa no processo de remoção dos resíduos. O acondicionamento nada mais é do que preparar os resíduos sólidos de forma sanitariamente adequada e compatível com o tipo e qualidade dos resíduos (IBAM, 2018 p. 56).

Um acondicionamento adequado dos resíduos evita acidentes e a proliferação de vetores, minimiza o impacto visual e olfativo e ainda facilita a realização da etapa da coleta. No Brasil, é muito comum o uso de sacos plásticos para o acondicionamento domiciliar, mas, em geral, podem ser utilizados diversos tipos de recipientes, como: vasilhas, tambores, sacos de papel, caixotes de madeira ou papelão, contêineres, entre outros (CUNHA & CAIXETA FILHO, 2002).

Os recipientes primários, que ficam em contato direto com o lixo, podem ser sacos plásticos ou recipientes rígidos. De acordo com o IBAM (2018), os sacos plásticos são embalagens consideradas apropriadas quando a coleta é manual, visto:

- A facilidade de serem amarrados e fechados;
- São leves e sem retorno;
- Impedem a absorção de água da chuva;
- Possuem um preço acessível, permitindo sua padronização.

Para Barros (2012 apud Batista, Silva e Silva, 2014), houve uma tendência à adoção dos sacos plásticos para acondicionamento diante das inúmeras vantagens que apresentam, porém, sua baixa velocidade de degradação representa um grave problema

ambiental, o que contraindica o seu uso. Buscando contornar esta situação, pesquisas têm buscado alternativas de embalagens produzidas com polímeros biodegradáveis.

Descobertos há pouco mais de dez anos, os plásticos biodegradáveis possuem uma degradação da ordem de grandeza de meses (6 a 12 meses), contra 50 ou até 200 anos no caso dos polímeros sintéticos. Entre os insumos que podem ser utilizados como matérias-primas para confecção das embalagens, estão entre os mais utilizados os materiais de origem agrícola, como o amido e derivados da cana-de-açúcar, por serem baratos e provenientes de fontes renováveis. Embora algumas destas alternativas já estejam em produção, sua utilização ainda não é adotada amplamente pela população do país, e tem apenas 1% de participação no mercado internacional. Porém, entre os materiais recicláveis, os plásticos de origem mineral, que representam a maior parcela do total de recicláveis, estão entre os mais danosos ao ambiente (MACHADO et al., 2012; COUTINHO et al., 2004).

Nesse contexto, alguns municípios têm implantado leis que proíbem a distribuição gratuita de sacolas plásticas, como é o caso da lei municipal nº 15.374/2011 de São Paulo/SP, autorizando somente as sacolas reutilizáveis feitas de materiais de fontes renováveis e proibindo as sacolinhas brancas, consideradas nocivas ao meio ambiente. Além disso, na mesma lei municipal, define-se as especificações técnicas das sacolas autorizadas a serem distribuídas pelo comércio e regulamenta que as sacolas verdes devem ser reutilizadas somente para descarte do lixo reciclável (recolhido pelo Programa de Coleta Seletiva), enquanto que as sacolas cinzas devem ser reutilizadas para o descarte de lixo comum (recolhido pela coleta convencional).

Da mesma forma, no Estado do Rio de Janeiro, foi sancionada a lei 8.006/2018 que proíbe a distribuição ou mesmo a venda de sacolas plásticas fabricadas com derivados de petróleo em estabelecimentos comerciais e indica que o Estado pode estabelecer convênios e parcerias com o governo federal, prefeituras e empresas privadas para fazer valer a norma, objetivando implantar a coleta seletiva.

Quando se trata dos coletores urbanos, comunitários e institucionais, estes podem ser pequenos, médios e grandes (caçambas), além de fixos ou móveis. O Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (IBAM, 2018) orienta que os resíduos sejam acondicionados em recipientes fabricados em polietileno de alta densidade, os PEAD, que possuem capacidades de 120, 240 e 360 litros para contêineres de duas rodas,

e 760 e 1.100 litros para contêineres de quatro rodas (Figura 2). Outra opção são os contêineres metálicos que possuem geralmente capacidade de 750 e 1.500 litros e podem ser basculhados por caminhões compactadores (Figura 3). Esses recipientes possuem tampa, rodinhas, são fabricados com material que possui aditivos contra a ação de raios ultravioletas e possuem drenos para lavagem. Os coletores devem ser alocados nas ruas, praças, praias, em posições e quantidades que facilitem seu uso. (D' ALMEIDA et al., 2000; IBAM, 2018).



Figura 2. Contendor móvel em PEAD de 120l.

Fonte: Prédio New- equipamentos para condomínios¹.



Figura 3. Contendor metálico de 1600l.

Fonte: Onixlimp Higiene².

¹ Disponível em: <<https://predionew.com.br/loja/carrinhos/contentor-de-lixo/>>

² Disponível em: <<http://onixlimp.com.br/inicio/lixeria-container-em-aco-1600l.html>>

No caso de alta demanda de armazenamento de lixo, pode-se citar dois exemplos praticados no estado de São Paulo, nos municípios de Paulínia e de São Paulo.

Paulínia tem um dos sistemas mais modernos de acondicionamento e coleta de resíduos de todo o território nacional, o MecLix, sendo a primeira cidade da América Latina a realizar esse sistema de gerenciamento. O sistema, instalado em 2012, consiste em um conjunto de contêineres implantados abaixo do nível do solo, aproximadamente 2 metros abaixo do nível da calçada, com capacidade de receber até três mil litros de resíduos. Acima da superfície ficam apenas dois tubos, no qual as pessoas jogam os sacos de lixo até os contêineres subterrâneos (Figura 4). Eles estão instalados em regiões de maior produção de resíduos, como regiões comerciais, shopping centers, escolas, etc. (COLOMBARI, 2014). Para a realização da coleta é necessário primeiramente abrir a tampa e em seguida, um caminhão coletor com braço mecânico ergue o contêiner e despeja todo o resíduo no caminhão coletor.



Figura 4. Coletores urbanos do município de Paulínia, SP.

Fonte: COLOMBARI, 2014.

De acordo com a Secretaria de Obras de Paulínia, o sistema MecLix garante um armazenamento de lixo adequado, sem o risco de os resíduos atingirem o sistema de galerias pluviais, não há sujeira decorrente do rompimento dos sacos plásticos utilizados para acondicionar o lixo. Outros benefícios desse sistema são a redução dos impactos no trânsito no momento da coleta e a não geração de resíduos acumulados nas calçadas, permitindo com que as pessoas transitem livremente (COLOMBARI, 2014).

Já o modelo implantado em São Paulo, consiste na colocação de contêineres fixos (um para coleta convencional outro para coleta seletiva) de 1000L cada, instalados nos

quarteirões, para diminuir as viagens dos caminhões. Nesse sistema, os moradores andam em média 60 metros para depositar o lixo em caçambas de plástico fechadas.

Para o dimensionamento do período de acondicionamento dos RSU, deve-se levar em consideração a frequência da coleta municipal e, se no município existe programa de coleta seletiva. A significativa presença de matéria orgânica em decomposição encontrada nos RSU indica a necessidade de transporte ágil e destinação final imediata. No caso de existir coleta seletiva no município, é imprescindível que os materiais recicláveis sejam separados dos não recicláveis para que não limite ou até inviabilize a reciclagem desses materiais (SANTOS,2004; LACERDA,2003).

2.2.3 Coleta dos Resíduos sólidos domiciliares

A coleta pode ser compreendida como o recolhimento do lixo acondicionado, para posteriormente encaminhá-lo, mediante transporte adequado, a um eventual tratamento e à disposição final (IBAM,2019). A coleta dos RSU é de responsabilidade dos municípios, que geralmente terceirizam este serviço. De acordo com Salvador (2014), a coleta se divide em: regular, extraordinária, especial e seletiva.

A coleta regular é a mais comum e se caracteriza pela frequência do recolhimento do lixo. Dados do Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos (2017) apontam que o déficit da coleta regular no país em 2017 ficou em 1,3%, o que significa um contingente de 2,3 milhões de habitantes urbanos não atendidos pelo serviço regular de coleta de resíduos domiciliares (SNIS, 2019).

A coleta extraordinária acontece quando é solicitada pelo poder público, de forma esporádica. Ocorre por exemplo, após festividades no município (carnaval, réveillon, festas na rua) ou durante período de algum congresso ou exposição. Já a coleta especial, acontece sempre que há ocorrência de resíduos especiais, como, por exemplo, os resíduos de serviço de saúde, lixo radioativo e metais pesados, visto que estes precisam de um tratamento diferenciado pois podem causar males à saúde humana.

Segundo a FUNASA (2004), a coleta e transporte dos resíduos sejam eles domiciliares, de feiras livres, de calçadas e estabelecimentos públicos, devem garantir os seguintes requisitos:

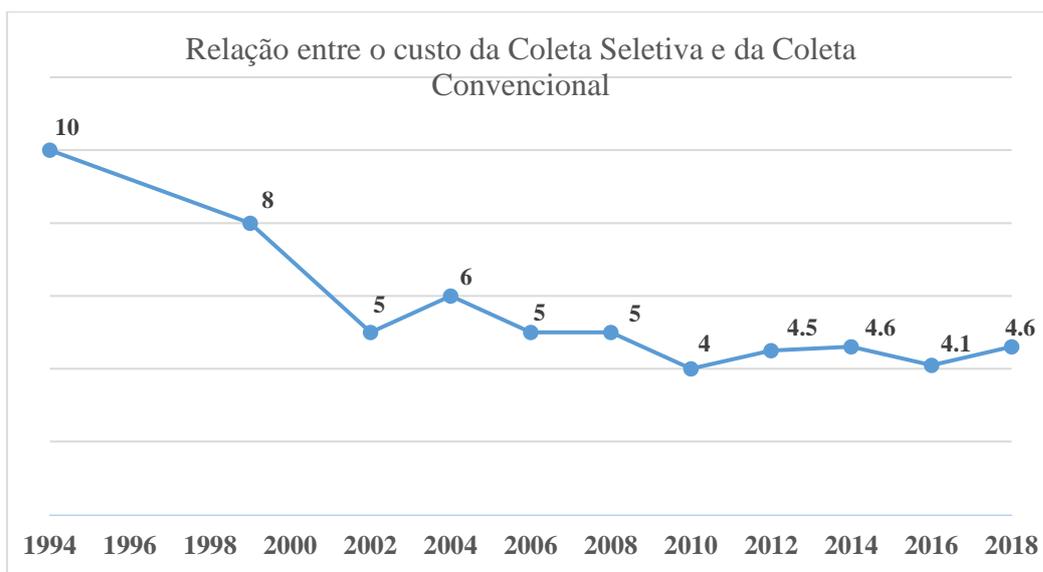
- i) A universalização do serviço prestado;
- ii) Regularidade da coleta (periodicidade, frequência e horário).

Uma pesquisa realizada pelo IPEA (2012) indicou que a taxa de cobertura de coleta dos RSU no Brasil alcançava em torno de 90% do total dos domicílios e se aproximava de 100% dos domicílios urbanos. Apesar do elevado índice, essa cobertura é distribuída de forma desigual no território brasileiro, sendo as regiões Norte e Nordeste aquelas com menores taxas (82,2% e 76,2% respectivamente). As diferenças são ainda maiores quando se comparam os domicílios urbanos com os domicílios rurais, alcançando menos da metade da taxa de cobertura nas regiões Sul e Sudeste, e abaixo dos 30% nas demais regiões.

A fase da coleta e transporte correspondem de 50% a 80% dos custos das operações de limpeza nos centros urbanos, por isso devem ser bem planejadas e organizadas para não gerar ainda mais gastos (BRASIL, 2007).

No caso da coleta seletiva, os custos são ainda maiores quando comparados com a coleta tradicional. Segundo a CEMPRE (2018), o custo médio da coleta seletiva é de US\$117,93 por tonelada de resíduo, enquanto a coleta regular é de US\$25,00 por tonelada, o que leva a um custo da coleta seletiva 4,6 vezes maior que o custo da coleta convencional, porém é uma das opções mais adequadas para promover a logística reversa dos RSU e a reciclagem. O Gráfico 1 mostra a evolução dos custos da coleta seletiva comparados com a coleta convencional.

Gráfico 1. Evolução do custo da coleta seletiva comparada a coleta convencional no Brasil.



Fonte: Adaptado do CEMPRE (2018).

A coleta tradicional é caracterizada pelo recolhimento dos RSU misturados, o que não acontece na coleta seletiva. A coleta seletiva visa o reaproveitamento dos resíduos que são previamente separados pelos geradores para facilitar à logística, separação e comercialização pelas cooperativas de reciclagem (OLIVEIRA, 2011). Para Salvador (2014), a conscientização da população em separar previamente os resíduos e a separação nos centros de triagem são importantes para que a coleta seletiva no município aconteça de forma eficiente. A Tabela 5 sintetiza as características mais importantes e que diferenciam a coleta seletiva da coleta convencional.

Tabela 5. Comparativo entre a coleta seletiva e a coleta convencional.

Coleta seletiva	Coleta Convencional
➤ Materiais limpos	➤ Coleta menos complicada, não há necessidade de separação
➤ Maior qualidade	➤ Pode utilizar caminhões com sistemas compactadores
➤ Menos perdas de materiais por contaminação	➤ Maiores quantidades de materiais coletados
➤ Menos recursos necessários para a triagem (pessoas, equipamentos, tempo, etc.)	➤ Coleta é mais fácil e mais rápida, todos os resíduos podem ser misturados
➤ Necessidade de conscientização, conhecimento e participação dos usuários	➤ Mais conveniente e fácil para usuários
➤ Maiores custos	➤ Economicamente mais eficiente
➤ Menores quantidades coletadas devido ao volume	

Fonte: Adaptado de Oliveira (2011).

Segundo dados da CEMPRE (2019), apenas 22% dos municípios brasileiros possuem programas de coleta seletiva e 45% dos programas estão na região sudeste. Bartholomeu e Caixeta Filho (2011 apud Salvador, 2014) defendem que 40% dos RSU são materiais recicláveis, e o seu aproveitamento auxilia na redução do consumo de energia, na quantidade de volume depositado nos aterros, além de contribuir com as questões ambientais e sociais.

As estratégias mais utilizadas no Brasil para a coleta seletiva são: o modelo porta-a-porta (como na coleta comum), por meio de pontos de entrega voluntária (PEV) e a coleta realizada por catadores ou autônomos (CEMPRE,2018). D' Almeida et al. (2000) acrescentam o modelo de Pontos de Troca. Nessa modalidade, o material entregue em pontos fixos é trocado por algum bem ou benefício, que pode ser alimento, descontos, vales, materiais de construção, entre outros. Oliveira (2011) defende outro modelo verificado que não é muito referenciado, o sistema de coleta híbrido, onde o veículo percorre apenas pontos de coleta pré-estabelecidos e parte do trabalho é feito por

catadores. A seguir, detalha-se os modelos de coleta seletiva porta-a-porta, Pontos de Entrega Voluntário (PEVs) e sistema híbrido.

- Coleta Seletiva Porta-a-Porta

Similar a coleta convencional, o veículo percorre a extensão das vias (ruas) coletando os resíduos que foram previamente separados e depositados em frente aos domicílios e estabelecimentos comerciais. Geralmente os resíduos são separados em dois grupos:

- Materiais úmidos (orgânicos), compostos por resto de alimentos e materiais não recicláveis.
- Materiais secos (recicláveis), compostos em geral por papéis, metais, vidros, plásticos e etc.

Esse modelo é o mais representativo em programas de reciclagem. Nas cidades onde esse sistema existe, os roteiros de coleta são realizados semanalmente utilizando-se caminhões do tipo carroceria aberta. Em seguida, são encaminhados para unidades de triagem para ser feita uma separação mais criteriosa dos materiais visando sua comercialização (IBAM,2019).

- Pontos de Entrega Voluntária (PEV)

Consiste na colocação de caçambas, *containers* ou um conjunto de lixeiras, que se diferenciam por cores, instalados em locais públicos estratégicos (perto de escolas, praças, supermercados, etc) para que a população, voluntariamente, possa fazer o descarte dos materiais.

Segundo Lima (2003 apud Roviriego,2005), problemas de localização como um todo tratam de decisões sobre onde localizar instalações, considerando clientes que devem ser servidos de forma a otimizar algum critério. Um dos problemas mais citados nas experiências práticas com a coleta por PEVs é a dificuldade de se alcançar altas taxas de participação da população para segregar e depositar os recicláveis nos PEVs. Dessa forma, fatores como campanhas educativas, número de PEVs, distância entre os usuários e os pontos de entrega e políticas públicas podem influenciar significativamente na participação das pessoas nesse sistema de coleta (OLIVEIRA, 2011).

A Tabela 6 apresenta o código de cores a ser adotado para os diferentes tipos de resíduos na identificação de coletores e transportadores conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 275 de 2001.

Tabela 6. Código de cores dos resíduos sólidos recicláveis.

Cor do Contêiner	Material Reciclável
Azul	Papéis/papelão
Vermelha	Plástico
Verde	Vidros
Amarela	Metais
Preta	Madeira
Laranja	Resíduos perigosos
Branca	Resíduos ambulatoriais e serviços de saúde
Marrom	Resíduos orgânicos
Cinza	Resíduo geral não- reciclável ou misturado, ou contaminado, não passível de separação

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA Nº 275 de 2001.

Segundo Roviriego (2005), esse sistema de coleta seletiva demanda menos recursos que o sistema porta-a-porta, devido a redução dos percursos. Todavia, é necessária maior disposição da população em separar os resíduos e levá-los aos PEVs.

Outro fator que está fortemente associado ao sucesso da implantação da coleta seletiva por PEV é o número e localização dos pontos de entrega. McDoygall (et al. 2001 apud Oliveira, 2011) destacam que a elevação do número de pontos de entrega certamente aumenta as taxas de participação da população e, conseqüentemente, a recuperação de materiais recicláveis. Mas, por outro lado, pode comprometer a viabilidade da operação, uma vez que o custo econômico adicional pode vir a exceder os ganhos gerais do programa.

Oliveira (2011), em seu estudo, lista algumas pesquisas que tratam das distâncias entre os PEVs, valores relativos aos volumes dos *containers* e frequências da coleta, para simular cenários futuros e casos já implementados. Dentre os estudos, Roviriego (2005) adota em seu trabalho uma distância máxima entre os PEVs de 250 metros, por considerar que os brasileiros não estão habituados a esse tipo de coleta. Já Bringhentim et al. (2004

apud Oliveira, 2011) sugeriu um deslocamento máximo de 500 metros dos usuários até os PEVs para o sistema de coleta seletiva da cidade de Vitória/ES e uma frequência de duas vezes por semana. Estudos para cidades fora do país chegaram sugeriram distâncias de 300 metros, 250 metros e 150 metros.

- Sistema Híbrido

O sistema híbrido pode ser considerado uma junção dos sistemas anteriores. Os veículos de coleta viajam por uma rota programada, parando periodicamente para a coleta do lixo. Os catadores (transportados no mesmo veículo) percorrem a pé as ruas adjacentes recolhendo os recicláveis que estiverem depositados nas calçadas das residências. Nesse sistema há uma economia com os custos relacionados ao transporte, porém necessita-se de mais mão de obra (OLIVEIRA,2011; REVIRIEGO,2005).

2.2.4 Transporte dos Resíduos sólidos domiciliares

Em relação aos veículos utilizados na coleta, D' Almeida et al. (2000), afirma que eles podem ser de tração animal ou mecânica, ter carroceria convencional ou compactador. A escolha de um desses modelos está condicionada a fatores como: quantidade de resíduo coletado; forma de acondicionamento do resíduo e condições de acesso ao ponto de coleta.

A NBR 12980 (ABNT, 1993) define os veículos coletores como veículos dotados de carroceria especialmente projetada para coleta de resíduos a que se destina e com recurso de descarga sem uso de mão humana.

Segundo o IBAM (2018), os veículos de coleta e transporte sem compactação são: caminhão baú e o caminhão basculante. O caminhão basculante geralmente é utilizado no transporte de entulho, já o baú, também denominado “Prefeitura” é mais empregado em comunidades pequenas ou em locais íngremes. O custo da manutenção deste veículo é baixo, porém, durante a coleta, o esforço dos coletores é grande, visto que devem erguer o lixo até a borda superior da caçamba, com mais de 2 metros de altura (Figura 5). O volume de sua caçamba pode variar de 4m³ a 12m³.



Figura 5. Veículo coletor do tipo Baú ou Prefeitura

Fonte: Prefeitura de Buri.

Os caminhões com compactação possuem equipamentos compactadores com carregamento traseiro ou lateral. São destinados à coleta domiciliar, pública e comercial, e a descarga deve ocorrer nas estações de transferência, usinas de reciclagem ou nos aterros sanitários. Possui capacidade volumétrica útil de 6,10, 12, 15 e 19m³ (Figura 6).



Figura 6. Veículos coletores compactadores

Fonte: IBAM (2018).

2.2.5 Disposição Final dos RSU

A Lei nº 12.305/2010, em seu Art. 3º, define como destinação final adequada de resíduos aquele que inclui a reutilização, a reciclagem, a recuperação e aproveitamento energético, além de outras destinações admitidas por órgãos competentes, e uma correta disposição final, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança e minimizar impactos ambientais adversos.

Na última etapa do gerenciamento dos resíduos sólidos, os resíduos que não receberam tratamento e os rejeitos oriundos dos processos de tratamento e reciclagem são dispostos no solo, sendo a solução mais adequada, a disposição em aterros sanitários (CASTRO, 2006).

Os aterros sanitários devem ser construídos e operados segundo normas específicas, de modo a evitar danos ao meio ambiente. A Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 8419 de 1992 define aterro sanitário da seguinte forma:

“Aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e a segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário” (ABNT, 1992).

Apesar das recomendações, os dados da Abrelpe (2017) indicam que 40,9% dos resíduos coletados no ano de 2017, foram despejados em locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, totalizando mais de 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados, que têm elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde.

A publicação revela, ainda, que houve um aumento, pelo segundo ano consecutivo, da quantidade de resíduos direcionados para lixões, a pior forma de destinação, com crescimento de 3% de 2016 para 2017, e mais de 1.600 cidades fazendo uso dessas unidades irregulares. De acordo com a ABNT (1992), os resíduos dispostos

desta forma acarretam problemas de saúde pública, como proliferação de vetores de doenças, geração de maus odores e, principalmente, poluição do solo e das águas pelo chorume.

De acordo com os dados Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), cerca de 30% de todo o lixo produzido no Brasil tem potencial de reciclagem, porém 3% apenas é reaproveitado. Cerca de 8 bilhões de reais são perdidos com materiais que vão para lixões ou aterros e que poderiam ser reaproveitados após a reciclagem. Esses números revelam que há um grande desperdício tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico e social (MMA, 2011; SALVADOR, 2014).

No caso dos resíduos orgânicos, a forma de destinação gera, para a maioria dos municípios, despesas que poderiam ser evitadas caso a matéria orgânica fosse separada e encaminhada para um tratamento específico, por exemplo, para compostagem (MMA, 2011). Por isso, é importante que haja incentivo a coleta seletiva para promover o reaproveitamento dos materiais e haver economia e diminuição dos resíduos levados aos aterros.

2.2.6 Estação de Transferência de resíduos

As Unidades de Transferência (UT), também conhecidas como Centros de Transbordo, são instalações onde se faz o traslado dos resíduos de um veículo coletor a outro veículo com capacidade maior, como por exemplo carretas e caminhões *roll on roll off*, que podem ter capacidade para 25 toneladas (*Figura 7*). As unidades são instaladas próximo ao centro de massa de geração dos RSU, de tal forma que, quando os caminhões de coleta tiverem atingido sua capacidade máxima façam descarga e retornem rapidamente para completar o roteiro de coleta (FUNASA, 2004).



Figura 7. Caminhão *roll on roll off*.
Fonte: Variemaq.³

Costa (2004) afirma que as estações de transferência de resíduos sólidos domiciliares no Brasil vêm adquirindo importância desde a década de 50, principalmente devido ao crescimento das cidades e ao distanciamento dos locais de disposição final de resíduos em relação ao centro urbano.

Segundo Nunes e Silva (2015), a falta de grandes áreas que atendam a necessidade de construção de aterro sanitário e o crescente aumento na geração de resíduos ao longo dos anos, faz com que as cidades implantem as ET com o intuito de diminuir a distância percorrida para a destinação final dos resíduos sólidos. Dentre as principais características e vantagens das unidades de transbordo estão:

- Redução do tempo ocioso do serviço de coleta (o veículo coletor e a mão-de-obra são utilizados exclusivamente na coleta);
- Redução do custo de transporte e consumo de combustível;
- Possibilidade de término da coleta mais cedo, acarretando um tempo mais curto de permanência do lixo em vias públicas;
- Possibilidade de utilização de veículo com menor capacidade e maior facilidade de manobra;
- Redução do número de caminhões na malha viária, contribuindo para a minimização das emissões dos gases de efeito estufa;

³ Disponível em: < <http://www.variemaq.com.br/maquinas-e-equipamentos/locacao-linha-pesada/locacao-de-caminhao-rollon-caminhao-roll-on-off/> >

- Contribuição na redução de congestionamentos, visto que menos veículos irão percorrer maiores distâncias e os trechos dentro da cidade serão percorridos em tempos menores.

O transbordo de resíduos é um modelo que vem se destacando frente as necessidades enfrentadas na coleta e transporte dos resíduos. Normalmente são empregadas quando a distância entre o centro de massa de coleta e o aterro sanitário é superior a 25 km. Porém, em cidades maiores, onde as condições de tráfego tornam lentos os deslocamentos, é possível encontrar estações implantadas em locais cuja distância até o aterro sanitário é inferior a 20 km (BRIDE, 2008; FUNASA, 2004).

Para a FUNASA (2004), as estações de transferência podem ser classificadas quanto à:

- i) Modalidade de transporte (após a transferência): ferroviário, marítimo ou fluvial
- ii) Modo de armazenagem: Com transbordo direto ou com armazenamento dos resíduos.

As estações com transbordo direto contam com um desnível entre os pavimentos para que os caminhões de coleta, posicionados em cota mais elevada, façam a descarga dos resíduos do caminhão diretamente no veículo de transferência. Nesse caso, é necessário dispor de uma frota maior de veículos de transferência para assegurar que os caminhões não fiquem retidos nas estações aguardando para efetuar a descarga dos resíduos (BRIDE, 2008). Já nas estações com armazenamento, há um local para armazenamento do resíduo, evitando, assim, o aumento da frota de veículos e equipamentos de transferência, além de absorver os resíduos que chegam na estação simultaneamente.

As estações com armazenamento são ainda divididas em com ou sem compactação. As estações com compactação têm como objetivo principal o aumento da massa específica dos resíduos visando à redução das despesas com transporte. O modelo mais tradicional conta com um silo de armazenamento e desnível entre os pavimentos de carga e descarga, além de possuir um sistema hidráulico instalado que compacta os resíduos no interior dos veículos de transferência (IBAM, 2018). Já nas estações sem compactação, os resíduos são simplesmente transferidos sem redução prévia. É comum que

equipamentos do tipo escavadeira hidráulica ou pás carregadeiras retirem os resíduos dos silos e façam os carregamentos nos veículos de transferência. Esse modelo propicia bastante velocidade na descarga dos veículos de coleta e no carregamento dos veículos de transferência, podendo ser empregado para estações de pequeno e grande porte (IBAM, 2018).

Para Costa (2005), o transbordo se torna ainda mais vantajoso quando existe a coleta seletiva dos resíduos, visto que diminuiria ainda mais a quantidade de resíduos transferidos para os aterros sanitários. Em cidades que não contam com a coleta seletiva, pode-se ter estações de transferência com triagem na chegada dos resíduos. Esse procedimento é importante pois possibilita a separação dos materiais do fluxo de resíduos e identifica quaisquer outros resíduos que possam ser inadequados para eliminação (PEREIRA, 2013). Em contrapartida, uma situação ideal seria a prévia separação dos resíduos na própria fonte geradora, que acarreta mais agilidade ao processo de triagem e oferece melhores condições de trabalho aos catadores.

2.3 Roteamento de Veículos

Chwif e Medina (2007, apud Oliveira, 2011) afirmam que a simulação permite avaliar e analisar sistemas reais a partir da construção de modelos computacionais, por meio dos quais pode-se responder perguntas do tipo “o que aconteceria se” (what if), tornando-se assim uma poderosa ferramenta de apoio a tomada de decisão. Para o desenvolvimento de um modelo de simulação, três etapas devem ser cumpridas, segundo Chwif (1999):

- i. Concepção e formulação do modelo conceitual: deve-se entender claramente o sistema a ser simulado, definir os objetivos, as entradas, as saídas esperadas, as suposições e as simplificações do modelo.
- ii. Implementação do modelo: o modelo que antes era apenas conceitual é convertido no modelo computacional. Após a construção do modelo computacional alguns resultados devem ser gerados para sua verificação e validação, para não haver conclusões derivadas de erros ou de uma representação equivocada do sistema real (OLIVEIRA, 2011).
- iii. Análise dos resultados do modelo: ocorre o processo de análise conhecido como what if, ou seja, são realizadas alterações nas variáveis de entrada

do modelo de simulação e analisam-se os resultados gerados. Nessa etapa, podem ser feitas alterações sucessivas para novos experimentos, e caso o resultado da simulação não seja satisfatório, o modelo pode ser modificado e este ciclo reiniciado.

Nos diversos ramos da Engenharia, é comum os problemas que podem ser modelados e solucionados com o emprego de técnicas de Pesquisa Operacional. De acordo com Oliveira (2011), os problemas de roteamento pertencem a uma categoria ampla da Pesquisa Operacional, conhecida como Problemas de Otimização em Rede.

Segundo Cunha (2000), o termo “roteamento de veículos”, embora não encontrado nos dicionários de língua portuguesa, vem sendo utilizado como o equivalente ao inglês *routing* para designar o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, com o intuito de visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento.

Conforme Partyka e Hall (2000 apud Pacheco, 2009) “um problema real de roteamento é dividido por 3 fatores fundamentais: decisão, objetivos e restrições”. As decisões dizem respeito à alocação de clientes que devem ser visitados, ao conjunto de veículos e seus motoristas, a programação e o sequenciamento das visitas. Os objetivos visam propiciar um alto nível de serviço ao menor custo possível, levando em consideração as restrições, como horário, capacidade dos veículos entre outras.

Belfiore (2006 apud Paula, 2009) apresenta ainda mais uma categoria conhecida como variáveis de decisão e hipóteses/recursos e/ou características do problema, que dentre os quais valem destacar:

- Tipo de operação (coleta, entrega, coleta e entrega simultaneamente);
- Tipo de carga (única ou carga de lotação múltiplas cargas ou carga fracionada);
- Tipo de demanda (determinística ou estocástica);
- Localização da demanda (localizada em arcos, em nós ou em arcos e nós);
- Tamanho (limitado ou ilimitado) e tipo (homogênea ou heterogênea) da frota;
- Estrutura da rede (direcionada, não direcionada, mista, euclidiana).

O primeiro problema de roteamento a ser estudado, denominado de Problema do Caixeiro Viajante (PCV), objetivava encontrar o roteiro ou sequência de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante de forma a minimizar a distância total percorrida, garantindo que cada cidade fosse visitada uma única vez (CUNHA, 2000).

Desde então, novas restrições vêm sendo incorporadas ao PCV para melhor representar os diferentes tipos de problemas que envolvem roteiros de pessoas e veículos que possuem alguma restrição. A maioria dos problemas de roteamento de veículos é baseada na teoria dos Grafos, dessa forma, torna-se necessário conhecer alguns dos seus conceitos essenciais para compreensão deste trabalho.

2.3.1 Teoria dos Grafos

A Teoria dos Grafos estuda objetos do mesmo grupo, os grafos, que servem de modelo para muitos problemas em vários ramos da Matemática, da Computação, da Engenharia, da Indústria e dos Transportes (FEOFILLOF, 2013).

Matematicamente, um grafo é uma estrutura $G = (V,A)$ que consiste de um conjunto finito de V (nós ou vértices) e de um conjunto finito de elementos chamados arcos ou arestas. O elemento $a^k = (v_i, v_j)$ é um arco que possui como extremidades os vértices v_i e v_j que pertencem ao conjunto G .

Os grafos podem ser simples (Figura 8), orientados e não orientados. Nos grafos orientados, um nó é definido como extremidade inicial (origem) e o outro nó como extremidade final (destino), e neste caso são representados por uma seta indicando o sentido dos mesmos (Figura 9a). Nos grafos não orientados não existe sentido único, e nesses casos, os arcos são chamados de arestas (Figura 9b) (GONÇALVES et al., 2007 apud Salvador, 2013; SALLES, 2013).

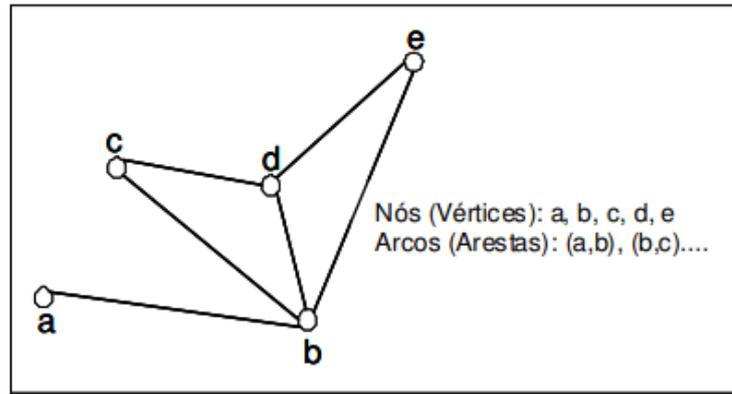


Figura 8. Representação de um grafo.

Fonte: Salles (2013).

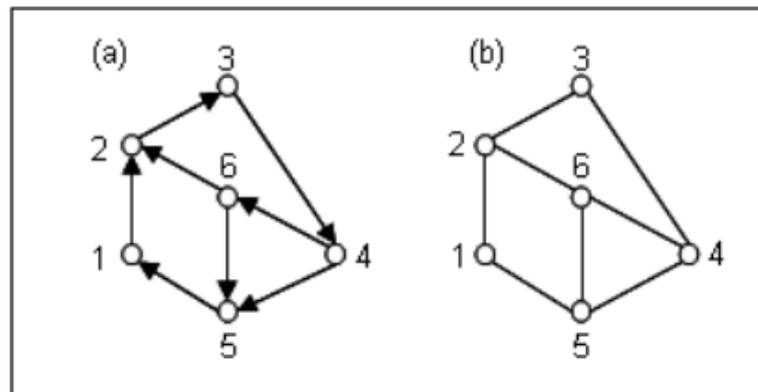


Figura 9. Grafos (a) Orientado (b) Não Orientado.

Fonte: Salles (2003).

O espaço urbano é formado por uma rede com vários elementos, tais como estradas, ruas, interseções e terminais, nos quais os serviços de transporte são oferecidos. Segundo Moro (2014), quando uma malha urbana é representada por um grafo, os arcos representam os trechos de ruas de mão única e as arestas, os de mão dupla. Os nós são os cruzamentos entre as ruas, como mostrado na Figura 10 e na Figura 11. Neste contexto, para cada elemento que compõe o grafo, pode-se atribuir informações geográficas para melhor representar o sistema viário, como será exposto no item a seguir.

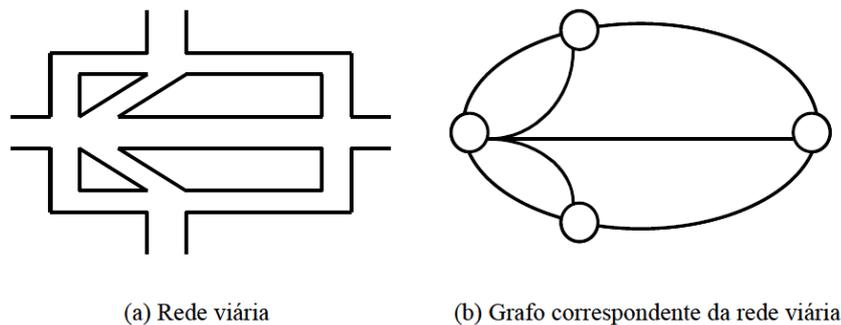


Figura 10. Representação de rede viária em forma de grafo.
Fonte: Lacerda (2003).

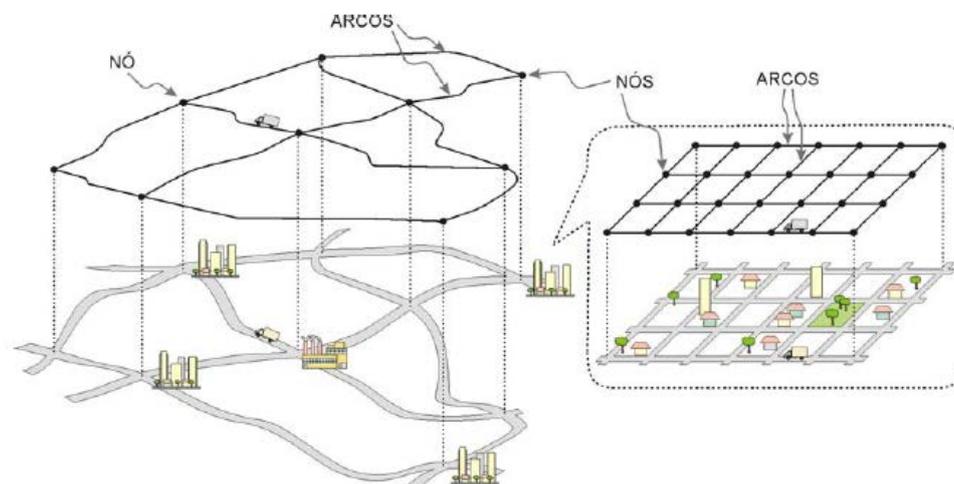


Figura 11. Representação do espaço real na forma de rede.
Fonte: Naruo (2003).

2.3.2 Sistemas de Informação Geográfica –SIG

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ou do inglês *Geographic Information Systems (GIS)* foram criados para tratar dados referenciados espacialmente. Estes sistemas manipulam dados obtidos em fontes como mapas e imagens de satélites, recuperando e combinando informações, permitindo vários tipos de análise. Os SIG's têm sido cada vez mais usados em diversas áreas, tais como análise e monitoramento do meio ambiente, planejamento urbano e regional, estudo de recursos naturais, controle de redes de transporte, distribuição de energia entre outras (GALVÃO et al., 1997).

Kouichi et al. (2009) definem os sistemas de Informações Geográficas como uma coleção organizada de hardware, software, dados geográficos e alfanuméricos, projetados

para capturar, armazenar, manipular, analisar e apresentar informações referenciadas geograficamente.

Segundo Naruo (2003), o SIG é abordado geralmente na literatura com foco em seus conceitos no sistema computacional. Porém, para um sistema ser implementado, não basta apenas um software que trabalhe com banco de dados digitalizados, é importante que haja também recurso humano qualificado, um objetivo no seu uso e interação com as outras áreas dentro da organização. Logo, para o SIG ser completo, necessita ser construído de pelo menos cinco componentes: software, hardware, dados geográficos, profissionais qualificados e contexto organizacional.

No passado, a análise e manutenção das informações espaciais eram feitas através do uso de mapas e cartas. Na década de 80, a tecnologia de sistemas de informação geográfica iniciou um período de acelerado crescimento que dura até os dias de hoje. Até então, limitados pelo alto custo do hardware e pela pouca quantidade de pesquisa específica sobre o tema, os SIG se beneficiaram grandemente da massificação causada pelos avanços da microinformática e do estabelecimento de centros de estudos sobre o assunto (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001).

Galvão et al. (1997) afirmam que a utilização desses sistemas em larga escala foi praticável graças à disponibilidade, aos custos razoáveis e a várias tecnologias, como cartografia digital, desenvolvimento de bases de dados e ao processamento digital de imagens. No entanto, para Mapa e Lima (2005), o uso do SIG no Brasil tem como fator limitante a escassez de bases de dados confiáveis e atualizadas, tanto em relação a dados espaciais (mapas digitalizados) quanto dados demográficos e socioeconômicos.

As principais características de SIGs segundo Câmara, Davis e Monteiro (2001) são:

- Inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno;
- Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

Segundo Lacerda (2003), no estudo de roteamento de veículos, os SIGs auxiliam na determinação da solução ótima através de algoritmos baseados em métodos matemáticos. Dessa forma, é de especial interesse para este trabalho, o Sistema de Informações Geográficas para Transporte (SIG-T). Esses softwares possuem rotinas logísticas de localização de facilidades, roteamento e programação de veículos, aplicações em monitoramento e controle do tráfego, oferta e demanda de transportes, prevenção de acidentes, dentre outras (MAPA & LIMA,2005). Neste contexto, destaca-se o software TransCAD da Caliper.

De acordo com CALIPER (1996), o TransCAD possui modelos que resolvem diversos problemas de roteamento de veículos, atuando na fase preliminar de preparação dos dados, na resolução do problema em si de roteamento e programação de veículos e na elaboração de rotas, tanto na forma de relatórios quanto na forma gráfica.

Com o intuito de otimizar os serviços de coleta dos RSU, que representam uma grande parte do gasto municipal, os SIGs têm sido cada vez mais utilizados em programas de gerenciamento de resíduos sólidos.

2.3.3 Formulação de Problemas para Roteamento de Veículos de Coleta de Lixo

Dentre as várias aplicações dos Problemas de Roteamento de Veículos (PRV), tem-se o sistema de coleta dos RSU. Para Chang (1997 apud Oliveira, 2011), três objetivos podem ser considerados para a coleta de resíduos: i) minimizar a distância total de coleta; ii) minimizar o custo total de coleta e; iii) minimizar o tempo total de coleta.

Para alcançar esses objetivos, o uso de modelos matemáticos associados à capacidade de análises espaciais em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é o foco de estudos em sistemas de gerenciamento ambiental (LACERDA, 2003).

Existem variações nos problemas de roteamento de veículos de coleta que influenciam diretamente na decisão a ser tomada. De acordo com Keennn (1998 apud Lacerda, 2003), algumas características padrões distinguem os problemas de roteamento, entre as mais importantes estão: a localização da demanda em nós ou sobre arcos da rede, a restrição de capacidade do veículo e o objetivo que define o melhor roteamento.

Segundo Saltorato (1998 apud Roviriego, 2005), os principais problemas envolvendo roteamento de veículos de coleta podem ser classificados resumidamente da seguinte forma:

- Problema de Roteamento em Nós

Nesse tipo de problema, a demanda localiza-se sobre pontos específicos da rede, como esquinas em uma rede urbana, a fim de minimizar o número de veículos necessários para coleta de resíduo nos vértices da rede, observando as restrições de capacidade do veículo e a carga de trabalho dos funcionários. O Problema do Caixeiro Viajante, por exemplo, pode ser considerado um problema de roteamento em nó. (LACERDA, 2003; ROVIRIEGO, 2005).

- Problema de Roteamento em Arcos (Vias)

Nos problemas de roteamento em arcos, a demanda está localizada em pontos próximos entre si, como casas ao longo de ruas ou avenidas que representem os arcos do grafo. O objetivo é encontrar uma rota que percorra todos os arcos uma única vez minimizando a distância total percorrida e conseqüentemente os custos de travessia. Esse problema aparece em diversas outras aplicações práticas e um problema clássico de cobertura de vias é o Problema do Carteiro Chinês (PCC) proposto por *Meigu Guan*. Nesse problema, deve-se determinar um ciclo de custo mínimo que permita ao carteiro (veículo) passar pelo menos uma vez por todos os arcos da rede que se localizam os clientes (SALLES,2013).

- Problemas Gerais de Roteamento de Veículos

Quando a demanda se localiza sobre os nós e arcos do grafo, tem-se o modelo mais geral de roteamento. Se enquadrarm, nessa abordagem, tanto problemas de roteamento de nós com um depósito e vários veículos ou com vários depósitos e veículos quanto problemas de roteamento de arcos com restrição de capacidade (ROVIRIEGO,2005).

Diante da complexidade desses problemas envolvendo roteamento de veículos é importante a utilização de métodos matemáticos para a definição das rotas de modo a proporcionar soluções ótimas ou próximo de ótimas. Os métodos empíricos, geralmente definidos com base na experiência particular de motoristas e operadores da área consomem tempo e nem sempre são eficientes (LACERDA, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo Heerdt e Leonel (2007), a metodologia científica possui uma grande função: propor métodos, técnicas e orientações que possibilitem pesquisar, organizar, classificar, registrar e interpretar, favorecendo a maior aproximação possível com a realidade. Dessa forma, este capítulo apresenta a metodologia adotada neste trabalho, explanando os materiais e métodos utilizados

Este estudo apresenta uma natureza aplicada, pois tem como objetivo geral estudar e elaborar propostas de otimização para o sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares de um município, de forma a diminuir os custos relacionados ao transporte e avaliar os benefícios da implantação de uma Estação de Transferência e Triagem na logística da coleta e para a implementação da coleta seletiva. Desta forma, visa gerar informações a partir da Modelagem e Simulação de cenários, assumindo caráter exploratório, uma vez que, de acordo com Gil (2002), esse tipo de metodologia possui como objetivo “proporcionar familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses”.

3.1 Objeto de estudo

O município de Carapebus – RJ foi selecionada como objeto de estudo. Pertence à região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro e tem área de 308,1 km², correspondentes a 3,2% do total da região. A Figura 12 indica a sua localização.

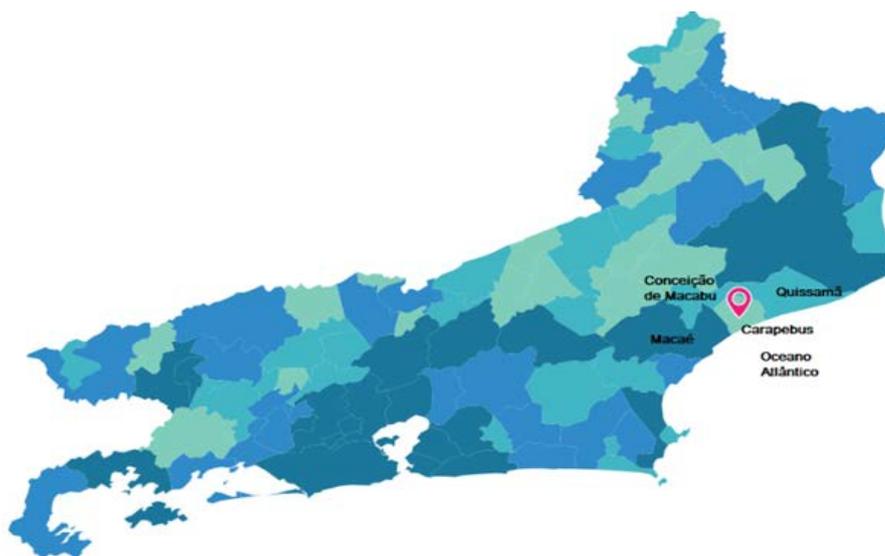


Figura 12. Estado do Rio de Janeiro com destaque ao município de Carapebus e seus vizinhos.

Fonte: Adaptado do IBGE, 2019.

O município, que antes era considerado o terceiro distrito de Macaé, adquiriu sua autonomia a pouco mais de 23 anos, em 1997. Atualmente, possui uma população de 13.359 habitantes, com 78,9 % da população residindo na área urbana e 21,1% na zona rural. Sua densidade populacional é de 43,3 habitantes por km² (IBGE, 2010). A cidade cresceu a uma taxa média anual de 2,39% no período de 1991 e 2000 e 4,08% nos períodos de 2000 a 2010. Esse crescimento populacional se deve principalmente pela indústria de Petróleo e Gás na região, que elevaram a taxa de emprego em cidades próximas como Macaé, localizada na Bacia de Campos, considerada a área de maior produção petrolífera do país, com 84% da produção de petróleo nacional (ANP, 2014).

Com referência ao IDHM, em 2010 registrou-se no município um valor de 0,713 para o IDHM, situando a cidade na faixa de desenvolvimento humano considerada alta (IDHM entre 0,700 e 0,799). Com um PIB de R\$ 303.304,45 e um PIB per capita de R\$ 19.832,80 por habitante, Carapebus encontra-se entre as 15 maiores rendas per capitas entre os municípios do Norte Fluminense.

O município também é reconhecido pelo seu rico patrimônio natural, possuindo em seu território uma unidade de conservação federal e outras quatro unidades de conservação municipais: Área de Proteção Ambiental Carapeba Boa, Parque Municipal da Restinga de Carapebus, Refúgio da Vida Silvestre Fazenda São Lázaro e o Monumento Natural São Simão. (PMSB, 2019). O Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, por exemplo, contém 14.922,39 hectares, 44km de costa e 18 lagoas costeiras, englobando áreas do município de Macaé, Carapebus e Quissamã, e representa o trecho de restinga mais bem conservado de toda costa fluminense. Além de ser uma área muito estudada por pesquisadores de várias instituições de pesquisa, funciona como um Parque Ecológico, possibilitando que pessoas do Brasil e exterior se divirtam e conheçam a área.

No quesito das políticas públicas voltadas à limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, o município ainda precisa se adequar às diretrizes nacionais do saneamento básico impostas na Lei 11.445/2007 e garantir uma política adequada para o manejo dos resíduos sólidos com base na Lei 12.305/2010, que prioriza: a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos e disposição final adequada de rejeitos. Para que esses objetivos sejam contemplados, é necessário a criação de ações que visem a conscientização da população, assim como melhorias e investimentos no serviço da coleta convencional, implantação da coleta seletiva e áreas para aproveitamento dos resíduos gerados. É neste contexto que se justifica a importância deste estudo.

3.2 Levantamento e Coleta de Dados

A primeira etapa consiste no levantamento e coleta de dados do município de Carapebus-RJ, que são de suma importância para o planejamento das rotas e determinação da capacidade da estação de transferência. Para isso, fez-se necessário obter a descrição do sistema atual de manejo de RSU, estimativas da geração atual e futura de RSU no município e o mapa do sistema viário da cidade. O estudo se baseou em dados do SNIS, do último Censo do IBGE (2010) e do diagnóstico dos resíduos presente no PMSB (2020), além de fazer uso de ferramentas computacionais para auxiliar no levantamento e processamento das informações, como descrito a seguir.

3.2.1 Descrição do Sistema atual de Manejo de RSU

A coleta de lixo em Carapebus apresenta características semelhantes a maioria das cidades brasileiras, na qual a cobertura de coleta não atinge 100% da população local. De acordo com os dados do SNIS (2017) e levantamento realizado com a Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Carapebus para o PMSB, a cobertura de coleta é de 91,76% considerando a população rural e urbana, e os roteiros de coleta são definidos e traçados manualmente com base na experiência de trabalho das equipes.

Atualmente, o município não possui programas de coleta seletiva e o sistema adotado para a coleta regular de resíduos sólidos é o sistema porta-a-porta. Todavia, é possível observar a presença de latões e tambores em algumas calçadas para os moradores concentrarem o resíduo domiciliar (Figura 13). Esses recipientes não são considerados os mais adequados por não serem tampados e não possuírem drenos, permitindo assim a proliferação de vetores e aumento do mau cheiro.



Figura 13. Recipientes para acondicionamento dos resíduos domésticos no município de Carapebus/RJ.

Fonte: PMSB (2020).

Para o recolhimento do lixo, o município conta com uma frota de 3 caminhões do tipo compactador, uma equipe de 12 funcionários, sendo 9 coletores e 3 motoristas. Dois caminhões dividem as rotas do turno da manhã, enquanto um caminhão fica responsável pelo turno da noite. Os resíduos são coletados em média três vezes na semana na maioria dos bairros, apenas o bairro Centro e Ubás possui coleta diariamente (*Tabela 7*).

Tabela 7. Cronograma da coleta de resíduos domiciliares em Carapebus.

TURNO DA MANHÃ	ROTAS
Segunda-feira	Ubás, Oscar Brito, Baixada, Santa Tereza
Terça-Feira	Sapicado, Centro, Caxanga, Praça Cordeiro, Baixada.
Quarta-feira	Centro e Baixada.
Quinta-feira	Centro, Oscar Brito, Sapicado, Caxanga e Praça Cordeiro.
Sexta-feira	Ubás, Oscar Brito, Baixada, Santa Tereza, Barreiros, Boa Vista e Praia.
TURNO DA NOITE	ROTAS
De segunda a sábado	Centro e Ubás.

Fonte: Adaptado do PMSB de Carapebus (2020).

Os percursos de coleta são pré-definidos de acordo com a frota disponível e de forma a facilitar a logística do recolhimento do resíduo. Porém, não há nenhum estudo ou planejamento completo que certifique a eficácia dos itinerários adotados. Ao fim da coleta, se o caminhão atingir a capacidade máxima, os resíduos são diretamente encaminhados para um aterro sanitário. Caso contrário, os caminhões voltam para a garagem com o material retido em seu interior para que aguardem seu carregamento total em uma próxima coleta, conforme mostra a Figura 14.



Figura 14. Caminhões coletores com resíduo na garagem da Secretaria de Transporte e Serviços Públicos após término da coleta.

Fonte: PMSB (2020).

Carapebus não possui e não há projetos futuros para implementação de um aterro sanitário para dispor seus resíduos devido às exigências ambientais e os elevados custos para instalação e operação. Por conta disso, o município envia seus resíduos sólidos domiciliares para o aterro sanitário MRT Madalena Tratamento de Resíduos Urbanos Ltda, localizado no município de Santa Maria Madalena/RJ (coordenadas 22° 2' 57.00" S, 41° 53' 35.16" O). O aterro fica a cerca de 37km de distância do município de Carapebus (Google Maps, 2020) e recebe resíduos de outros 10 municípios. É possível realizar o trajeto todo pela RJ- 182 (Figura 15) ou, nos últimos 7km, através da RJ-190 (Figura 16).

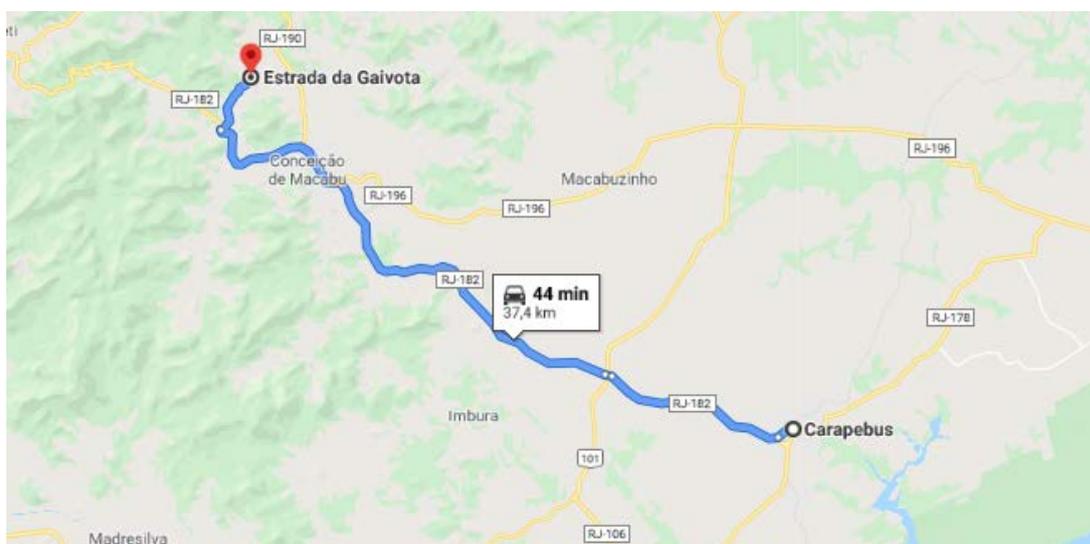


Figura 15. Percurso entre o município de Carapebus e o Aterro MRT pela RJ-182.
Fonte: Google Maps (2020).

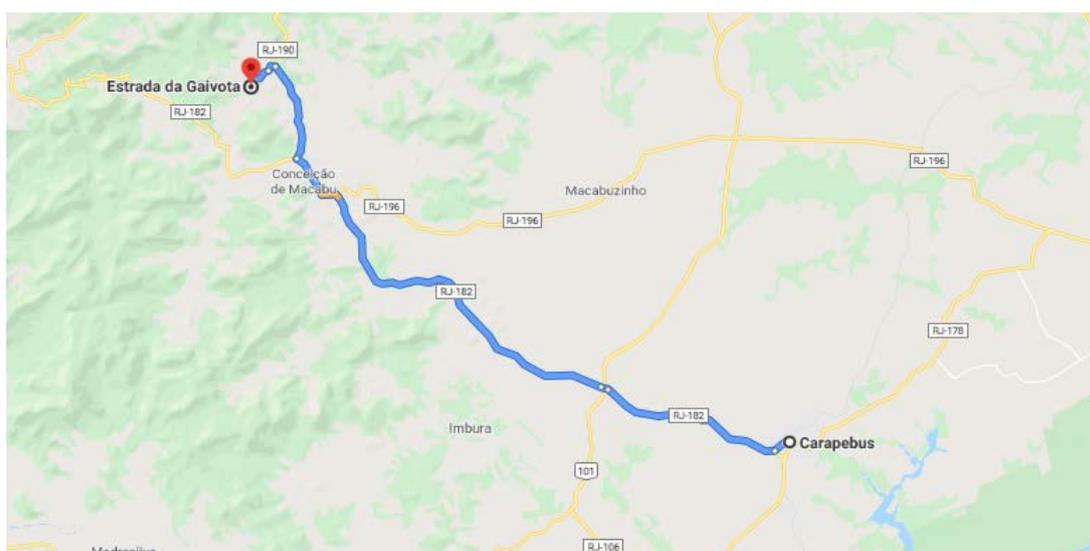


Figura 16. Percurso entre o município de Carapebus e o Aterro MRT passando pela RJ-182 e RJ-190.
Fonte: Google Maps (2020).

As longas distâncias percorridas até o aterro sanitário pelo caminhão da coleta, eleva consideravelmente os custos de transporte e de combustível e dificulta a logística da coleta, além de contribuir na maximização da emissão de gases de efeito estufa. Como apresentado na revisão bibliográfica, o transbordo de resíduos é um modelo que vem se destacando frente as necessidades enfrentadas na coleta e transporte dos resíduos e, normalmente, são empregadas quando a distância entre o centro de massa de coleta e o aterro sanitário é superior a 25km, que é o caso em tela. Assim, buscou-se avaliar neste estudo os impactos que uma estação de transferência e triagem teria no sistema de coleta de RSU do município de Carapebus- RJ.

3.2.2 Geração de RSU

Segundo informações fornecidas pelos técnicos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Carapebus, é coletada, mensalmente, uma média de 500 t de resíduos sólidos urbanos no município. No entanto, não se pôde obter informações oficiais acerca da quantidade de resíduos gerados por região.

De acordo com D' Almeida et al. (2000), subdividir a cidade em regiões homogêneas em termos de geração de lixo per capita e de uso e ocupação do solo facilitam o serviço de coleta. Desta forma, visando contornar a ausência dessas informações, fez-se a estimativa descrita a seguir.

A Planilha de Indicadores de 2017 do SNIS informa que a massa de Resíduo Sólido Domiciliar mais Resíduos Sólidos Públicos (RDO+RPU) per capita coletados no município em relação à população urbana é de 1,49 kg/hab.dia. Desses, 1,14 kg/hab.dia é de resíduo domiciliar (RDO), valor este adotado neste estudo para fins de dimensionamento da geração de resíduos recolhidos em cada região da cidade. Desconsiderou-se o RPU neste dimensionamento uma vez que a coleta destes resíduos ocorre a partir de outro sistema de coleta.

Para quantificar os habitantes em cada região da cidade, obteve-se, a partir do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), o mapa de densidade demográfica por região administrativa no município, contendo a quantidade de habitantes e residências em cada subdistrito (Figura 17). A partir destes valores de habitantes, associado ao valor de geração de RDO adotado, foi possível obter a quantidade de resíduo sólido domiciliar

gerada por região administrativa e a quantidade total diária produzida na cidade, conforme pode ser visualizado na Tabela 8.

Tabela 8. Número de residências, habitantes e quantidade de resíduo gerado por região administrativa em Carapebus, RJ.

Regiões Administrativas	Setor	Quantidade de casas	Número de habitantes	Geração de RSD	
				Por setor (kg/dia)	Por região (kg/dia)
CENTRO	1	337	1013	1157,1	9.317,22
	2	231	778	886,92	
	3	190	402	458,28	
	4	156	423	482,22	
	5	259	899	1024,86	
	6	341	924	1053,36	
	7	222	621	707,94	
	8	228	694	791,16	
	9	210	560	638,4	
	10	288	753	858,42	
	11	36	72	82,08	
	12	45	84	95,76	
	13	85	127	144,78	
	14	30	40	45,6	
	15	101	201	229,14	
	16	15	21	23,94	
	17	225	561	639,54	
UBÁS	1	207	667	760,38	3.784,80
	2	429	1157	1318,98	
	3	266	787	897,18	
	4	88	143	163,02	
	5	94	183	208,62	
	6	68	189	215,46	
	7	27	36	41,04	
	8	54	158	180,12	
RODAGEM	1	113	262	298,68	1.992,72
	2	256	619	705,66	
	3	118	283	322,62	
	4	208	584	665,76	
PRAIA DE CARAPEBUS	1	195	39	44,46	134,54
	2	18	66	75,24	
	3	1	13	14,82	
Total		5.185	13359	15.229,26	

Conclui-se que uma média de 15,23 toneladas de RSD são geradas diariamente no município atualmente, resultando em, aproximadamente, 456,8 t mensais (considerando 30 dias), próximo ao valor informado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente.

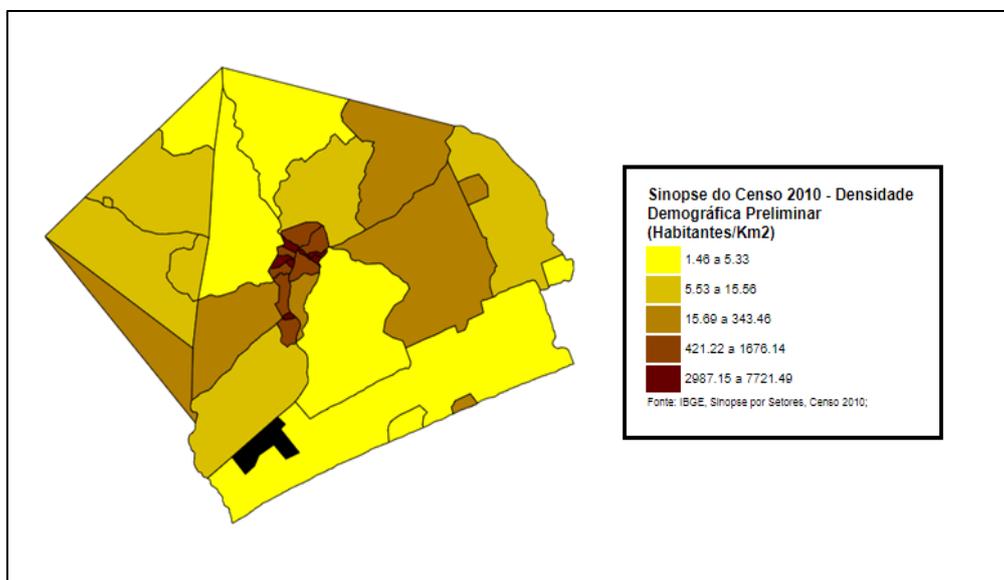


Figura 17. Densidade demográfica por região administrativa no município de Carapebus-RJ.

Fonte: IBGE Cidades (2010).

3.2.1 Sistema Viário

Visando realizar o roteamento dos serviços de coleta de lixo domiciliar, buscou-se obter a malha viária georreferenciada do município. Para isto, obteve-se uma base viária georreferenciada inicial a partir do site OpenStreetMap.org. Em seguida, comparou-se esta base com imagens de satélite a partir do Google Earth, visando verificar a necessidade de atualização da base, além da complementação de informações, como o sentido das vias e cruzamentos. Assim, obteve-se a malha viária ilustrada na Figura 18. No caso de vias com canteiro central, a representação gráfica é de dois arcos paralelos próximos. Para esses casos, avaliou-se se a coleta poderia ser realizada simultaneamente nas duas vias ou se necessitaria a passagem em ambas as vias.

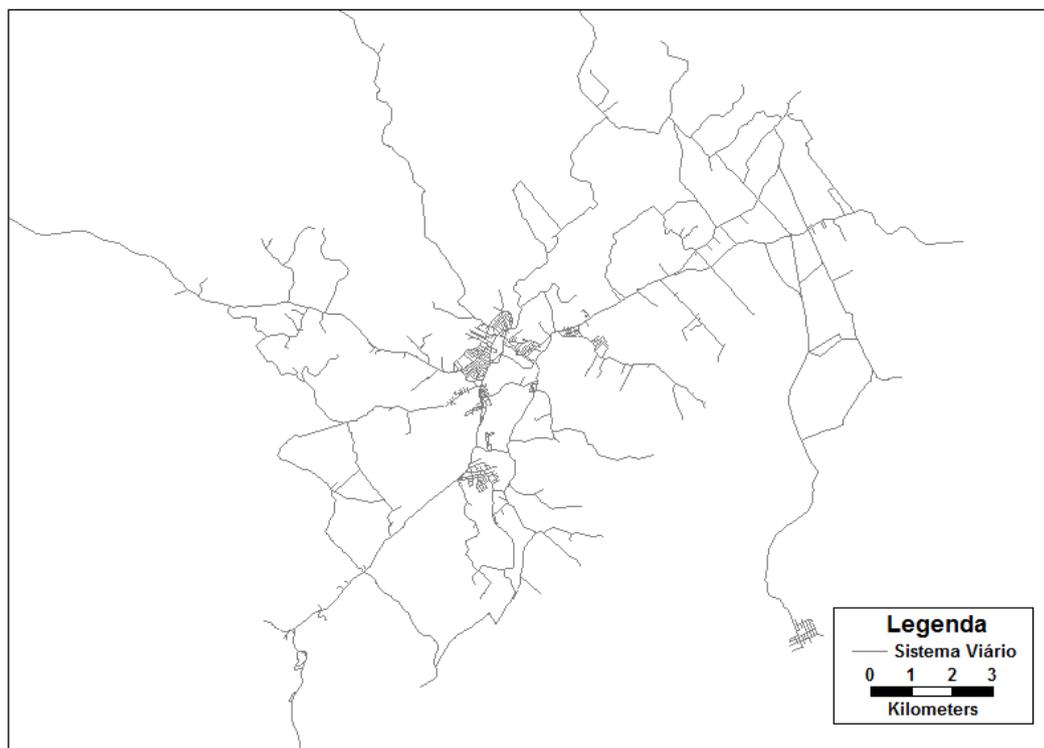


Figura 18. Sistema Viário Georreferenciado do Município de Carapebus, RJ.

Fonte: Extraído de OpenStreetMap.org

3.3 Elaboração dos Cenários

Visando analisar diferentes alternativas à situação atual do manejo de resíduos sólidos da cidade de Carapebus, a partir dos dados coletados e levantados na etapa anterior, foram criados diferentes cenários de avaliação, alterando-se desde o sistema de coleta e transporte dos resíduos até a destinação final. A aplicação desta metodologia pode servir como referencial para a elaboração do planejamento estratégico de políticas públicas voltadas para esse setor. Esta seção detalha os cenários de avaliação desenvolvidos, bem como as hipóteses e estimativas assumidas no processo de elaboração.

3.3.1 Cenário 0 – Sistema atual de coleta

Visando comparar as alternativas propostas neste estudo para o sistema de manejo de RSU no município de Carapebus – RJ com a situação atual e, assim, avaliar os impactos decorrentes, fez-se necessário, inicialmente, reproduzir o sistema atual de coleta de lixo do município. Este foi denominado de *Cenário 0*.

Como não foi possível obter informações precisas do sistema atual, como as reais distâncias percorridas e itinerário realizado, buscou-se estimar estas informações a partir da simulação desse cenário a partir dos dados levantados neste trabalho. Desta forma, utilizando-se o cronograma de atendimento das regiões (apresentado na Tabela 7) e a disponibilidade e capacidade dos veículos coletores, criou-se as demandas diárias previstas para a coleta de lixo no município.

O Cenário 0 é caracterizado pelo sistema porta-a-porta de coleta, no qual o lixo é recolhido de casa em casa, obrigando o caminhão coletor a passar por todas as vias que possuem residência. Esse sistema é identificado como um problema de roteamento por arcos, uma vez que se busca encontrar uma rota que percorra todos os arcos (vias) uma única vez, minimizando a distância total percorrida e, conseqüentemente, os custos de travessia.

3.3.2 Cenário 1 - Reestruturação das Rotas

Neste cenário, buscou-se avaliar os possíveis impactos ao propor um estudo de otimização e planejamento das rotas para a coleta de resíduos do município mantendo-se a característica atual do sistema de coleta porta-a-porta (roteamento por arco).

Durante a coleta e análise de dados, constatou-se que o caminhão coletor por vezes se dirigia para o aterro sanitário sem que atingisse a capacidade máxima ou, em outros casos, retornava para a garagem com o caminhão parcialmente carregado para evitar as viagens ao aterro. Por conta disso, o intuito deste cenário foi eliminar viagens ao aterro sanitário sem que o caminhão coletor atingisse a capacidade máxima.

Para isso, realizou-se uma otimização das rotas a partir do balanceamento da frequência de coleta nos bairros e alterando a disposição dos bairros atendidos. Outra modificação foi na capacidade dos caminhões coletores: considerou-se 1 (um) caminhão com capacidade para 7.500kg e 2 (dois) com capacidade para 6.500 kg de resíduo, de forma que, ao fim de cada rota, os caminhões atingissem a capacidade ideal.

Dessa forma, o veículo de maior capacidade recolheria exclusivamente os resíduos referentes a rota da coleta noturna, que possui maior demanda. A nova programação para as rotas é demonstrada na Tabela 9.

Tabela 9. Programação das rotas para o Cenário 1.

Dias da semana	Rotas	Turno
Segunda a sábado	Centro e Ubás	Noite
Segunda, quarta e sexta-feira	Oscar Brito, Baixada e Praça Cordeiro	Manhã
Somente sexta-feira	Praia e Boa vista	Manhã
Terça, quinta e sábado	Sapocado, Caxanga, Santa Tereza e Barreiros	Manhã

Fonte: Elaborado pela autora.

Optou-se por manter a coleta noturna com a rota pelos bairros Centro e Ubás por se tratar de regiões que possuem maior concentração de pontos comerciais. Para esses locais, a coleta noturna é mais recomendada, uma vez que evita a concentração de lixo nas calçadas durante o dia e facilita para os comerciantes, que costumam realizar a limpeza dos estabelecimentos no período da tarde/noite. Entretanto, foi excluída a coleta nesses bairros no turno da manhã.

Visando garantir maior periodicidade a coleta, considerou-se sua realização em dias alternados nos demais bairros, exceto para os bairros Praia e Boa Vista, que possuem pouca geração diária.

3.3.3 Cenário 2 - Reformulação do sistema de coleta (ETT e PEVs)

Neste cenário, a abordagem de coleta do município foi reformulada, visando reduzir as extensões dos percursos e o tempo de coleta. De forma geral, buscou-se eliminar tanto a necessidade de o caminhão coletor transportar os resíduos diretamente para o aterro sanitário, a partir da implantação de uma Estação de Transbordo e Triagem (ETT), quanto a necessidade de percorrer todas as vias, considerando-se a instalação de PEVs.

Este cenário prevê duas abordagens, identificadas como *Cenário 2A* e *Cenário 2B*. O Cenário 2A engloba as mudanças previstas, porém sem a implantação da coleta seletiva. Já no Cenário 2B, insere-se a coleta seletiva, como detalhado a seguir.

3.3.3.1 Cenário 2A: Implantação de ETT e PEVs

O objetivo deste cenário consiste em analisar a redução no tempo e distância do sistema de coleta, considerando a implantação da ETT e a mudança no sistema de coleta porta-a-porta para o modelo por PEVs. Visando realizar comparações com os outros cenários, manteve-se a programação das rotas adotadas para o Cenário 1, alterando-se apenas o local da garagem e do destino final do caminhão coletor para a ETT. O intuito da implantação da estação de transferência com triagem é possibilitar a separação dos materiais do fluxo de resíduos e identificar quaisquer outros resíduos que possam ser inadequados para eliminação, mesmo em cidades que não contam com coleta seletiva.

Para a realização da coleta por PEVs, também foi necessário definir a localização dos pontos destinados à entrega dos resíduos pela população. Para isso, levou-se em conta os fatores apresentados na revisão bibliográfica que podem influenciar significativamente a participação das pessoas nesse sistema de coleta (número de PEVs e a distância entre os usuários e os pontos de entrega). Considerou-se, neste trabalho, os PEVs localizados nas interseções viárias, de modo que a distância entre os PEVs fosse, no mínimo, 75 metros. Essa distância foi definida de forma a não gerar grandes distâncias entre a população e os PEVs, evitando a não participação da população na disposição do lixo nos locais corretos, mas sim servindo como estímulo para aderirem ao sistema (principalmente quando houver coleta seletiva, a ser tratado no próximo cenário), já que os moradores podem não estar habituados a esse tipo de coleta, uma vez que o sistema atual (porta-a-porta) permite a disposição do lixo logo em frente às residências.

3.3.3.2 Cenário 2B: Implantação de ETT, PEVs e Coleta Seletiva

Além das modificações citadas anteriormente, este cenário considera a implantação da coleta seletiva de forma gradativa no município, representando a participação da sociedade na separação do lixo. Assim, almeja-se analisar a relação entre o percentual de participação da população na coleta seletiva e a redução no volume total de resíduos encaminhados para o aterro sanitário, avaliando-se o quanto essa redução pode impactar nos roteiros de coleta.

Para saber quais seriam as demandas diárias de materiais recicláveis no município, adotou-se a estimativa da composição gravimétrica dos resíduos gerados nos municípios do estado do Rio de Janeiro em função da população (pequeno, médio e grande porte), apresenta na Tabela 3. Para Carapebus, a taxa é de 36,49% de materiais recicláveis,

segundo o PERS-RJ. Em seguida, adotou-se a hipótese de que, inicialmente, 20% da população participaria do programa de coleta seletiva. Com o passar do tempo e conscientização da população, este valor aumentaria, gradativamente, para 40%, 60%, 80% e 100% (cenário mais otimista).

A implantação da coleta seletiva para o município foi idealizada da seguinte forma: os PEVs seriam implantados sempre em pares, um para os resíduos úmidos e outro para os resíduos secos (recicláveis); o caminhão compactador passaria recolhendo os resíduos úmidos (coleta convencional) e 2 (duas) vezes na semana ocorreria a coleta seletiva, com uma carroceria adaptada ao caminhão coletor (Figura 19), não havendo assim necessidade de um novo caminhão e de rotas específicas para a coleta seletiva.



Figura 19. Esquema de coleta seletiva com carroceria adaptada.

Fonte: PMSB de Canas.

Posteriormente, os resíduos seriam encaminhados à Estação de Transbordo e Triagem, no qual os resíduos secos passariam por um processo de separação e reciclagem para serem beneficiados, enquanto os úmidos seriam encaminhados para o aterro sanitário.

Este cenário é considerado ideal, pois há a prévia separação dos resíduos na própria fonte geradora, acarretando reduções de resíduos enviados para o aterro sanitário, agilidade ao processo de triagem e oferecendo melhores condições de trabalho aos catadores.

3.3.3.3 Localização e Capacidade da Estação de Transbordo e Triagem

Para realizar as simulações considerando as alterações do Cenário 2 foi necessário determinar um local para instalação da ETT. O critério para a escolha do local levou em

consideração os estudos de British Columbia, 2010 e USEPA, 2002 (apud Pereira, 2013), descritos a seguir:

- Exigência de área: o local escolhido deve ter área suficiente para atender a demanda atual e futura;
- Zoneamento: O local escolhido deve estar de acordo com o zoneamento local em relação ao uso da terra, e a construção de alturas e recuos. O zoneamento residencial pode ser aceito em áreas com lotes grandes, porém nesse caso, é necessário verificar se a estação é aceita pelos moradores.
- Localização central das rotas de coleta: De forma a maximizar a eficiência de coleta, as estações de transferência devem estar localizadas em áreas centrais às rotas de coleta. Como regra geral, as estações devem estar localizadas a uma distância não superior a 16 km a partir do final de todas as rotas de coleta.
- Acesso às rotas principais de transporte: O local escolhido para a estação deve ter acesso direto e fácil de rotas de caminhão, principais vias arteriais e rodovias.

A localidade escolhida possui 22,1 mil m² e é denominada informalmente pela Prefeitura do Município de “bota-fora”, pois é atualmente utilizada para disposição de resíduos considerados inertes, como os oriundos de poda de árvore, varrição e resíduos da construção civil. (Figura 20). A localidade tem uma área que atende as demandas atuais e futuras de RSU, está próxima às rotas centrais de coleta e possui acesso fácil à RJ-182, via que dá acesso ao aterro sanitário. Vale ressaltar que a estação pode ser projetada para receber e estocar a demanda de um, dois ou mais dias, considerando a capacidade da carreta ou caminhão *roll on roll off* adotado, e a relação custo-benefício.

Embora este trabalho considere apenas os benefícios logísticos da instalação da ETT, para fins de comparação com os demais cenários, considerou-se um pior cenário, em que a ETT possua capacidade para apenas um dia de armazenamento, ou seja, é necessária uma viagem diária ao aterro sanitário, o que dá uma distância de 69,5 km (considerando ida e volta). Neste caso, o traslado da ETT para o aterro poderia ser realizado com caminhão *roll on roll off* com capacidade para 18t.

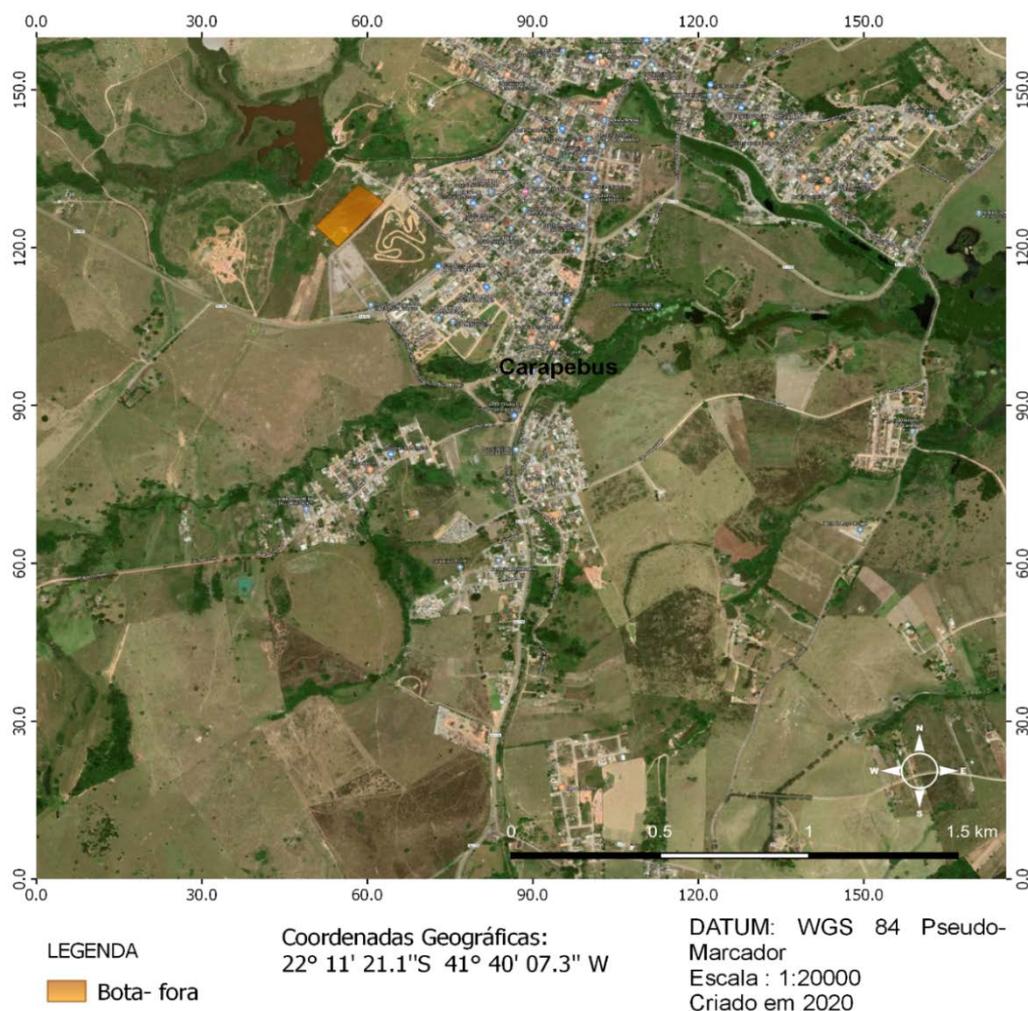


Figura 20. Localização do bota fora em Carapebus.

3.4 Avaliação dos cenários: modelagem e simulação

Diante dos cenários elaborados e apresentados anteriormente, esta etapa do trabalho consistiu em avaliá-los, buscando identificar os impactos de cada um para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Carapebus-RJ no que tange à estimativa dos custos com transporte, emissões ambientais e quantidade de RSU destinados para o aterro sanitário.

O software TransCAD possui um módulo específico que resolve diversos tipos de problemas de roteamento de veículos, atuando na fase preliminar de preparação dos dados, na resolução do problema de roteamento e programação de veículos e na elaboração de rotas, tanto na forma de relatórios quanto na forma gráfica (NETO E LIMA,

2005 apud PAULA, 2009). Para resolver o problema de roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos urbanos no TransCAD, foi preciso seguir os seguintes passos:

- Criar camadas com informações georreferenciadas (*layers*) do sistema viário do município, com a localização das regiões administrativas;
- Incluir direção das vias, quantidade de resíduos gerados e identificação das vias a serem servidas pelo serviço de coleta de RSU;
- Estabelecer as características e propriedades dos veículos usados (capacidade máxima que o veículo transporta, frota disponível, identificação do depósito e local de descarga dos veículos);
- Aplicar rotinas de roteamento a partir do sistema de coleta adotado;
- Gerar relatórios que contenham o itinerário, distâncias percorridas e total de resíduo coletado por cada veículo; e
- Gerar mapas com a exposição das rotas.

3.4.1 Preenchimento da Base de dados

Para o início deste trabalho, concentrou-se em traçar a rede viária da cidade a partir do mapa viário de Carapebus, extraído do site OpenStreetMap.org. Este mapa continha algumas informações referentes a cada link, tais como: número identificador (ID), comprimento (*length*), nome do logradouro e região administrativa. Porém, também se fez necessário atualizar essa base para incluir informações sobre o sentido das vias e ruas servidas pelo sistema de coleta de lixo, conforme mostra a Figura 21.

Quanto ao sentido das vias (campo *dir*), 0 (zero) indica que a rua permite movimentação de veículos nos dois sentidos (mão dupla), 1 (um) indica que o sentido do fluxo coincide com a direção topológica da via e -1 (menos 1) indica que o sentido do fluxo é contrário à direção topológica da via. Por direção topológica da via, entende-se a direção em que o link (via) é construído: ao ser desenhado, o link é construído de um nó inicial A para um nó final B, resultando no sentido topológico de A para B. O campo *Coleta* representa as ruas atendidas pelo serviço de coleta de lixo, no qual o número 1 (um) indica que a via é atendida e o número 0 (zero) indica que o link não é atendida. O campo *Zona* indica o bairro no qual aquela rua pertence. Portanto, as vias sem zona

(ilustradas em preto na Figura 22) não fazem parte do município de Carapebus - RJ, mas são percorridas no percurso ao aterro sanitário.

ID	Length	Dir	NAME	Zona	COLETA	L
18	3.23	0		3097	1	
22	2.42	0		3099	1	
36	0.69	0		3098	1	
44	0.14	0	RJ-182	3099	1	
55	0.19	0		3097	1	
90	0.27	0		3101	1	
93	0.25	0		3101	1	
105	0.48	0		2982	1	
147	7.50	0		2980	1	
49	16.47	0	RJ-182	--	0	
66	4.93	0	RJ 182	--	0	
68	2.08	0	Estrada Osório Bersot	--	0	
71	0.26	0	Rua Cel Etelvino Da Silva Gome	--	0	
87	0.13	0	Avenida Victor Sence	--	0	
67	3.33	0	Estrada da Gaivota	--	0	
65	0.10	0	RJ-182	--	0	
69	0.23	0		--	0	
76	0.68	0	Rua Coronel Castro	--	0	

Figura 21. Base de Dados do sistema viário de Carapebus.

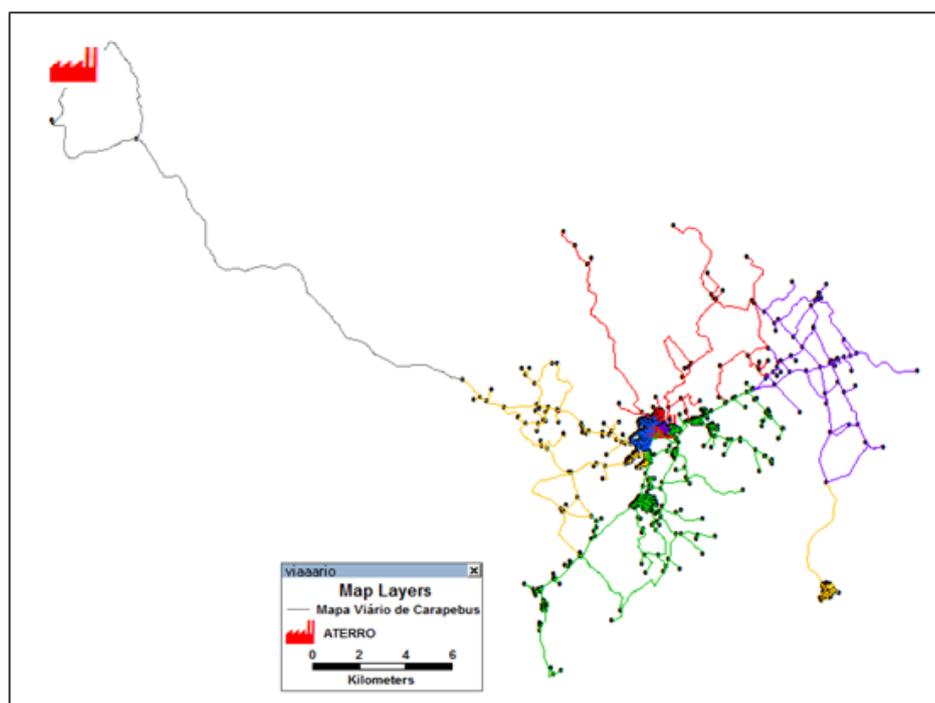


Figura 22. Mapa Viário de Carapebus com divisões dos bairros.

Após o preenchimento da base de dados, partiu-se para a aplicação das rotinas de roteamento. Os sistemas de coleta a serem analisados, segundo Roviriego (2005), utilizam rotinas baseadas em procedimentos numéricos de pesquisa operacional. Essas rotinas são aplicadas de forma a definir algumas variáveis espacialmente, como localização das lixeiras, determinação da quantidade de resíduo a ser coletado em cada ponto e

determinação do caminho ótimo para o recolhimento dos resíduos. Portanto, cada uma das rotinas necessita de informações específicas na base de dados, que serão mencionadas a seguir.

3.4.2 Roteamento em arcos: coleta porta-a-porta

Para o sistema de coleta porta-a-porta foi utilizada a rotina de roteamento em arco (*arc routing*). Neste, todas as vias (*links*) são percorridas pelos veículos coletores, já que os pontos de coleta se localizam ao longo das vias. Esse problema se assemelha ao Problema do Carteiro Chinês, que busca encontrar uma rota que percorra todos os arcos pelo menos uma vez, minimizando a distância total percorrida. A Tabela 10 e 11 apresentam a configuração e os campos a serem preenchidos na base de dados dos arquivos geográficos de pontos e linhas para utilização da rotina de roteamento em arcos.

Tabela 10. Campos a serem preenchidos na base de dados do arquivo geográfico de pontos.

Campo	Tipo	Função
ID	Inteiro	Registro que identifica a camada de pontos
Nome	Caracteres	Utilizado para identificar a Garagem e o Aterro Sanitário.

Tabela 11. Campos a serem preenchidos na base de dados do arquivo geográfico de linhas.

Campo	Tipo	Função
Service Flag*	Inteiro	Registro que identifica o arco no qual o serviço de coleta é requerido e o setor da coleta ao qual o arco pertence.
Service Time	Real	Tempo, em minutos, para o veículo atravessar o arco, quando realiza a coleta.
Deadhead Time	Real	Tempo, em minutos, para o veículo atravessar o arco quando não realiza a coleta.
Capacidade do veículo	Real	Quantidade máxima de resíduo a ser coletado em função da capacidade do veículo.
Demanda	Real	Quantidade de Resíduo a ser coletado em cada arco.

Os campos apresentados na Tabela 11 foram preenchidos da seguinte forma:

- Service Flag: esse campo é representado na base de dados por um par de informações (Service Flag AB/BA), que indicam o sentido em que a via deve ser atravessada para realizar o atendimento: AB – sentido da via, BA – sentido contrário à via. Esse campo também pode representar o setor de coleta que a via pertence.
- Service Time: tempo gasto para percorrer o link em função da velocidade de deslocamento, representando o custo de deslocamento nos arcos quando atendidos pelo serviço de coleta. Para o cálculo, aplicou-se a seguinte equação (a velocidade adotada de 6km/h foi baseada no trabalho de Castro, 2006):

$$Tempo = \frac{Deslocamento}{Velocidade} \rightarrow Service\ Time = \frac{Lenght}{6km/h} * 60$$

- Deadhead Time: define o custo de deslocamento nos arcos quando o link não é atendido pelo serviço de coleta. De forma análoga ao *Service Time*, o custo foi ajustado com base no tempo e velocidade de deslocamento. Porém, nesse caso, a velocidade utilizada foi de 40km/h, que representa a velocidade máxima indicada nos trechos avaliados.

$$Deadhead\ Time = \frac{Lenght}{40km/h} * 60$$

- Capacidade do Veículo: carga máxima de trabalho, ou seja, a capacidade máxima que o veículo coletor de lixo suporta. Para este trabalho, foram adotados veículos com 6,5 t e 7,5 t, correspondentes a 13 m³ e 15 m³, respectivamente.
- Demanda: quantidade de resíduo a ser coletada na via. A demanda de coleta por arco foi estimada a partir da multiplicação do comprimento do arco (d_{via}) pelo fator de demanda por quilômetro da região administrativa, calculado a partir da razão entre a quantidade total de resíduo produzido na região administrativa (Q_{RegAdm}), indicado na Tabela 9, e a soma dos comprimentos de vias atendidas pelo sistema de coleta na mesma região administrativa ($\sum_{i=RegAdm} d_{via_i}$).

$$Q_{via} = \frac{Q_{RegAdm}}{\sum_{i=RegAdm} d_{via_i}} * d_{via}$$

A Figura 23 ilustra a base de dados dos arquivos geográficos de linhas para o modelo porta-a- porta

Dataview14 - Mapa Viário de Carapebus													
ID	Length	Dir	COLETA	REAL LENGT	ZONA	AB_SERVICE	BA_SERVICE	SPEED	AB_TIME_MIN	BA_TIME_MIN	LIXO_KM	DEMANDA_DIARIA	VEI_CAPACI
5	0.19	0	1	0.185950	3097	4	0	6.0000	1.8595	0.2789	10.161899	1.889605	6500.000000
61	0.19	0	1	0.188210	3098	4	0	6.0000	1.8821	0.2823	14.737528	2.773751	6500.000000
602	0.24	0	1	0.241723	3098	4	0	6.0000	2.4172	0.3626	14.737528	3.562396	6500.000000
564	0.30	0	1	0.297438	3098	4	0	6.0000	2.9744	0.4462	14.737528	4.383503	6500.000000
62	0.24	0	1	0.240580	3098	4	0	6.0000	2.4058	0.3609	14.737528	3.545561	6500.000000
63	0.45	0	1	0.452180	3099	1	0	6.0000	4.5218	0.6783	27.485322	12.428311	6500.000000
66	0.59	0	1	0.591707	3100	1	0	6.0000	5.9171	0.8876	6.530692	3.864253	6500.000000
67	0.33	0	1	0.330338	2983	1	0	6.0000	3.3034	0.4955	3.890086	1.295043	6500.000000
554	1.43	0	1	1.427281	3099	1	0	6.0000	14.2728	2.1409	27.485322	39.229269	6500.000000
557	0.31	0	1	0.305739	3100	1	0	6.0000	3.0574	0.4586	6.530692	1.996688	6500.000000
558	0.58	0	1	0.579361	3100	1	0	6.0000	5.7936	0.8690	6.530692	3.783631	6500.000000
559	1.68	0	1	1.676557	3100	1	0	6.0000	16.7656	2.5148	6.530692	10.949077	6500.000000
570	0.53	0	1	0.529619	2983	1	0	6.0000	5.2962	0.7944	3.890086	2.060265	6500.000000
573	1.22	0	1	1.215082	2982	1	0	6.0000	12.1508	1.8226	8.941266	10.864369	6500.000000
552	0.32	0	1	0.315277	3099	1	0	6.0000	3.1528	0.4729	27.485322	8.665493	6500.000000
551	1.08	0	1	1.083317	2983	1	0	6.0000	10.8332	1.6250	3.890086	4.214197	6500.000000
69	0.31	0	1	0.310433	3099	1	0	6.0000	3.1043	0.4656	27.485322	8.532358	6500.000000
70	19.85	0	0	0.000000	3095	0	0	40.0000	29.7708	29.7708	--	--	6500.000000
71	0.58	0	1	0.581355	2983	1	0	6.0000	5.8136	0.8720	3.890086	2.261522	6500.000000
72	1.07	0	1	1.073822	3099	1	0	6.0000	10.7382	1.6107	27.485322	29.514351	6500.000000
553	0.82	0	1	0.822927	3099	1	0	6.0000	8.2293	1.2344	27.485322	22.618405	6500.000000
569	0.31	0	1	0.311045	2983	1	0	6.0000	3.1104	0.4666	3.890086	1.209990	6500.000000
64	1.47	0	1	1.469645	2982	1	0	6.0000	14.6965	2.2045	8.941266	13.140489	6500.000000
73	1.60	0	1	1.596310	3100	1	0	6.0000	15.9631	2.3945	6.530692	10.425006	6500.000000
562	1.22	0	1	1.222122	2982	1	0	6.0000	12.2212	1.8332	8.941266	10.927317	6500.000000
75	0.22	0	1	0.218575	3100	1	0	6.0000	2.1858	0.3279	6.530692	1.427447	6500.000000
560	0.29	0	1	0.287991	3100	1	0	6.0000	2.8799	0.4320	6.530692	1.880782	6500.000000
76	0.36	0	1	0.360494	3100	1	0	6.0000	3.6049	0.5407	6.530692	2.354275	6500.000000
38	1.24	0	1	1.239718	3098	1	0	6.0000	12.3972	1.8596	14.737528	18.270385	6500.000000

Figura 23. Base de dados dos arquivos geográficos de linha para o modelo de coleta porta-a-porta.

Após a configuração dos dados de entrada, a rotina de roteamento em arco foi aplicada, tendo como objetivo minimizar a extensão total percorrida pelos caminhões de coleta, gerando relatórios de itinerário e rotas, contendo distâncias totais percorridas, tempo gasto nos percursos e volume total de resíduo coletado.

Um dos problemas observados ao realizar essa rotina foi no deslocamento do veículo coletor até o local de disposição final (aterro sanitário), uma vez que o software considera como ponto de fim da rota o mesmo ponto de início, no caso a garagem da Prefeitura Municipal. Ou seja, o veículo parte da garagem, percorre todo o setor de coleta e retorna à garagem. Esta não é a situação real, visto que ao completar a carga ou percorrer todo o setor de coleta, o veículo deve descarregar no aterro sanitário e depois continuar a coleta. Visando contornar este problema, foi utilizado, manualmente, o procedimento de caminhos mínimos (*Shortest Paths*) para estimar a distância entre o último ponto atendido pelo caminhão coletor e o aterro sanitário e, posteriormente, essa distância incluída na extensão das rotas, tanto para a ida quanto a volta do veículo entre o aterro e a garagem. Por fim, desconta-se a distância entre o setor de coleta e a garagem adotado pelo programa. A Figura 24 ilustra o procedimento de caminhos mínimos.

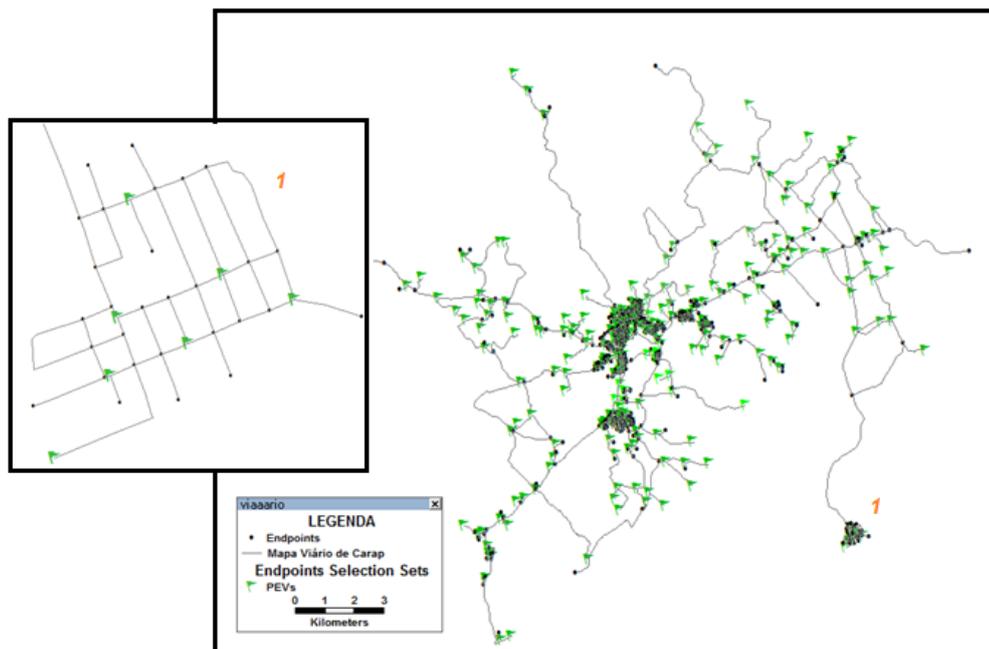


Figura 25. Localização dos PEVs utilizando a rotina *facility location*.

Definido os pontos de instalação de PEVs, a partir das restrições impostas neste trabalho, o passo seguinte consistiu na aplicação da rotina de roteamento de veículos (*vehicle routing*) para a coleta do lixo depositados nestes pontos. Esta abordagem de roteamento tem características similares ao Problema do Caixeiro Viajante, no qual deseja-se minimizar o trajeto percorrido para se coletar os resíduos alocados em pontos específicos. Para a aplicação da rotina *vehicle routing*, fez-se necessário definir e estimar os seguintes parâmetros:

- *Depot*: campo configurado com o ID da estação de transbordo e triagem, correspondendo ao local no qual deveria encaminhar o resíduo recolhido em determinado PEV.
- *Open e Close*: indica o tempo de abertura e fechamento do depósito. Foram utilizados intervalos grandes para que este campo não interferisse no itinerário. No entanto, foram respeitadas as cargas diárias de trabalho.
- *Fixed time*: tempo mínimo perdido em cada parada de carregamento do caminhão coletor. Foi adotado um valor fixo de 1,5 minutos em cada parada.
- *Time Per Unit*: tempo gasto no carregamento de acordo com a quantidade de lixo coletado. O valor usado foi de 0,01min/kg.

Os dois últimos campos (*fixed time* e *time per unit*) são importantes para a estimativa do tempo total gasto em cada parada de coleta, dado pela equação a seguir.

$$\text{Tempo em cada parada} = \text{Fixed time} + (\text{Time per unit}) * \text{demanda do PEV}$$

A Figura 26 e Figura 27 ilustram os dados inseridos nas bases de dados geográfica de pontos para aplicação da rotina de roteamento por nó, enquanto que a Figura 28 ilustra os dados inseridos na base de dados do arquivo geográfico de linhas.

Dataview1 - deposito_paradas									
ID	DATA	LONGITUDE	LATITUDE	ATENDIDO	BAIRRO	LIXEIRA	NOME	CAPACIDADE_VEI	DEMANDA
4953	328	-41673914	-22192030	1	SANTA TERE	1	PARADAS	--	62.8900
4961	331	-41673221	-22189415	1	SANTA TERE	1	PARADAS	--	62.8900
4969	344	-41674958	-22184189	1	SANTA TERE	1	PARADAS	--	62.8900
4977	832	-41670831	-22199138	1	SANTA TERE	1	PARADAS	--	62.8900
4985	363	-41669004	-22197387	1	SANTA TERE	1	PARADAS	--	62.8900
4993	347	-41668495	-22196397	1	SANTA TERE	1	PARADAS	--	62.8900
5001	833	-41666827	-22196684	1	SANTA TERE	1	PARADAS	--	62.8900
5009	271	-41668312	-22192552	1	OSCAR BRIT	1	PARADAS	--	401.9400
5017	334	-41666563	-22192859	1	OSCAR BRIT	1	PARADAS	--	401.9400
5025	887	-41668584	-22189339	--	--	--	DEPOSITO E.T.T	6500.0000	--
5033	335	-41664971	-22191645	1	OSCAR BRIT	1	PARADAS	--	401.9400
5041	301	-41665447	-22190310	1	OSCAR BRIT	1	PARADAS	--	401.9400
5049	376	-41665267	-22189187	1	CENTRO	1	PARADAS	--	191.0500
5057	372	-41666620	-22187883	1	CENTRO	1	PARADAS	--	191.0500
5065	812	-41664558	-22187250	1	CENTRO	1	PARADAS	--	191.0500
5073	860	-41665611	-22184259	1	CENTRO	1	PARADAS	--	191.0500
5081	310	-41664601	-22185518	1	CENTRO	1	PARADAS	--	191.0500
5089	177	-41663149	-22214174	1	UBAS	1	PARADAS	--	52.8300

Figura 26. Base de dados do arquivo geográfico de pontos que contém informações das paradas e do depósito.

Dataview5 - Endpoints										
ID	Longitude	Latitude	ATENDIDO	BAIRRO	LIXEIRA	DEPOT	OPEN	CLOSE	FIXED_TIME	TIME_PER_UNIT
54	-41707410	-22249807	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
761	-41706913	-22248306	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
76	-41702010	-22245031	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
78	-41701425	-22244822	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
77	-41702111	-22243199	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
79	-41699723	-22246884	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
74	-41695774	-22240145	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
4	-41698580	-22218670	1	SANTA TERE	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
45	-41698926	-22218006	1	SANTA TERE	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
47	-41698129	-22218769	1	SANTA TERE	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
46	-41696971	-22216415	1	SANTA TERE	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
73	-41697346	-22239827	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
81	-41694615	-22238794	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
80	-41695400	-22238380	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
3	-41691299	-22236290	1	SANTA TERE	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
1	-41690934	-22236054	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
82	-41690644	-22235845	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
83	-41690925	-22234604	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
2	-41674164	-22257327	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
75	-41686173	-22220712	1	SANTA TERE	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
48	-41692124	-22213677	1	SANTA TERE	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
9	-41686138	-22229507	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
10	-41684733	-22228454	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
84	-41685173	-22226470	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01
85	-41684193	-22225036	1	UBAS	0	--	700.00	1800.00	0.00	0.00
86	-41684258	-22222720	1	UBAS	1	877	700.00	1800.00	1.50	0.01

Figura 27. Base de dados geográficos da camada de pontos para aplicação da rotina de roteamento por nó.

ID	Length	Dir	SPEED_NO	TIME_MIN_NO	Z
592	0.18	0	30.0000	0.3536	
593	0.63	0	30.0000	1.2657	
594	0.06	0	30.0000	0.1292	
57	0.28	0	30.0000	0.5681	
58	0.43	0	30.0000	0.8638	
595	0.80	0	30.0000	1.6007	
567	0.08	0	30.0000	0.1634	
565	0.05	0	30.0000	0.0955	
36	0.27	0	30.0000	0.5354	
55	0.21	0	30.0000	0.4215	
596	0.19	0	30.0000	0.3829	

Figura 28. Base de dados do arquivo geográfico de linhas para aplicação da rotina de roteamento por nó.

A velocidade adotada para essa rotina foi de 30km/h, com base no trabalho de Roriviego (2005) e o tempo de deslocamento em cada link foi estimado a partir da divisão do comprimento das vias (*length*) pela velocidade no link.

Com todas as informações necessárias para aplicação da rotina, bastou definir as rotas diárias do caminhão coletor. Assim, como no roteamento por arcos, foram extraídas as informações das rotas com itinerários, distâncias percorridas e tempo total gasto no percurso de coleta.

3.5 Síntese da Metodologia

O fluxograma apresentado na Figura 29 ilustra as etapas e propostas para desenvolvimento deste estudo, como apresentado nesta seção da metodologia, permitindo maior compreensão das etapas que foram realizadas.

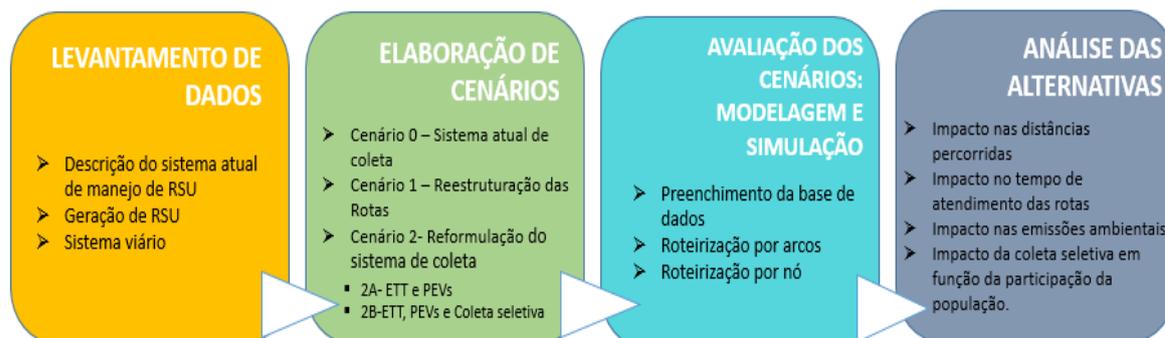


Figura 29. Fluxograma da metodologia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o desenvolvimento da metodologia e a coleta de dados, expostos no capítulo anterior, foi possível identificar, de imediato, problemas logísticos existentes na coleta de lixo do município de Carapebus, como por exemplo, a má distribuição das frequências de coleta nos bairros e as longas distâncias percorridas até o aterro sanitário. Visando elaborar propostas de otimização para este sistema, foram criados dois cenários de avaliação além do Cenário 0, que corresponde à situação atual do sistema de coleta. Neste capítulo, apresenta-se e discute-se os resultados obtidos para cada cenário e seus impactos positivos ou negativos quando comparados ao sistema atual. Os resultados estão divididos em: i) resultados das rotinas de roteamento aplicadas para cada cenário, com quilometragem percorrida, quantidade de resíduo coletado e tempo total gasto no percurso; ii) análise da relação de participação da população na coleta seletiva e redução dos resíduos encaminhados ao aterro sanitário; e; iii) impactos nas emissões de CO₂ nos cenários estudados.

4.1 Resultados das rotinas de roteamento

4.1.1 Cenário 0 – Sistema Atual de Coleta

Inicialmente, simulou-se o Cenário 0, que descreve a situação atual do sistema de coleta do município em estudo. Para este caso, executou-se a rotina de roteamento em arco, uma vez que o sistema atual é porta-a-porta. Foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 12.

A média de quilômetros percorridos diariamente neste cenário é de 515,5km, já incluída a distância percorrida até o aterro. Já a média de resíduos recolhidos chega a 17,63 t/dia. Observa-se que o número de rotas varia entre 1 e 5, sendo que, na maioria dos dias, corresponde a três rotas. Vale ressaltar que, neste cenário, são três veículos disponíveis. Sendo assim, as rotas diárias devem ser atendidas por estes veículos. Atenta-se para a alta solicitação na sexta-feira, que resultou em cinco rotas e, conseqüentemente, cinco viagens ao aterro sanitário no mesmo dia, resultando em um total de 707,98 km percorridos.

Não foi possível obter informações sobre o período de trabalho diário dos catadores e motoristas responsáveis pela coleta de lixo no município de Carapebus. Porém, de acordo com o Ministério do Trabalho do Rio de Janeiro, as jornadas de trabalho

dos agentes de coleta de lixo são de 43 horas semanais, ou 7h e 10 min diários, considerando 6 dias da semana. A partir disso, constata-se que alguns itinerários ultrapassam as 7h de período diário de trabalho se considerado que há apenas um caminhão para cada rota. Essa extrapolação nas horas também pode ser notada nos dias em que há mais rotas, considerando que um caminhão terá que fazer duas das rotas.

É possível observar também que, em algumas situações, as distâncias percorridas dentro do setor de coleta são menores do que as distâncias percorridas até o aterro sanitário, como é o caso da rota 3 de segunda-feira, rota 3 de terça-feira, em todas as rotas da quinta-feira e nas rotas 3,4 e 5 da sexta-feira. Verifica-se, ainda, que o caminhão termina o itinerário sem atingir a capacidade máxima do veículo para as rotas 3 de segunda-feira, rota 3 de terça-feira, rota 1 de quarta-feira, rota 3 de quinta e rota 5 de sexta-feira. Para evitar as idas ao aterro com o caminhão sem atingir a capacidade e, assim, reduzir custos, na maioria das vezes, a Prefeitura opta por retornar para a garagem com o caminhão coletor carregado e terminar de preenchê-lo na coleta do dia seguinte. Porém, essa atitude não é correta, uma vez que, além do mau cheiro gerado, há o vazamento de resíduos, como o chorume, no solo da garagem. As rotas obtidas para esse cenário em cada dia da semana são mostradas nas Figuras de 30 a 35.

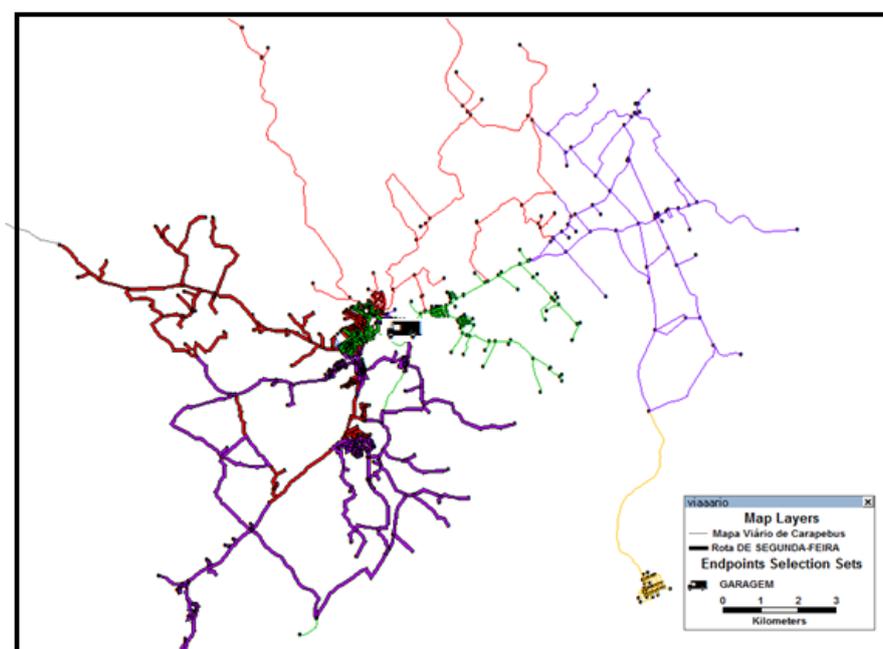


Figura 30. Rota 1, 2 e 3 de segunda-feira separada por cores para o Cenário 0.
Fonte: TransCAD.

Tabela 12. Resultados da rotina de roteamento em arco para o Cenário 0.

Identificação da Rota	Rota	Distância percorrida no setor de coleta (km)	Distância percorrida do setor ao aterro (ida e volta)	Total de lixo recolhido (kg)	Tempo de trabalho (h)	Bairros Servidos
Segunda a Sábado (coleta noturna)	1	122,85km	72,4 km	4.021,12	12,20 h	Centro e Ubás
Segunda-feira	1	81,06km	68,92km	6.484,02	8,94h	Ubás, Oscar Brito, Baixada e Santa Tereza
	2	132,09km	68,73km	6.484,87	13,94h	
	3	16,8km	72,42km	2.455,24	2,03h	
Terça-Feira	1	64,95km	72,42km	6.464,5	6,67h	Sapocado, Centro, Caxanga, Praça Cordeiro e Baixada
	2	63,26km	72,66km	6.456,83	6,68h	
	3	15,59km	72,42km	3.823,41	1,9h	
Quarta-Feira	1	51,65km	72,42km	4.561,27	5,92h	Centro e Baixada
Quinta-feira	1	51,87	72,52	6.426,06	5,31h	Centro, Oscar Brito, Sapocado, Caxanga e Praça Cordeiro
	2	38,94	72,52	6.473,74	4,46h	
	3	31,57	72,42	3.700,5	3,14h	
Sexta-feira	1	99,19	67,06	6.421,43	10,73	Ubás, Oscar Brito, Baixada, Santa Tereza, Barreiros, Boa Vista e Praia
	2	109,91	67,79	6.483,47	11,74	
	3	31,34	72,33	6.494,97	4,13h	
	4	68,85	74,09	6.346,43	6,42	
	5	44,95	72,74	2.593,11	4,63	

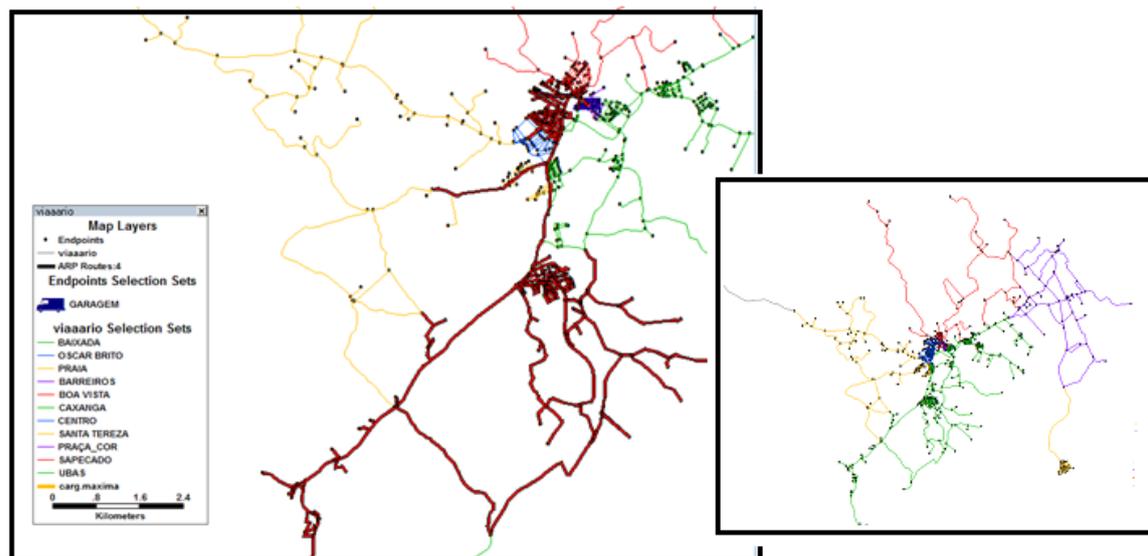


Figura 31. Rota 1 da coleta noturna nos bairros centro e Ubás para o Cenário 0.
Fonte: TransCAD.

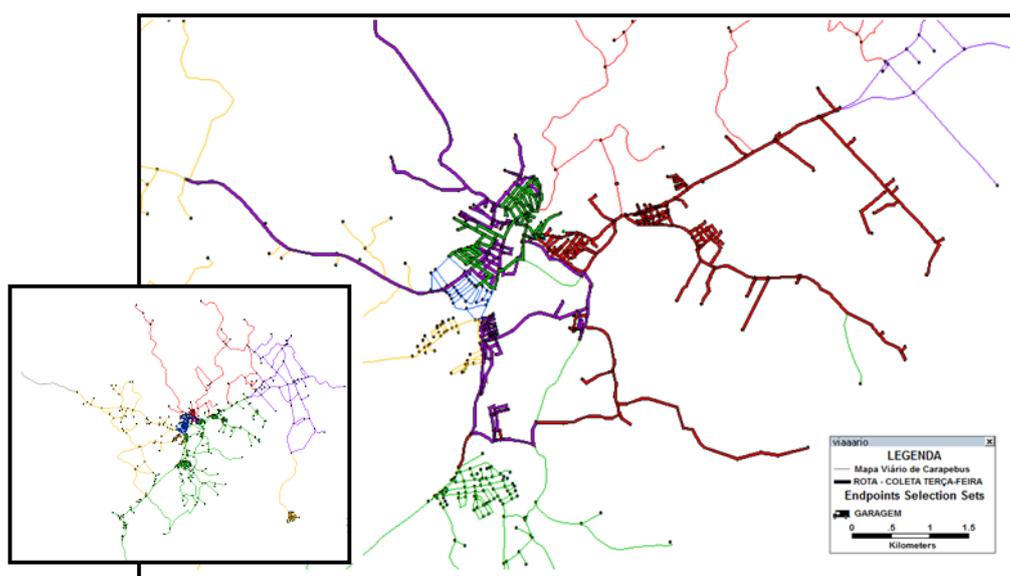


Figura 32. Rotas 1, 2 e 3 de terça-feira separadas por cores considerando o Cenário 0.
Fonte: TransCAD.

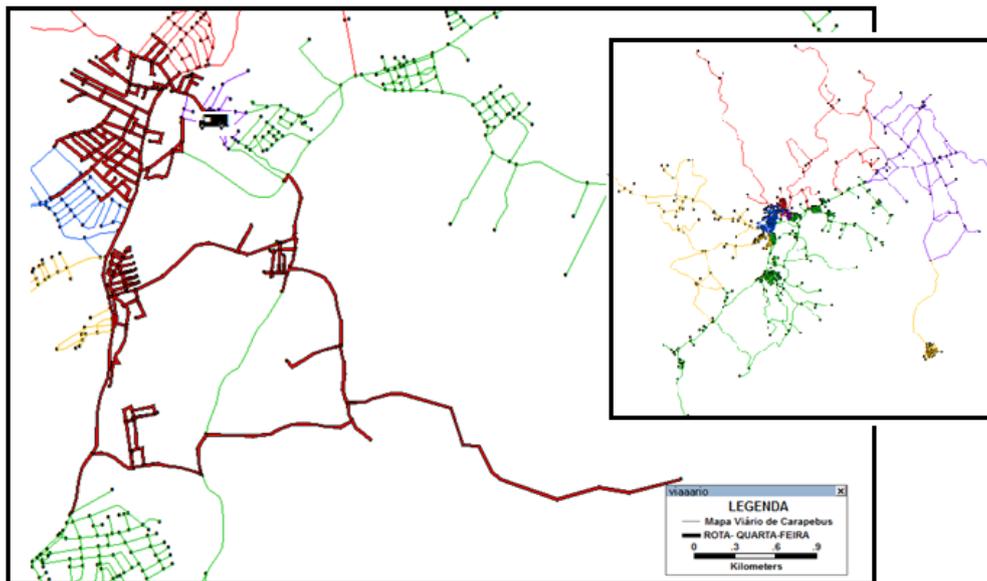


Figura 33. Rota 1 de quarta-feira considerando o Cenário 0.
Fonte: TransCAD.

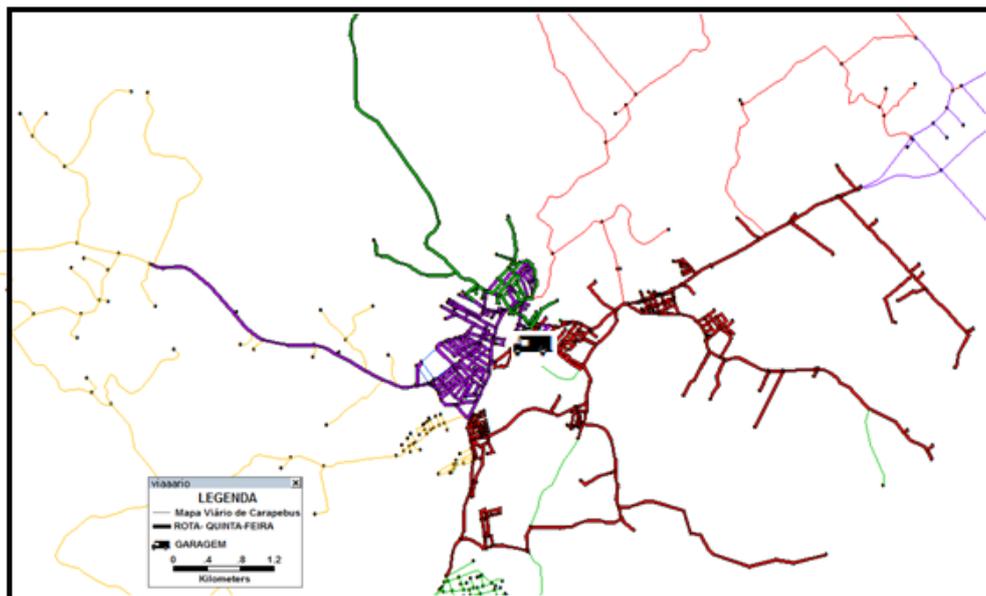


Figura 34. Rota 1, 2 e 3 de quinta-feira para o Cenário 0.
Fonte: TransCAD.

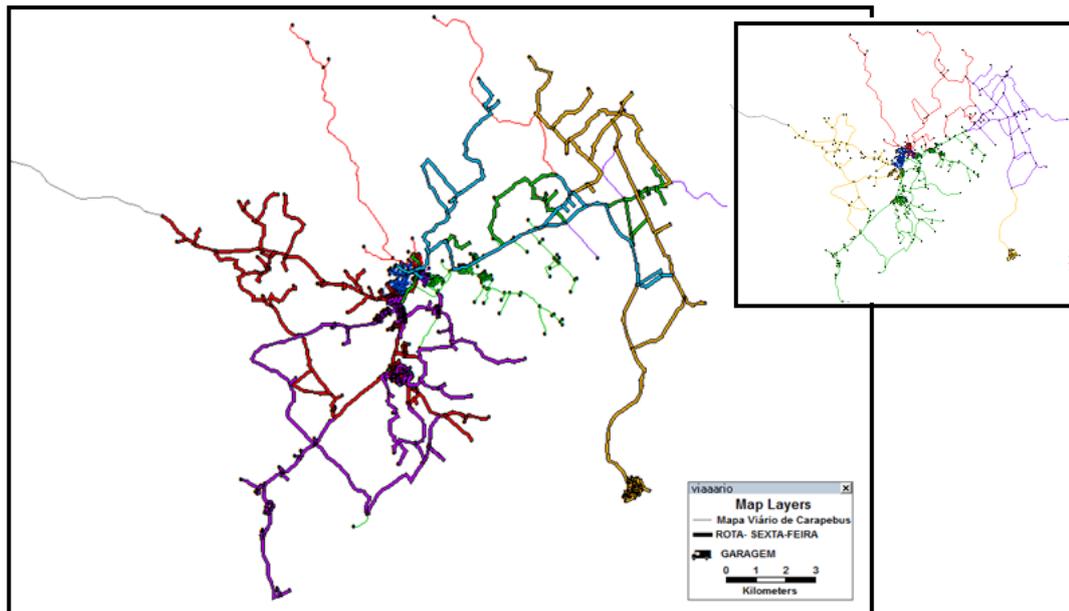


Figura 35. Rotas 1,2,3,4 e 5 de sexta-feira considerando o Cenário 0.
Fonte: TransCAD.

4.1.2 Cenário 1 – Reestruturação das Rotas

Diante dos resultados do Cenário 0, observou-se a possibilidade de reavaliar as rotas existentes e propor um estudo de otimização, visando o melhor aproveitamento do uso dos veículos para o sistema de coleta. Foi, então, modelado o Cenário 1, buscando atingir, ao fim das rotas, a capacidade máxima do caminhão coletor. Os resultados para esse cenário, que também utiliza o roteamento por arcos, são apresentados na Tabela 13.

Para este cenário, a média diária percorrida pelo caminhão coletor foi de 469,7 km, 8,9% a menos que o Cenário 0. Houve um melhor aproveitamento dos veículos coletores e um número menor de rotas diárias neste cenário quando comparado ao Cenário 0, sendo a sexta-feira o dia com mais rotas, 3 no total. Em contrapartida, ocorreu a extrapolação na jornada de trabalho nas rotas da coleta noturna, na rota 2 de sexta-feira e nas rotas que se repetem na terça, quinta e sábado.

As figuras 36, 37, 38 e 39 ilustram como ficaram as rotas e itinerários para esse cenário.

Tabela 13. Resultados obtidos após aplicação da rotina de roteamento em arcos para o Cenário 1.

Identificação da Rota	Rota	Distância percorrida no setor de coleta (km)	Distância percorrida do setor ao aterro (ida e volta)	Total de lixo recolhido (kg)	Tempo de trabalho (h)	Bairros Servidos
Segunda a Sábado (coleta noturna)	1	117,39km	72,42km	7217,16	12,19 h	Centro e Ubás
Segunda, Quarta e Sexta-feira	1	45,97km	72,42km	6.377,64	5,18h	Oscar Brito, Baixada e Praça Cordeiro
Sexta-feira	2	90,2 km	72,42 km	5.784,41	8,33h	Praia e Boa Vista
Terça, Quinta e Sábado	1	120,71	72,42	6.325,11	12,99	Sapocado,
	2	121,67	72,42	6.198,79	13,07	Caxanga e Barreiros

Fonte: Adaptado dos dados gerados pelo TransCAD.

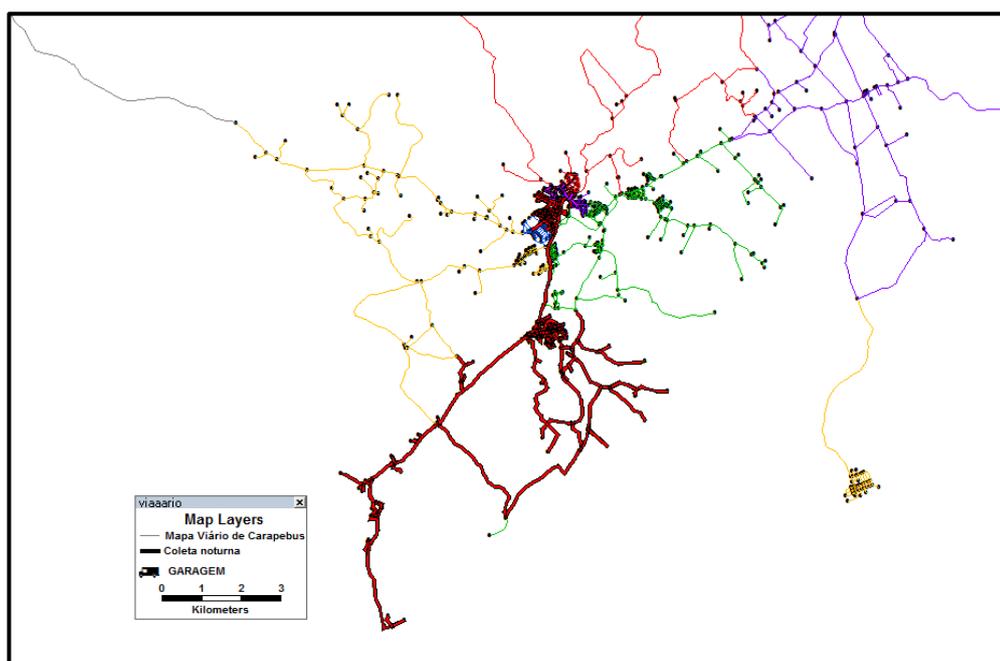


Figura 36. Rota referente a coleta noturna para o Cenário 1.

Fonte: TransCAD.

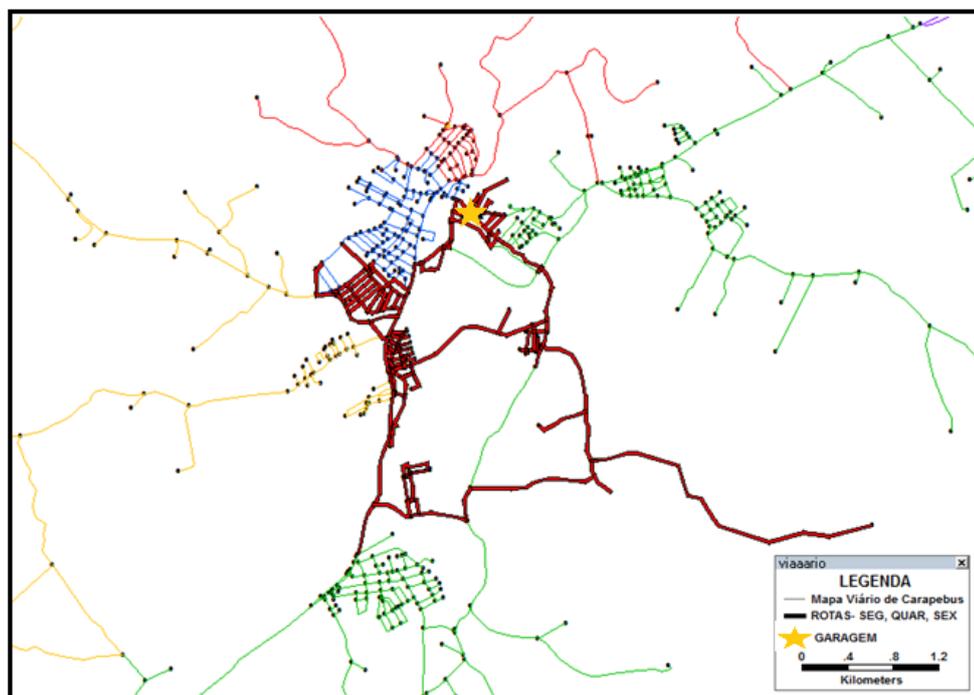


Figura 37. Rota 1 de segunda, quarta e sexta-feira para o Cenário 1.
Fonte: TransCAD.

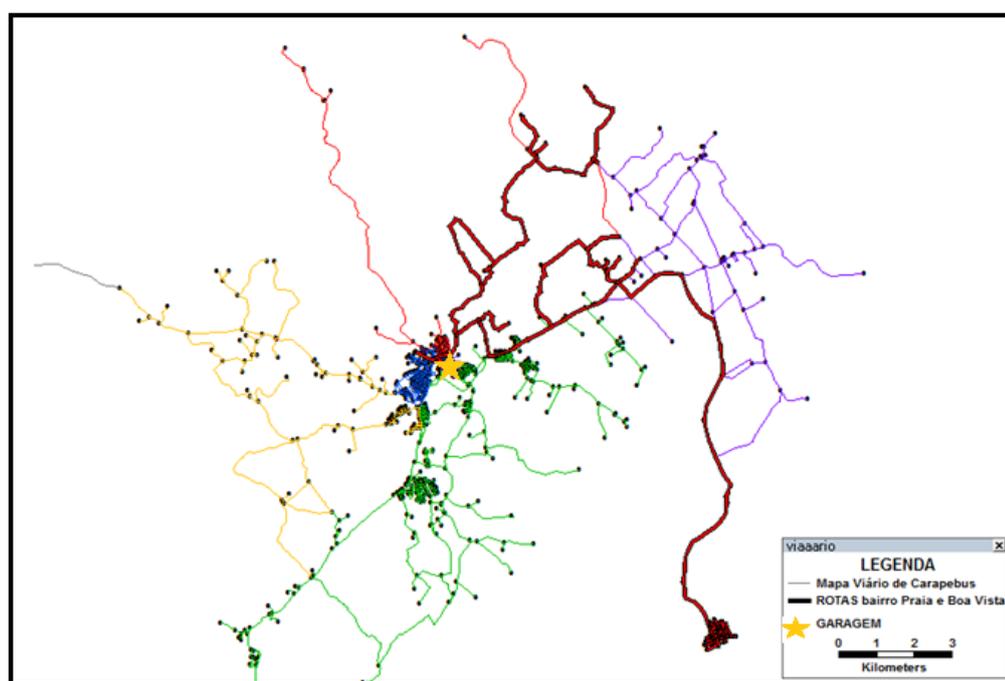


Figura 38. Rota 2 de sexta-feira para o Cenário 1.
Fonte: TransCAD.

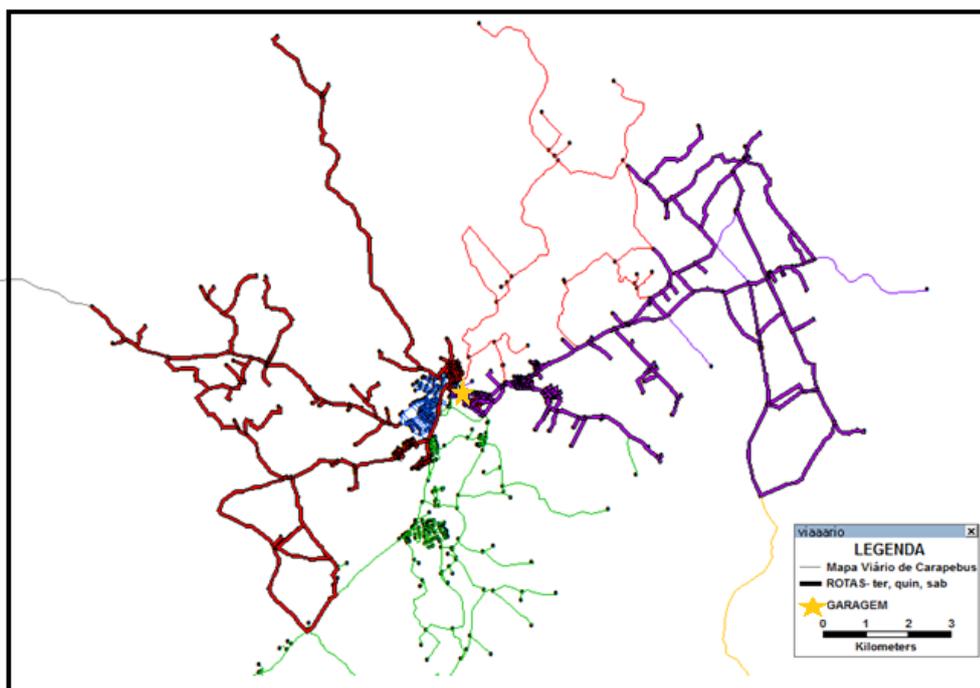


Figura 39. Rotas 1 e 2 de terça, quinta e sábado para o Cenário 1.
Fonte: TransCAD.

4.1.3 Cenário 2 - Reformulação do sistema de coleta (ETT e PEVs)

4.1.3.1 Cenário 2A – Implantação de ETT e PEVs

A rotina de roteamento empregada neste cenário foi a rotina por nó, que caracteriza a coleta por PEVs. Ao todo foram instalados 245 PEVs, distribuídos a uma distância mínima de 75 m entre si. Para este cenário, observou-se reduções ainda maiores nas distâncias diárias percorridas pelo caminhão coletor quando comparado com o Cenário 0, devido à instalação da Estação de Transbordo e Triagem, e por conta das próprias características do sistema de coleta adotado (por pontos e não mais por arcos – atendimento porta-a-porta). Os resultados obtidos para essa rotina, são visualizados na Tabela 14. Nota-se que com a instalação da ETT, a quilometragem percorrida diariamente reduziu drasticamente em relação aos outros cenários, tendo uma média diária de 238,1 km (redução de 53,7% em relação ao Cenário 0 e 49,3% em relação ao Cenário 1). Ressalta-se, que a média diária inclui os 69,5 km percorridos diariamente no traslado da ETT ao aterro sanitário. Verifica-se, ainda, que com as alterações realizadas neste cenário, poderia haver uma redução da frota de caminhões de 3 para 2 veículos coletores, ambos com carga horária de trabalho de até 40h semanais. Um dos veículos com capacidade para 7.500t ficaria responsável apenas pela coleta noturna, enquanto o outro pelas demais rotas da semana.

Tabela 14. Resultados obtidos após aplicação da rotina de roteamento por nó para o Cenário 2.

Identificação da Rota	Rota	Distância percorrida do setor a E.T. T (km)	Total de lixo recolhido (kg)	Tempo de trabalho (h)	Bairros Servidos
Segunda a sábado (coleta noturna)	1	68,5km	7217,3	4,67h	Centro e Ubás
Segunda, quarta e sexta-feira	1	22,1km	6397,1	2,33 h	Oscar Brito, Baixada e Praça Cordeiro
Terça, quinta e sábado	1	73,1km	6439,5	4,5h	Sapocado, Caxanga, Santa tereza e
	2	83,4km	6070,2	4,6h	Barreiros
Sexta-feira	2	65,0	5.784,3	3,17h	Praia e Boa Vista

Vale destacar que foram utilizadas as mesmas disposições de coleta e bairros atendidos que os adotados no Cenário 1. As rotas encontradas para este cenário são ilustradas na Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

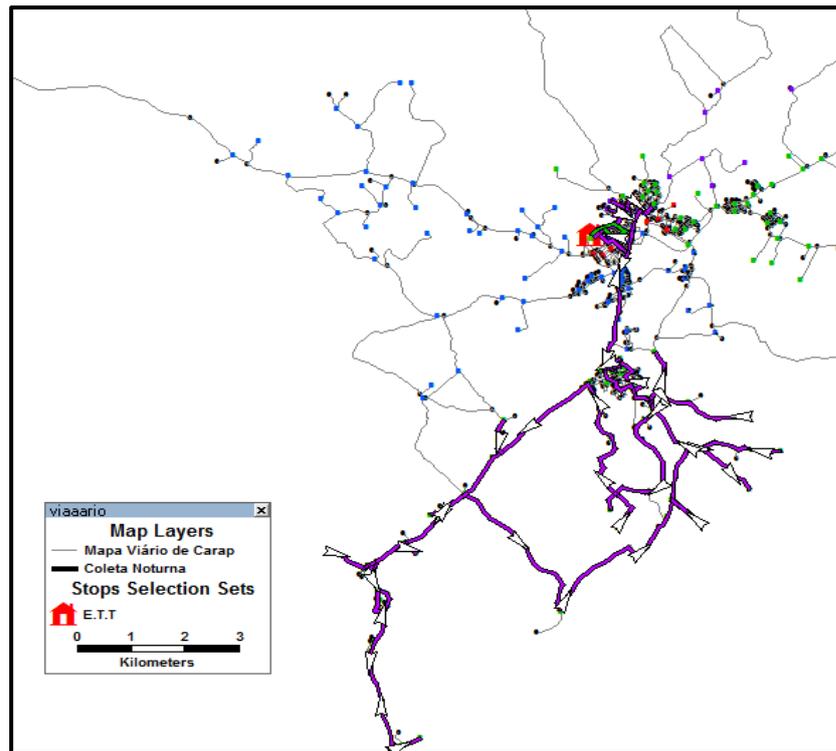


Figura 40. Rota da coleta noturna para o Cenário 2A.
Fonte: TransCAD.

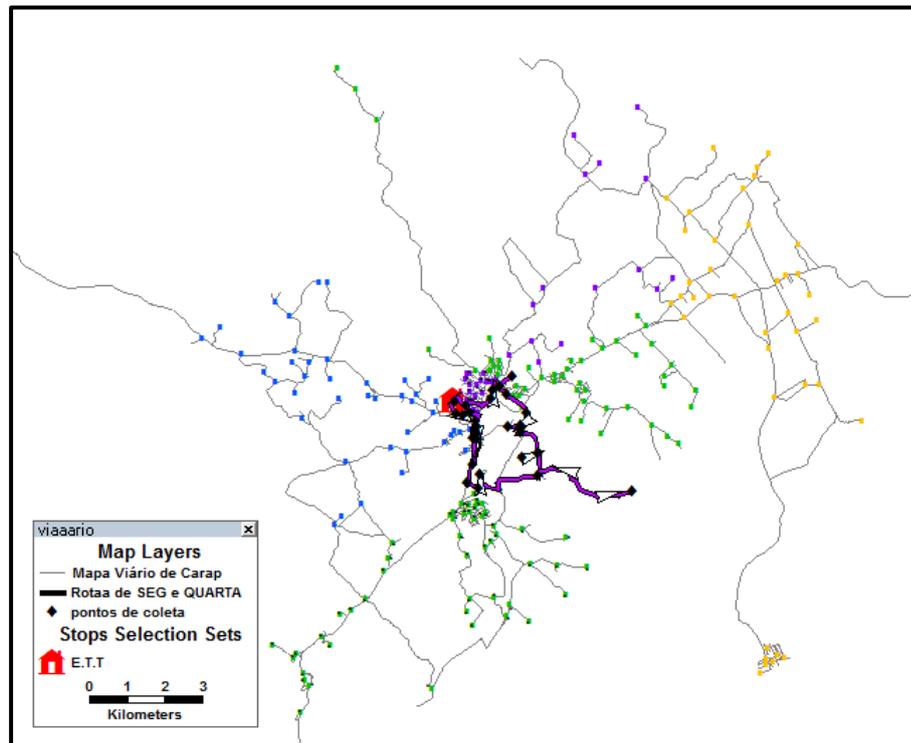


Figura 41. Rota 1 de segunda, quarta e sexta-feira para o Cenário 2A.
Fonte: Transcad.

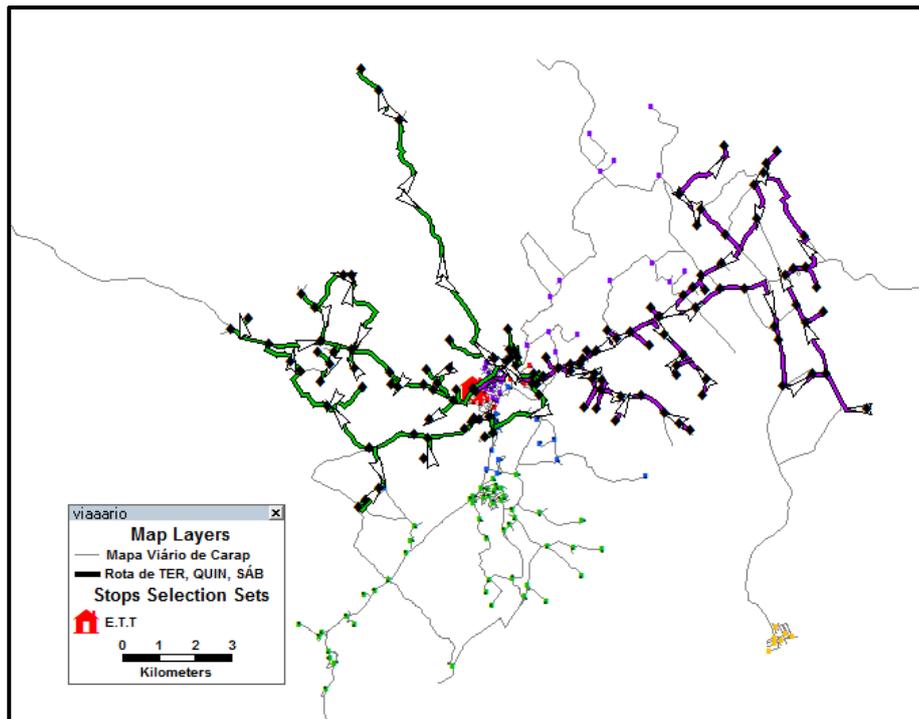


Figura 42. Rota 1 e 2 de terça, quinta e sábado para o cenário 2A.
Fonte: Transcad.

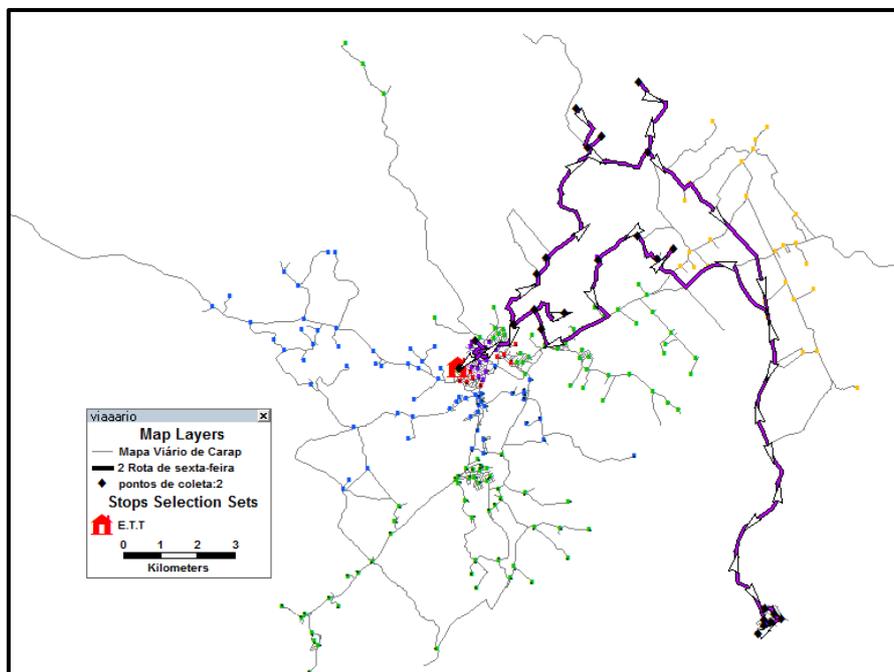


Figura 43. Rota 2 de sexta-feira para o Cenário 2A.
Fonte: Transcad.

4.1.3.2 Cenário 2B - Implantação de ETT, PEVs e Coleta Seletiva

Este cenário, considera a implantação da coleta seletiva no município em complemento às mudanças já previstas no Cenário 2A. Sabe-se que a implantação de um programa de coleta seletiva sofre algumas alterações na demanda de acordo com o envolvimento da população atendida, que participa da primeira etapa do processo: a separação na fonte geradora. Para saber a quantidade de resíduo a ser coletado na coleta convencional e, conseqüentemente, na coleta seletiva, montou-se modelos considerando a participação de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da população na coleta seletiva. A partir das demandas obtidas para cada modelo, foi possível realizar o roteamento. A Tabela 15 mostra o resultado do roteamento, com o total de lixo úmido coletado em função do percentual de participação da população na coleta seletiva.

A partir dos resultados, nota-se que houve pouca variação na distância diária percorrida pelo caminhão coletor com o aumento do percentual de participação da população. Nas rotas de terça, quinta e sábado, que possuíam mais de uma rota diária, houve alterações nas distâncias e nos percursos, pois a diminuição dos resíduos recolhidos, possibilitou ao caminhão percorrer uma distância maior até atingir a capacidade máxima. Porém, não ocorreu uma redução no número de rotas.

Neste cenário, a média diária de quilômetros percorridos considerando todos os modelos foi de 239,0 km. O menor percurso foi obtido no Modelo 1 (237,18 km), com a participação de 20% da população na coleta seletiva, e o maior (244,93 km), no Modelo 5, que conta com 100% da população aderindo à coleta seletiva. Em relação aos outros cenários, houve redução na quilometragem diária de 53,6% em relação ao Cenário 0, 49,1% em relação ao Cenário 1, e um aumento de 0,4 % na quilometragem em relação ao 2A.

A média diária de resíduos úmidos recolhidos foi de 16,3 t para o Modelo 1, 15,0t para o Modelo 2, 13,8 para o Modelo 3, 12,5t e 11,2t para os Modelos 4 e 5, respectivamente. Considerando que, a capacidade do caminhão responsável pelo traslado da ETT ao aterro adotado neste trabalho, era de 18t, a redução na quantidade de resíduos úmidos recolhidos com o aumento da adesão da população na coleta seletiva, permitiria uma diminuição da sua capacidade em todos os modelos adotados neste cenário. Em relação ao tempo de trabalho, ocorreram reduções nas cargas horária à medida que o total de resíduos úmido recolhido diminuía com o aumento do percentual

de participação da população na coleta seletiva. Isso ocorre, pois, o tempo transcorrido para coleta possui a parcela fixa e variável, sendo esta última relacionada ao tempo gasto no carregamento do caminhão em função da quantidade de lixo coletado. Para as avaliações aqui executadas, considerou-se que a coleta de resíduos secos e de resíduos úmidos ocorrem simultaneamente e em paralelo. Sendo assim, o tempo crítico de carregamento ocorre com o tipo de lixo de maior volume, no caso deste estudo, o de resíduos úmidos.

Tabela 15. Resultados do roteamento para o Cenário 2B.

Identificação da rota	Rota	Distância total percorrida do setor a ETT (km)	Total de resíduo úmido coletado (kg)	Tempo total (h)
Modelo 1- 20% de participação da população na coleta seletiva				
Coleta noturna	1	68,4	6.689,60	4,63h
Segunda, quarta e sexta-feira	1	22,1	5.930,1	2,25h
Terça, quinta e sábado	1	74,1	6445,6	4,67h
	2	80,7	5.151,35	4,25h
Sexta-feira	2	65,0	5362,30	3,15h
Modelo 2 -40% de participação da população na coleta seletiva				
Coleta noturna	1	68,4	6.163,2	4,53h
Segunda, quarta e sexta-feira	1	22,1	5.463,3	2,17h
Terça, quinta e sábado	1	76,3	6.045,7	5,33h
	2	79,3	4.638,1	4,22h
Sexta-feira	2	65,0	4.940,2	3,12h
Modelo 3- 60% de participação da população na coleta seletiva				
Coleta noturna	1	68,5	5.636,9	4,42h
Segunda, quarta e sexta-feira	1	22,1	4.996,3	2,27h
Terça, quinta e sábado	1	79,0	6.457,0	5,25h
	2	77,2	3.313,55	4,20h
Sexta-feira	2	65,0	4.518,00	3,08h
Modelo 4- 80% de participação da população na coleta seletiva				
Coleta noturna	1	68,4	5.110,2	4,32h
Segunda, quarta e sexta-feira	1	22,1	4.529,5	2,2h
Terça, quinta e sábado	1	77,1	6.101,5	5,48h
	2	78,0	2.756,3	4,27h
Sexta-feira	2	65,0	4.095,09	3,05h
Modelo 5- 100% de participação da população na coleta seletiva				
Coleta noturna	1	68,4	4.583,2	4,23h
Segunda, quarta e sexta-feira	1	22,1	4.062,7	2,12h
Terça, quinta e sábado	1	113,8	6.467,2	7,0h
	2	56,5	1.477,8	3,05h
Sexta-feira	2	65,0	3.673,8	3,0h

As Figuras 44 a 48 ilustram os percursos obtidos nas rotas de terça-feira, quinta-feira e sábado para cada percentual de participação da população na coleta seletiva. As demais rotas são iguais às do Cenário 2A.

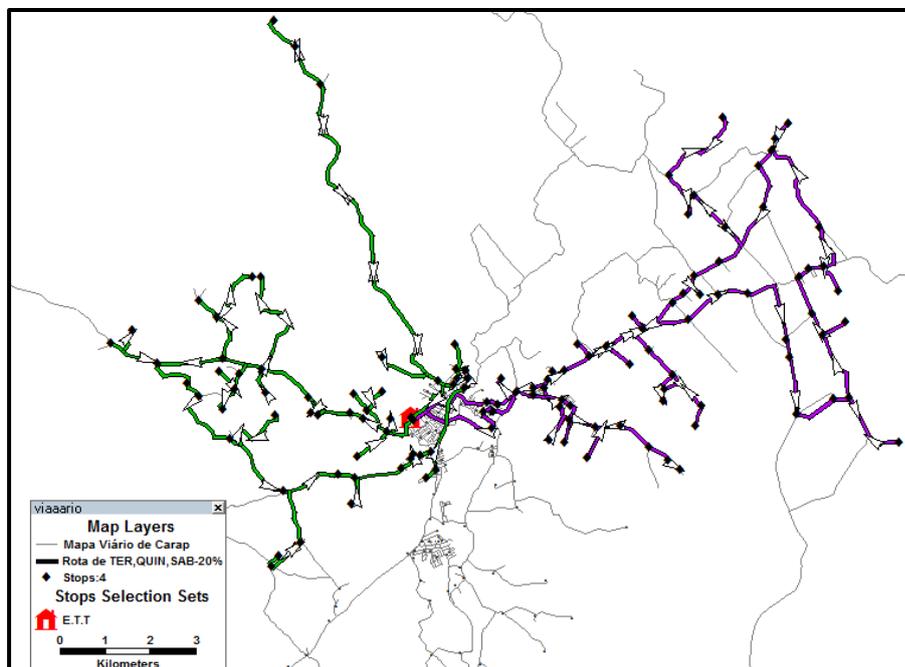


Figura 44. Rotas da terça, quinta-feira e sábado para o Cenário 2B, considerando 20% de participação da população aderindo a coleta seletiva.

Fonte: TransCAD.

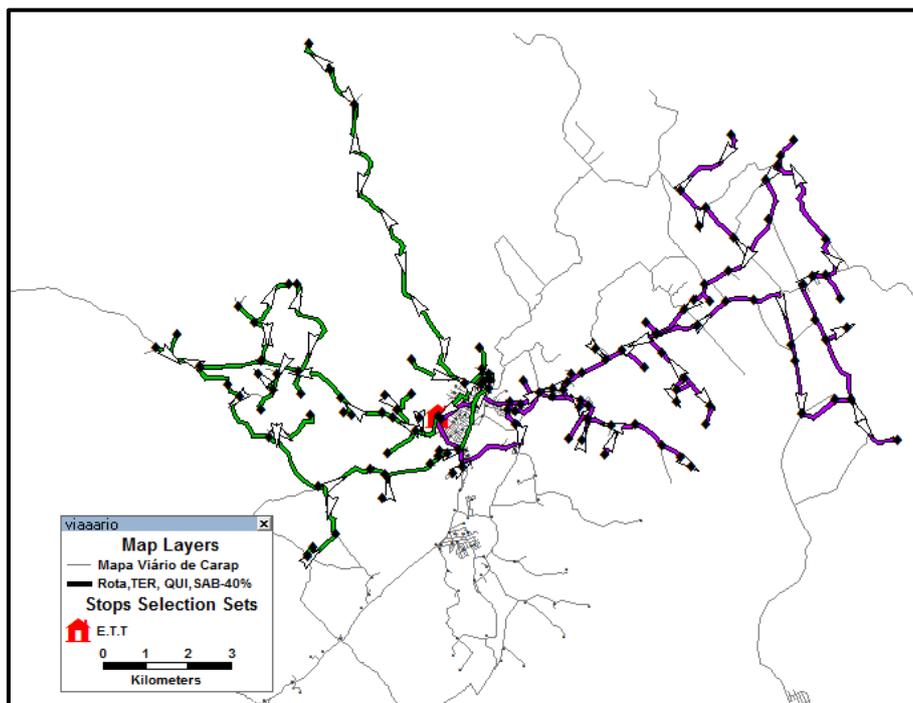


Figura 45. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 40% de participação da população aderindo a coleta seletiva.

Fonte: TransCAD.

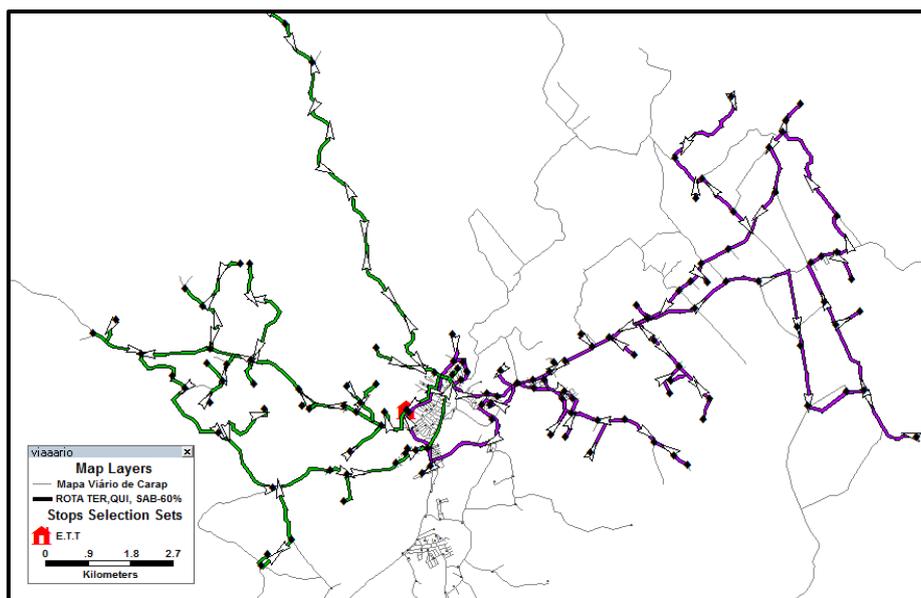


Figura 46. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 60% de participação da população aderindo a coleta seletiva.

Fonte: TransCAD.

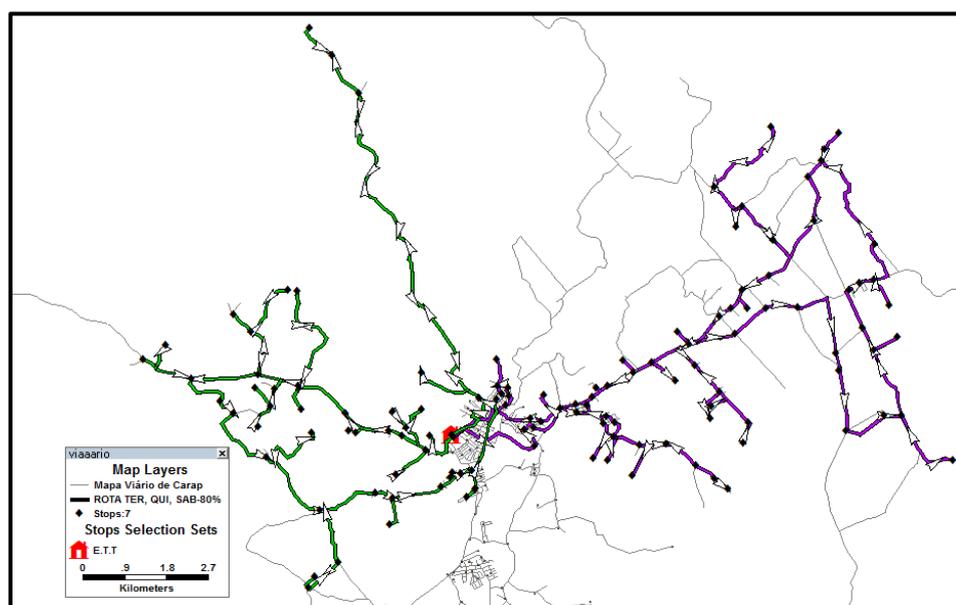


Figura 47. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 80% de participação da população aderindo a coleta seletiva.

Fonte: TransCAD.

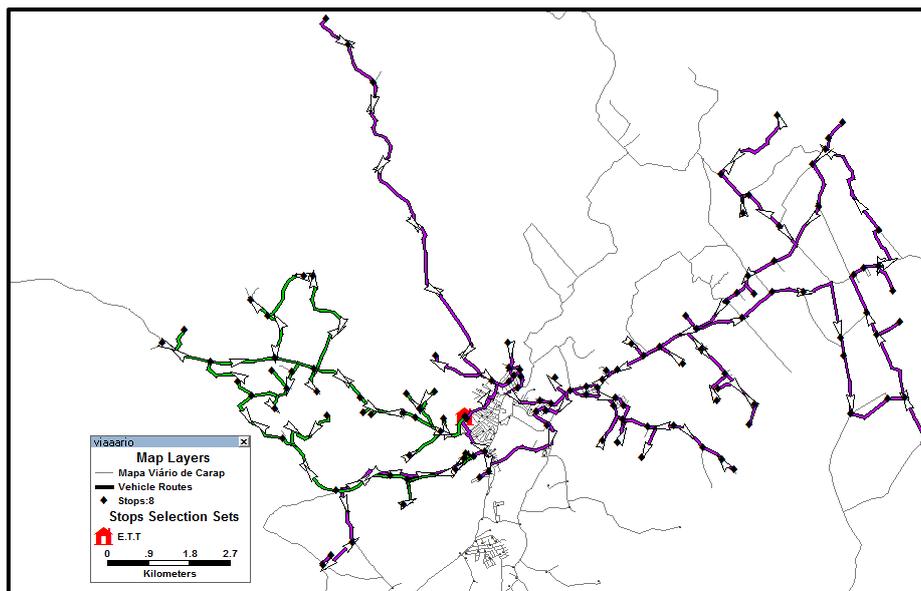


Figura 48. Rotas de terça, quinta e sábado para o Cenário 2B, considerando 100% de participação da população aderindo a coleta seletiva.

Fonte: TransCAD.

4.2 Análise Geral dos Resultados

A Tabela 16 e o Gráfico 2 apresentam de forma consolidada os resultados dos cenários simulados neste estudo considerando uma semana de coleta.

De forma geral, dentre as simulações realizadas neste estudo, como era previsto, o Cenário 2B foi o que apresentou maiores benefícios econômicos, pois apresentou tanto reduções nos percursos e, conseqüentemente, nas jornadas de trabalho dos coletores, quanto reduções na quantidade de resíduos encaminhados para o aterro sanitário, com a prática da coleta seletiva.

O fato de o aterro sanitário ser localizado em outra cidade, situada a 37 km de distância do município de Carapebus, prejudica significativamente o sistema logístico de coleta atual em relação à quilometragem percorrida, impactando nos custos operacionais e emissões de poluentes. Essa localização obriga o caminhão a percorrer grandes distâncias, muitas vezes maiores que as distâncias percorridas dentro do setor de coleta. Portanto, no Cenário 2A e 2B, em que se insere a Estação de Transbordo e Triagem, exclui-se a necessidade excedente das viagens ao aterro sanitário com o veículo coletor, o que garante maior produtividade dos caminhões e diminuição das distâncias percorridas. Esta modificação apresentou redução de 1.088,86km na quilometragem percorrida semanalmente para o aterro, 72,3 % a menos em relação ao Cenário 0 e 741,72km, 64,0% a menos de percurso que o Cenário 1.

Analisando a distância total percorrida dentro do setor de coleta, nota-se que o Cenário 2A obteve o menor resultado, com uma redução de 39,03% quando comparado ao Cenário 1, confirmando que o sistema de coleta por PEVs é mais eficiente que o porta-a-porta neste quesito. Observou-se, ainda, um aumento de 4,54 % na distância total percorrida dentro do setor de coleta quando comparados os Cenário 1 e Cenário 0. Esse aumento pode ser explicado pelo fato de no Cenário 1 ter havido uma melhor utilização do caminhão nas coletas, atingindo, na maioria dos percursos, sua capacidade máxima.

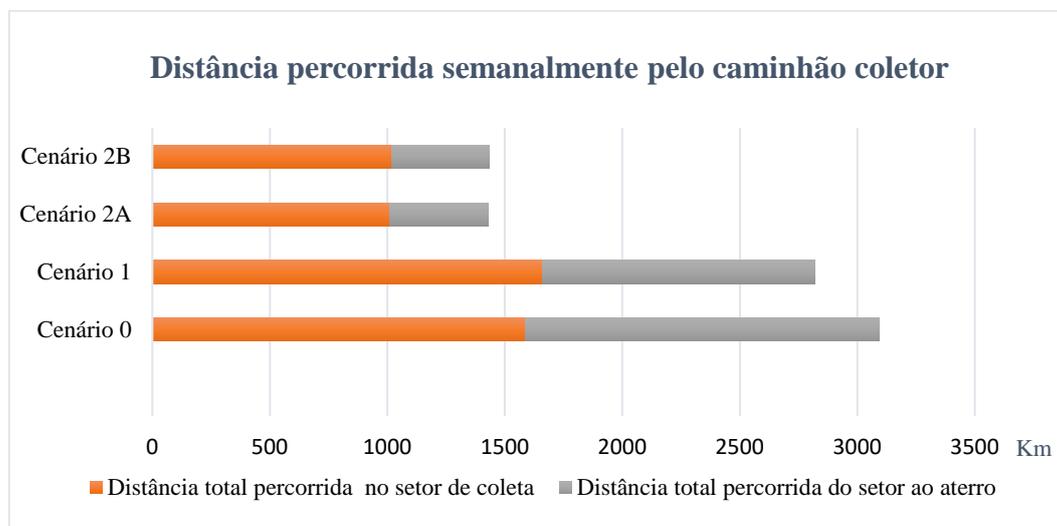
Adotando-se a média de resíduos coletados e distâncias percorridas nos modelos do Cenário 2B, percebe-se que houve pouca variação das distâncias percorridas dentro do setor de coleta quando comparado com o Cenário 2A. Essa pequena variação ocorreu devido à alteração em algumas rotas, pois a diminuição dos resíduos recolhidos, possibilitou ao caminhão percorrer uma distância maior até atingir a capacidade máxima.

Tabela 16. Resumo dos resultados obtidos para os cenários de simulação.

Cenários	RSD coletado (ton.)	Distância total percorrida dentro do setor de coleta (km)	Distância percorrida para o aterro sanitário (km)	Distância total percorrida (km)
Cenário 0	105,80	1.587,47	1.505,86	3.093,33
Cenário 1	105,80	1.659,59	1.158,72	2.818,31
Cenário 2A	105,80	1.011,80	417,00	1.428,80
Cenário 2B	82,64	1.017,26	417,00	1.434,26

Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico 2. Quilometragem percorrida semanalmente pelo caminhão coletor em cada cenário de simulação.



Fonte: Elaborado pela Autora.

4.3 Implantação da coleta seletiva e redução dos resíduos encaminhados ao aterro sanitário

A disposição final ambientalmente correta mais utilizada no Brasil atualmente é o aterro sanitário. Porém, a destinação para o aterro deve ocorrer quando não houver mais nenhum meio de recuperar, reutilizar ou beneficiar o material. Estima-se que cerca de 8 bilhões de reais são perdidos com materiais que vão para aterros sanitários e que poderiam ser reaproveitados após a reciclagem. Esses números revelam que há um grande desperdício tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico e social (SALVADOR, 2014).

Diante disso, o Cenário 2B levou em consideração uma série de alterações no sistema de coleta atual do município de Carapebus, dentre elas, a implantação da coleta seletiva. Neste cenário, o objetivo principal era analisar a redução dos resíduos encaminhados para o aterro sanitário, a partir da prática da coleta seletiva, e seu impacto no sistema. A Tabela 17 apresenta uma síntese deste modelo, considerando o percentual de participação da população na coleta seletiva e o total de lixo úmido e reciclável recolhidos.

Observa-se que, quanto maior a participação da população, maior a quantidade de materiais recicláveis coletados e, conseqüentemente, menor a quantidade de resíduos úmidos coletados e levados ao aterro, podendo haver uma redução mensal de até 154,4t de resíduo encaminhados para disposição final quando considerado 100% da população aderindo à coleta seletiva.

Tabela 17. Total de lixo úmido e reciclável coletados semanalmente considerando o percentual de participação da população na coleta seletiva, de acordo com o Cenário 2B.

Parcela da população aderindo a coleta seletiva (%)	Total de resíduos coletados semanalmente pela coleta convencional (ton.)	Total de resíduos recicláveis coletados semanalmente pela coleta seletiva (ton.)
20%	98,08	7,72
40%	90,36	15,44
60%	82,64	23,16
80%	74,92	30,89
100%	67,20	38,61

Fonte: Elaborado pela Autora.

Porém, é importante destacar que o sucesso da implantação da coleta seletiva também depende de investimentos em políticas públicas, principalmente de campanhas socioeducativas, além de fatores como o número de PEVs disponíveis e a distância entre os usuários e os pontos de entrega. Dessa maneira é natural que, ao implantar a coleta seletiva, haja, de início, taxas menores de participação e, com o passar do tempo e maior conscientização da população, esse percentual vá aumentando.

4.4 Emissão de CO₂

Segundo o relatório da Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 24), o setor de transportes contribui com um quarto das emissões globais de gases do efeito estufa e é a área em que as irradiações de carbono mais crescem desde os anos 2000. Por isso, é cada vez mais importante considerar as variáveis ambientais no planejamento dos transportes. Neste contexto, buscou-se também avaliar o impacto dos cenários de avaliação propostos no quesito ambiental, a partir da estimativa de emissões de CO₂.

Não foi encontrado na literatura fator de emissão de CO₂ específico para caminhões de coleta de lixo. No entanto, obteve-se que caminhões rodoviários emitem uma média de 77,6 g/t.km de CO₂, conforme levantado por Plaza et al. (2019). Assim, adotando-se este valor como referência para os veículos coletores, associado com as distancias totais percorridas para cada cenário de avaliação abordado neste estudo, obteve-se o valor de emissões de CO₂ para cada caso. A equação a seguir expressa o cálculo de estimativa adotado.

$$CO_2 \text{ emitido} = \left(\frac{77,6g}{t \text{ km}} \right) \cdot \text{Distância total}$$

Os resultados obtidos para a emissão de CO₂ no período de um ano para os cenários de avaliação elaborados para o sistema de coleta de lixo de Carapebus são apresentados na Tabela 18. Os resultados indicam reduções de 8,89% nas emissões de CO₂ comparando o Cenário 1 ao 0, de 53,82% comparando o 2A ao 0, de 53,65% comparando o 2B ao 0, de 49,32 % e 49,13% comparando os Cenários 1 ao 2A e 2B, respectivamente. Entre os Cenários 2A e 2B, houve um pequeno aumento de 0,38% nas emissões.

Tabela 18. Emissões de CO₂ pelo sistema de coleta de lixo considerando o período de um ano.

Cenários	Total percorrido no período de ano (km)	Emissão de CO₂ (kg)
Cenário 0	148.470,24	11,521
Cenário 1	135.278,88	10,497
Cenário 2A	68.582,40	5,32
Cenário 2B	68.844,48	5,34

Fonte: Elaborado pela Autora.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estudar e elaborar propostas para otimização das rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares do município de Carapebus – RJ, de forma a reduzir os custos relacionados ao transporte e avaliar os benefícios da implantação de uma Estação de Transferência e Triagem na logística da coleta e para a implementação da coleta seletiva.

A metodologia aplicada foi composta, basicamente, por três etapas: i) levantamento e coleta de dados; ii) elaboração dos cenários e; iii) modelagem e avaliação dos cenários. A partir da coleta de dados, observou-se que o grande problema do sistema de coleta de lixo atual são as viagens percorridas pelo caminhão coletor até o aterro sanitário, localizado a aproximadamente 37 km da cidade de Carapebus. Tendo em vista essa problemática, foram construídos três cenários de avaliação: Cenário 0, que buscou reproduzir o sistema atual de coleta do município, para fins de comparação às propostas deste trabalho; Cenário 1, no qual manteve-se a característica do sistema atual de coleta porta-a-porta, porém com estudo de otimização das rotas e o Cenário 2, subdividido em 2A e 2B. Nestes, a coleta do município foi reformulada, acrescentando-se a instalação da ETT e modificando o sistema de coleta para o modelo por PEVs (2A) e, ainda, houve a implantação da coleta seletiva (2B).

Para a simulação e avaliação dos cenários propostos, foi utilizado o software TransCAD, que se mostrou uma boa ferramenta para auxiliar no planejamento logístico e na tomada de decisões sobre problemas reais de gerenciamento de resíduos. Este software permitiu modelar cenários e gerar simulações capazes de determinar rotas ótimas, segundo restrições impostas, para o sistema de coleta em estudo.

A análise dos resultados da simulação do Cenário 0, que visa representar o sistema atual de coleta, indicou, em média, a necessidade de 4 viagens diárias ao aterro, o que gera cerca de 515,5 km diários. Já a avaliação dos resultados obtidos para os cenários de avaliação propostos (Cenários 1, 2A e 2B), quando comparados ao Cenário 0, apresentaram indicadores melhores do que o atual sistema em todas as simulações. Porém, as maiores reduções, tanto na quilometragem quanto nas emissões de CO₂, ocorreram nos cenários no qual foi alterado o sistema de coleta porta-a-porta para o sistema por PEVs e implantada a ETT, alcançando uma redução de até 53,7 % desses indicadores.

A implantação da ETT possibilitou uma redução na quilometragem percorrida semanalmente do setor de coleta até o aterro sanitário de 1.088,86km, representando 72,3% a menos que o Cenário 0, e de 741,72km (redução de 64,0%) de percurso que o Cenário 1. Essa redução garantiu mais produtividade dos caminhões na coleta, redução da jornada de trabalho dos catadores e diminuição do consumo de combustível.

A análise geral dos resultados indicou que o sistema por PEVs (representado nos Cenários 2A e 2B) é mais vantajoso que o sistema porta-a-porta (representado pelos Cenários 0 e 1) no sentido de redução de custos com transportes, uma vez que apresentou redução na quilometragem total percorrida entre os Cenários 2A e 1 de 39,03%. Em contrapartida, demanda maior disposição da população em separar e dispor os resíduos nos locais indicados.

Considerando os ganhos ambientais e econômicos, pode-se averiguar que o cenário que apresentou maiores benefícios foi o Cenário 2B. Houveram reduções na quilometragem diária percorrida e nas emissões de CO₂ de 53,6% em relação a ao Cenário 0, de 41,1% em relação ao Cenário 1 e um aumento de 0,4% em relação ao Cenário 2A. Nota-se, um pequeno aumento no Cenário 2B da quilometragem percorrida e nas emissões de CO₂ em relação ao Cenário 2A. Entretanto, no modelo mais otimista do Cenário 2B, em que 100% da população adotaria a coleta seletiva, haveria uma redução mensal de 154,4 t de resíduos encaminhados ao aterro sanitário, que compensaria o pequeno aumento na quilometragem percorrida. No entanto, para obter altas taxas de participação da população na coleta seletiva, faz-se necessário investimentos em políticas públicas e campanhas socioeducativas para incentivar e ensinar a população a separar os resíduos antes de descartá-los.

A falta de acesso a dados reais e precisos do município, além da carência de mapas georreferenciados atualizados, limitam a comparação e simulação com a situação real do município, uma vez que a modelagem utilizada é altamente sensível aos dados de entrada. Apesar disso, a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho apresentou resultados satisfatórios, podendo gerar informações relevantes para a elaboração de políticas públicas a serem adotadas pelo município para esse setor. Portanto, espera-se que este estudo possa contribuir com conhecimento técnico-científico para o desenvolvimento de trabalhos futuros, com refinamento das informações, para orientar tomadas de decisões acerca de melhorias e adequações em sistema de coleta de resíduos domiciliares, além do município de Carapebus-RJ.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se: incorporação, como parâmetros para otimização, de custos fixos e variáveis do transporte e coleta para os diferentes tipos de sistemas de coleta apresentados neste trabalho; estudo da composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Carapebus e/ou municípios do interior do Estado do RJ próximos a este; análise de viabilidade técnica e econômica da implantação de sistemas de coleta de resíduos sólidos e de uma estação de transbordo e triagem; aprimoramento de metodologias para diagnóstico de impactos ambientais de sistemas de coleta de lixos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEVAP. **Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB)**. Produto 4- Diagnóstico Setorial. Carapebus, 2020.

AGEVAP. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS)**. Produto 4. Canas, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR N° 10.004. Resíduos Sólidos: Classificação**. 2004. Disponível em: <<http://www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR%20n%2010004-2004.pdf>>. Acesso em: 25 de jul. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR N° 8419. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. 1992. Disponível em: <<http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-8.419-NB-843-Apresentac%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-RSU.pdf>> Acesso em: setembro de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT. **NBR 12980. Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos**.. Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: < <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-12.980-Coleta-varri%C3%A7%C3%A3o-e-acondicionamento-de-res%C3%ADuos-s%C3%B3lidos-urbanos.pdf>> Acesso em: dezembro de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**.Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: Nov. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. 2019. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: Abril de 2021.

BATISTA, Suzana Viegas; SILVA, Ana Paula Coutinho da.; SILVA, Samuel Ferreira da. **Análise da Eficiência da forma de Acondicionamento dos Resíduos Sólidos Urbanos Domiciliares em Vilas/Favelas de Belo Horizonte**: Estudo de caso na Vila Califórnia. Curitiba, Paraná, 2014. Enegep 2014.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.;CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. O desafio do desenvolvimento sustentável 2ª ed.São Paulo. 2010.

BRASIL. LEI N° 12.305, de 02 de agosto de 2010a. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial República Federativa do Brasil**, Brasília. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>.Acesso em: agosto de 2019.

BRASILEIRO, L.A.; LACERDA, M.G. **Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares**. Engenharia Ambiental, 2008. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1413-41522008000400002&lng=en&nrm=iso&tlng=pt> Acesso em: dezembro de 2019.

BRIDE. Eliana **Resíduos Sólidos Urbanos- Uma Proposta para Otimização dos Serviços de Coleta e da Disposição Final**. Porto Alegre, 2008. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BRITO, Rodrigo Augusto Ferreira de. **Uso de Sistema de Informação Geográfica para a Análise do Transporte e Disposição Final dos Resíduos Sólidos**. Ilha Solteira, São Paulo, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Julio de Msquita Filho.

BURI. PREFEITURA DE BURI-SP. Disponível em: <<https://www.buri.sp.gov.br/conteudo/prefeitura-adquire-caminhao-bau-para-distribuicao-de-hortifruiti-da-merenda-escolar#>> Acesso em: fev.de 2020.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. Introdução à ciência da geoinformação. 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>> Acesso em: outubro de 2019.

CALIPER. **TransCAD**. Disponível em: <<https://www.caliper.com/tcovu.htm>> Acesso em: outubro de 2019.

CASTRO, Leonardo Borges. **Avaliação do Serviço de Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares em cidade de Médio Porte Utilizando sistemas de informações geográficas e receptores do sistema de posicionamento por satélite**. Uberlândia, 2006. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia.

CEMPRE. Compromisso empresarial para reciclagem. Ciclosoft 2018, Coleta Seletiva. Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclosoft/id/9>> Acesso em: setembro de 2019.

CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Sinopse do Censo 2010. Densidade demográfica Preliminar. Rio de Janeiro, Carapibus. IBGE, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/>> Acesso em: mar. 2020.

CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <http://www.livrosimulacao.eng.br/download/tese_chwif.pdf> Acesso em: março de 2020.

COLOMBARI, J. C. **A Política Nacional de Resíduos Sólidos e a sua concretização em Paulínia (SP)**. 190p. 2014. Tese (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/286624/1/Colombari_JulianaCristina_M.pdf>

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 275, de abril de 2001. Diário Oficial da União, 19 de jun. de 2001. Seção 1, p. 80. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=291>> Acesso em: setembro de 2019.

COUTINHO, B.C.; MIRANDA, G.B.; SAMPAIO, G. R.; DE SOUZA, B.S.; SANTANA, W. J.; COUTINHO, H. D. M. **A Importância e as vantagens do polihidroxibutirato (plástico biodegradável)**.

CUNHA, Claudio Barbieri da. **Aspectos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais**. 2000. Artigo. Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CUNHA, V.; CAIXETA FILHO, J. V. **Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas**. *Gest. Prod.*[online].

Ago. 2002, vol.9, nº.2. Disponível em <<http://www.scielo.br/scielo.php>>. Acesso em: 26 de setembro de 2019.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Resíduos sólidos municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370p. Disponível em: <http://cempre.org.br/upload/Lixo_Municipal_2018.pdf> Acesso em: dezembro de 2019.

DOS SANTOS PINTO, Vicente Paulo. Resíduos sólidos, políticas públicas e educação ambiental. 2017. Disponível em: <http://epta.tmp.br/epta2017_anais/pdfs/plenary/0124.pdf> Acesso em: Agosto de 2020.

Em São Paulo, morador passa a depositar lixo em caçambas de plástico. Portal Jovem Pan. São Paulo, 01 de janeiro de 2014. Disponível em: <<https://jovempan.com.br/noticias/em-sao-paulo-morador-passa-depositar-lixo-em-cacambas-de-plastico.html>> Acesso em: Agosto de 2020.

FEOFILLOF, P. **Exercícios de Teoria dos Grafos**. 2013. Disponível em: <<http://www.ime.usp.br/~pf/grafos-exercicios/texto/ETG.pdf>>. Acesso em: outubro de 2019.

FUNASA – Fundação Nacional da Saúde – **Manual de Saneamento – Orientações Técnicas**. Brasília, 2004.

GALVÃO, R. D.; BARROS, J. F. N.; FERREIRA, V. J. M. F.; HENRIQUES, H. B. S. 1997. Roteamento de Veículos com Base em Sistemas de Informação Geográfica. Gestão e Produção, v.4, n.2, p. 159-174. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v4n2/a05v4n2.pdf>> Acesso em: outubro de 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002. Disponível em: <<http://home.ufam.edu.br/salomao/Tecnicas%20de%20Pesquisa%20em%20Economia/Textos%20de%20apoio/GIL,%20Antonio%20Carlos%20-%20Como%20elaborar%20projetos%20de%20pesquisa.pdf>> Acesso em: 04 de novembro de 2019.

GOOGLE. Google Earth website. <<http://earth.google.com/>> Consultado em 2019.

HEERDT, M. L. LEONEL, V. **Metodologia Científica e da Pesquisa**. Livro didático. 5 ed. Unisul Virtual. 2007. Disponível em: <http://www.fatecead.com.br/mpc/aula01_ebook_unisulvirtual.pdf> acesso em: 04 de novembro de 2019.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2018.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília, Brasil, 2012.

JACOBI, Pedro R.; BESEN, Gina Rizipah. **Gestão de Resíduos Sólidos na Região Metropolitana de São Paulo**. Avanços e desafios. 2005.

KOUICHI, V. T.; SILVA, T.V. V.; LIMA, J. P.; LIMA, R. S. Roteirização de Atendimentos a Defeitos em Redes de Distribuição de Energia Utilizando Sistemas de Informações Geográficas para Transportes (SIG-T). 2009. Enegep 2009. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/144331105-Palavras-chaves-sistemas-de-informacoes-geograficas-sig-roterizacao-e-programacao-de-veiculos-distribuicao-de-energia-eletrica.html>>. Acesso em: outubro de 2019.

LACERDA, Márcio Golçalves. **Análise de uso de SIG no Sistema de Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares em uma Cidade de Pequeno Porte**. Ilha Solteira, São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.

MACHADO, Bruna Aparecida Souza et al. Tendências tecnológicas de embalagens biodegradáveis através da prospecção em documentos de patentes. **Cadernos de Prospecção**, v. 5, n. 3, p. 132, 2012. Disponível em: <https://portalseer.ufba.br/index.php/nit/article/view/11531/pdf_17> Acesso em: fev. de 2020.

MAPA, S. M. S.; LIMA, R. S. **Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como Ferramenta Suporte a Estudos de Localização e Roteirização**. Artigo (XII SIMPEP). Bauru, São Paulo, 2005.

MEDEIROS, Rafael Basílio et al. **Estudo de viabilidade de implantação de estação de transferência de resíduos sólidos urbanos na região metropolitana de Florianópolis**. 2013.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Versão Preliminar para Consulta Pública. Brasília, setembro de 2011.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (PERS-RJ)**. 2013. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80058/PERS/RJ%20PERS_2013ago.pdf> Acesso em: fev. 2020.

MORO, Matheus Fernando. **O Problema do Carteiro Chinês Aplicado na Otimização de Rotas Usadas na Coleta de Lixo Reciclável: Um estudo de Caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, Paraná, 2014.

NARUO, Mauro Kenji. **O Estudo do Consórcio entre Municípios de Pequeno Porte para Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos Utilizando Sistemas de Informações Geográficas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 2003. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-30092010-115258/publico/Dissertacao_Mauro_Naruo.pdf> Acesso em: outubro de 2019.

NUNES, R. R.; SILVA, R. A. P. Transbordo de Resíduos Sólidos. *Revista Pensar Engenharia*, v.3, n.1, Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/ARTIGO_Esta%C3%A7%C3%A3o-de-transbordo.pdf> Acesso em: Janeiro de 2020.

SILVA, Arivano et al. **Lixo eletrônico e o impacto ambiental**. 2010. 2015.

OLIVEIRA, R. L. **Logística reversa: a utilização de um sistema de informações geográficas na coleta seletiva de materiais recicláveis**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 2011.

OLIVEIRA, A. V.; FURTADO, R. S.; ANDRADE, N. L. R.; OROZCO, M. M. D.; RIBEIRO, J. G. S. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Ji-Paraná/RO**. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. São Bernardo do Campo, SP. 2018. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/III-059.pdf>> Acesso em: fev. de 2020.

Open Street Map. (2019). *Open Street Map Statistics*. United Kingdom: OpenStreetMap Foundation. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/search?query=carapebus#map=11/-22.2039/-41.6526>>

PACHECO, Thabatha Moreira. *Uso e Benefício da Roteirização na Gestão de Transportes*. 2009. Monografia (Pós- Graduação em Logística Empresarial). Universidade Candido Mendes. Rio de Janeiro. 2009.

PAULA, Michel Ângelo Almeida Faria de. **Estudo de Roteirização de Veículos Empregando o Trascad**. Contribuição para a Distribuição Urbana de Cargas. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, São Paulo, 2009.

PAVIDINO, Gislaini Souza Magdalena; PINTO, Vicente Paulo dos Santos. **Resíduos Sólidos, Políticas Públicas e Educação Ambiental**. IX EPEA. Juiz de Fora, Minas Gerais, 2017. Encontro Pesquisa em Educação Ambiental.

PEREIRA, Claudia Diavan et al. *Metodologia para implantação de estação de transferência de resíduos sólidos urbanos: um exemplo de aplicação*. 2013.

PLAZA, Conrado Vidotte et al. *Localização De Centros De Integração Logística Considerando Critérios Econômicos E Ambientais: Aplicação Ao Transporte De Soja No Brasil*. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Log%C3%ADstica/Modelagem%20em%20Log%C3%ADstica/4_333_AC.pdf> Acesso em: Julho de 2020.

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei nº 8.006 de 25 de junho de 2018. Modifica a Lei nº 5.502 de 15 de julho de 2009, que dispõe sobre a substituição e recolhimento de sacolas plásticas em estabelecimentos comerciais localizados no estado do Rio de Janeiro, como forma de colocá-las à disposição do ciclo de reciclagem e proteção ao meio ambiente. Disponível em: <<https://anaferj.blogspot.com/2018/06/doerj-de-26062018.html>> Acesso em: Agosto de 2020.

ROVIRIEGO. Lucas Fernando Vaquero. **Proposta de uma Metodologia para a Avaliação de Sistemas de Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Domiciliares**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com Ênfase em Transportes). Universidade de São Carlos. São Carlos, São Paulo, 2005.

SALLES, Rosemberg Silva. **Estudo de Roteirização de Veículos com Apoio de um Sistema de Informações Geográficas**- Contribuição para o Transporte Urbano de Empregados por uma Frota de Ônibus Fretada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2013.

SALVADOR, Carla. **Roteirização para a Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos e Coleta Seletiva em Atendimento à Legislação Vigente**: Estudo de Caso para o caso de São Mateus. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

SANTOS, F. L. C. **Aspectos da mobilização social para a coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos**: O caso do município de Coronel Xavier Chaves – MG. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2004.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 15.374, de 18 de maio de 2011. Dispõe sobre a proibição da distribuição gratuita de sacolas plásticas a consumidores em todos os estabelecimentos comerciais do Município de São Paulo, e dá outras providências. Diário Oficial de São Paulo, São Paulo, 18 mai.2011.

SNIS. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos-2017. Versão publicada Brasília, maio de 2019. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2017>> Acesso em: outubro de 2019.

SOUZA, Gláucia Cardoso de.; GUADAGNIN, Mário Ricardo. **Caracterização Quantitativa e Qualitativa dos Resíduos Sólidos Domiciliares**: O método de Quarteamento na Definição da Composição Gravimétrica em Cocal do Sul- SC. 3º seminário regional sul de resíduo sólido. 2009.

WIT, W. D. et al. Solucionar A Poluição Plástica: Transparência E Responsabilização. **Suíssa: WWF–Fundo Mundial para a Natureza**, 2019.