

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

Rodrigo Silva Imbelloni

**Modelagem de rotas tecnológicas potenciais para o gerenciamento de resíduos sólidos
urbanos no município do Rio de Janeiro**

Juiz de Fora
2024

Rodrigo Silva Imbelloni

**Modelagem de rotas tecnológicas potenciais para o gerenciamento de resíduos sólidos
urbanos no município do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento e Meio Ambiente. Linha de Pesquisa: Tecnologias Ambientais

Orientador: Prof. D.Sc. Samuel Rodrigues Castro

Coorientador: Prof. D.Sc. Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Cunha

**Juiz de Fora
2024**

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

Imbelloni, Rodrigo Silva.

Modelagem de rotas tecnológicas potenciais para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município do Rio de Janeiro / Rodrigo Silva Imbelloni. -- 2024.

139 f.

Orientador: Samuel Rodrigues Castro

Coorientador: Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Cunha
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

1. valorização de materiais recicláveis. 2. gravimetria. 3. apoio à decisão. 4. aproveitamento energético de resíduos. 5. emissões atmosféricas. I. Castro, Samuel Rodrigues, orient. II. Cunha, Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da, coorient. III. Título.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**Rodrigo Silva Imbelloni****Título: " Modelagem de rotas tecnológicas potenciais para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município do Rio de Janeiro."**

Dissertação apresentada ao **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL** da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em **ENGENHARIA CIVIL**, Área de concentração: Saneamento e Meio Ambiente.

Aprovada em 29/10/2024

BANCA EXAMINADORA**Prof. Dr. Samuel Rodrigues Castro** - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Cunha - Coorientador

Universidade Veiga de Almeida - RJ

Prof. Dr. Otavio Eurico de Aquino Branco - Membro Interno

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Ricardo Soares - Membro Externo

Universidade Veiga de Almeida - RJ

Juiz de Fora, 13/11/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Otavio Eurico de Aquino Branco, Professor(a)**, em 13/11/2024, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Soares, Usuário Externo**, em 22/11/2024, às 19:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Samuel Rodrigues Castro, Professor(a)**, em 27/11/2024, às 12:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Cunha, Usuário Externo**, em 30/11/2024, às 12:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2100597** e o código CRC **4EE6D8EB**.

Dedico este trabalho a todos os profissionais da limpeza urbana e aos catadores e catadoras de materiais recicláveis do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Rodrigues Castro, por ter me recebido com toda a atenção e respeito quando ainda aspirava a uma vaga no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Essa é a legítima demonstração da profissão de professor.

Agradeço à equipe da Masterplan Engenharia Consultiva Ambiental, representada por seu diretor Luiz Eduardo Nogueira Soraggi e sua gerente Brígida Evangelista, que nunca deixaram de acreditar em mim, mesmo nos momentos mais difíceis. Sua compreensão acima da média me permitiram avançar para um projeto de Mestrado Acadêmico há 20 anos em espera por uma oportunidade.

Agradeço ao governo da República Federativa do Brasil, que, por meio da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), me permitiu ingressar nesse reconhecido Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e me forneceu os meios para me tornar um melhor profissional e de forma gratuita. Reconheço viver em um país imperfeito, mas também reconheço a perfeição do meu país na busca por trazer educação superior de qualidade e com potencial de mudar vidas. Espero poder devolver ao meu país tudo o que ele investiu em mim, desde a graduação na Universidade Federal Fluminense (UFF), a pós-graduação *lato sensu* na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e agora uma pós-graduação *stricto sensu* na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

Agradeço ao amigo Engenheiro José Henrique Penido Monteiro. Referência mundial no manejo de resíduos sólidos urbanos em grandes metrópoles, é um dos maiores propagadores de informações sobre resíduos sólidos e meio ambiente e minha maior referência técnica no assunto.

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Cunha pela coorientação do presente trabalho, sendo um grande incentivador e uma referência da minha geração no segmento de engenharia sanitária e ambiental.

Por fim, agradeço à minha família, em especial meus filhos Daniel e Isabela, minha mãe Maria das Graças, meu falecido pai Floriano, meus tios Geraldo e Jorge e minha querida esposa Dra. Helga Santos, ex-colega na graduação, companheira de vida, melhor amiga e maior incentivadora a continuar estudando e me aperfeiçoando. Sem ela, a despeito de todas as pessoas aqui citadas, isso tudo não seria possível. Essa é a verdadeira manifestação do amor, querer sempre o bem do outro. Ela nunca desistiu de mim.

Vi ontem um bicho/Na imundície do pátio/Catando comida entre os detritos./Quando achava alguma coisa,/Não examinava nem cheirava:/Engolia com voracidade./O bicho não era um cão,/Não era um gato,/Não era um rato./O bicho, meu Deus, era um homem. (Bandeira, 1948).

RESUMO

Com o crescimento da população urbana e a mudança nos hábitos de consumo, o manejo dos resíduos sólidos urbanos (RSU) se transformou em uma das maiores dificuldades da administração pública municipal. Com a aprovação da Lei nº. 12.305/10 (atualmente regulamentada pelo Decreto 10.936/2022), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), novos conceitos são criados e um novo desafio se apresenta para o manejo do RSU por parte das municipalidades, demandando a adoção de rotas tecnológicas que promovam a recuperação e o aproveitamento dos materiais (reciclagem, compostagem e incineração com geração de energia), desviando-os de aterros sanitários e, por consequência, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (GEE). O atual cenário nacional, caracterizado por um índice de recuperação de materiais médio de 1,9%, demonstra o grau de dificuldade na valorização do RSU, a exemplo do volume expressivo que ainda segue para disposição final sem processamento prévio. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo modelar rotas tecnológicas para o aproveitamento do RSU no município do Rio de Janeiro, utilizando-se de ferramenta de apoio à tomada de decisão denominada “Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU”, versão 1.01, do Programa de Cooperação para a Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos - ProteGEEr. A metodologia de estudo consistiu em pesquisas bibliográficas exploratórias por meio da prospecção de dados da literatura especializada, publicações científicas e dados oficiais do Município do Rio de Janeiro (MRJ) e da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB). Com base nos dados, foi possível elaborar um diagnóstico do contexto atual da geração de RSU no MRJ, fundamentando a alimentação da Ferramenta ProteGEEr e a definição de modelagens segundo Cenário Base (2024) e Futuros (2032 e 2040), incluindo Cenários de Controle para fins comparativos. Como resultado, obteve-se dados quantitativos do total de RSU desviado pelas diferentes rotas tecnológicas, de forma particularizada segundo as diferentes Áreas de Planejamento do MRJ. Por meio da modelagem também foi possível obter dados potenciais de geração de energia elétrica na rota tecnológica de tratamento térmico e o total de emissões evitadas de GEE, como consequência do aproveitamento de materiais e seu desvio do Aterro Sanitário de Seropédica. Diante dos resultados, verifica-se que a ferramenta ProteGEEr é um instrumento de valor significativo para apoio ao planejamento da gestão de RSU nos municípios, fornecendo elementos centrais para o planejamento de rotas tecnológicas e o consequente alcance das metas nacionais de recuperação e aproveitamento de materiais.

Palavras-chave: valorização de materiais recicláveis; gravimetria; apoio à decisão; aproveitamento energético de resíduos; emissões atmosféricas.

ABSTRACT

With the growth of the urban population and changes in consumption habits, the management of municipal solid waste (MSW) has become one of the greatest challenges for municipal public administration. With the approval of Law no. 12.305/10 (currently regulated by Decree 10.936/2022), which establishes the National Solid Waste Policy (PNRS), new concepts are created and a new challenge arises for MSW management by municipalities, demanding the adoption of technological routes that promote the recovery and use of materials (recycling, composting and incineration with energy generation), diverting them from landfills and, consequently, reducing greenhouse gas (GHG) emissions. The current national scenario, characterized by an average material recovery rate of 1.9%, demonstrates the degree of difficulty in MSW recovery, as exemplified by the significant volume that still goes to final disposal without prior processing. In this context, this study aims to model technological routes for the use of MSW in the municipality of Rio de Janeiro, using a decision support tool called "Technological Routes and Costs for MSW Management", version 1.01, from the Cooperation Program for Climate Protection in Solid Waste Management - ProteGEEr. The study methodology consisted of exploratory bibliographic research through the prospection of data from specialized literature, scientific publications and official data from the Municipality of Rio de Janeiro (MRJ) and the Municipal Urban Cleaning Company of Rio de Janeiro (COMLURB). Based on the data, it was possible to elaborate a diagnosis of the current context of MSW generation in MRJ, supporting the feeding of the ProteGEEr Tool and the definition of modeling according to the Base Scenario (2024) and Future (2032 and 2040), including Control Scenarios for comparative purposes. As a result, quantitative data were obtained on the total MSW diverted by the different technological routes, in a particularized way according to the different Planning Areas of MRJ. Through modeling, it was also possible to obtain potential data on electricity generation in the thermal treatment technological route and the total avoided GHG emissions, as a consequence of the use of materials and their diversion from the Seropédica Sanitary Landfill. In view of the results, it appears that the ProteGEEr tool is an instrument of significant value to support the planning of MSW management in municipalities, providing central elements for the planning of technological routes and the consequent achievement of national targets for the recovery and use of materials.

keywords: valuation of recyclable materials; gravimetry; decision support; energy recovery from waste; atmospheric emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Síntese das rotas tecnológicas predominantes de RSU no Brasil	43
Figura 2 – Macrodivisão administrativa do MRJ	49
Figura 3 – Composição do RSU segundo grandes grupos de materiais no MRJ (%) – 2022 ..	59
Figura 4 – Evolução da produção de RSU no MRJ – 1991 a 2022	68
Figura 5 – Evolução do índice de geração <i>per capita</i> de RSU no MRJ (kg/hab.dia) – 1991 a 2022	68
Figura 6 – <i>Boxplot</i> de variâncias amostrais nas análises gravimétricas segundo APs – grupo Recicláveis.....	76
Figura 7 – <i>Boxplot</i> de variâncias amostrais nas análises gravimétricas segundo APs – grupo Orgânicos.....	77
Figura 8 – Gravimetria média das APs do MRJ em relação às médias metropolitana e nacional	79
Figura 9 – <i>Boxplot</i> comparativo entre o Cenário Controle e os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) – grupo recicláveis.....	82
Figura 10 – <i>Boxplot</i> comparativo entre o Cenário Controle e os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) – grupo orgânicos	83
Figura 11 – <i>Boxplot</i> comparativo entre o Cenário Controle e os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) – tratamento térmico (geração de e.e.)	83
Figura 12 – <i>Boxplot</i> comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – grupo recicláveis	84
Figura 13 – <i>Boxplot</i> comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – grupo orgânicos.....	85
Figura 14 – <i>Boxplot</i> comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – tratamento térmico (geração de e.e.)	85
Figura 15 – <i>Boxplot</i> comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – disposição final de RSU no aterro sanitário	86
Figura 16 – Evolução temporal do aproveitamento de materiais segundo Cenários Base (2024) e Futuros (2032 e 2040) e APs	87
Figura 17 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-1 – Cenário Base (2024)	96
Figura 18 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-1 – Cenário 1 (2032)	97
Figura 19 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-1 – Cenário 2 (2040)	98
Figura 20 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-5 – Cenário Base (2024)	105
Figura 21 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-5 – Cenário 1 (2032)	106
Figura 22 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-5 – Cenário 2 (2040)	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Bairros do Rio de Janeiro segundo Áreas de Planejamento	49
Quadro 2 – População do MRJ segundo Áreas de Planejamento – 2022.....	51
Quadro 3 – Exemplos de métodos de tratamento térmico de RSU	89
Quadro 4 – Exemplos de métodos de recuperação de matéria orgânica	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa de massa de RSU coletada segundo macrorregiões de governo – 2021	37
Tabela 2 – Índice de cobertura dos serviços de coleta domiciliar (população total e urbana) segundo macrorregiões de governo – 2021	38
Tabela 3 – Massa média <i>per capita</i> de RSU segundo macrorregiões de governo – 2021	38
Tabela 4 – Coleta seletiva segundo macrorregiões de governo – 2021.....	39
Tabela 5 – Quantitativo estimado de materiais produzidos, segundo composição gravimétrica do RSU no Brasil – 2020.....	40
Tabela 6 – Quantitativo estimado de materiais recicláveis produzidos, segundo composição gravimétrica do RSU no Brasil – 2020.....	40
Tabela 7 – Taxa estimada de recuperação de materiais no Brasil – 2022	41
Tabela 8 – Estimativa de destinação final de RSU no Brasil – 2020	42
Tabela 9 – Unidades territoriais para cálculo do IDS no MRJ.....	52
Tabela 10 – IDS segundo indicadores específicos – 2010	53
Tabela 11 – IDS segundo Áreas de Planejamento e População	54
Tabela 12 – Geração de RSU no MRJ – 2022.....	55
Tabela 13 – Índice de Recuperação de Resíduos - IRR do MRJ – 2022.....	56
Tabela 14 – Recuperação e descarte de materiais no MRJ – 2022.....	56
Tabela 15 – Gastos com transferência, transporte e disposição final de resíduos em aterro sanitário – 2022	57
Tabela 16 – Composição gravimétrica do RSU do MRJ, segundo APs (%) – 2022	58
Tabela 17 – População das APs segundo Censos Demográficos	62
Tabela 18 – Diferenças entre o Censo 2022 e projeções populacionais baseadas em censos anteriores	66
Tabela 19 – Projeção populacional do ERJ – 2010 a 2040	66
Tabela 20 – Índice de geração per capita de RSU a ser adotado para modelagem de cenários futuros.....	69
Tabela 21 – Percentual de recuperação de materiais recicláveis (Meta 6/ Indicador Global 6)	71
Tabela 22 – Percentual de recuperação de matéria orgânica para tratamento biológico (Meta 7/ Indicador Global 7).....	71

Tabela 23 – Percentual de recuperação de materiais para fins de aproveitamento energético por meio de tratamento térmico (Meta 9/ Indicador Global 9).....	71
Tabela 24 – Percentual de massa total recuperada (Meta 4/ Indicador Global 4).....	72
Tabela 25 – Cenários a serem modelados	72
Tabela 26 – Metas para recuperação de materiais definidas pelo PERS e pelo PMGIRS em comparação ao PLANARES	73
Tabela 27 – Estimativa populacional das APs segundo Método AiBi.....	74
Tabela 28 – Estimativa de geração de RSU segundo cenários de modelagem e APs do MRJ – 2024 a 2040	75
Tabela 29 – Gravimetria média segundo APs	78
Tabela 30 – Resultados da modelagem de rotas tecnológicas para o MRJ – Cenários Base, 1 (2032) e 2 (2040)	81
Tabela 31 – Quantitativo de materiais a serem coletados segundo tipo de coleta para AP-1 – Cenários 1 e 2	92
Tabela 32 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-1, segundo o tipo de coleta – Cenário 1 (2032)	93
Tabela 33 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-1, segundo o tipo de coleta – Cenário 2 (2040)	93
Tabela 34 – Resultado da modelagem de rotas tecnológicas da AP-1 – Cenários Base, 1, 2 e Controle	94
Tabela 35 – Geração de energia elétrica equivalente na AP-1 segundos Cenários Futuros.....	94
Tabela 36 – Balanço de emissões de GEE da AP-1	95
Tabela 37 – Quantitativo de materiais a serem coletados segundo tipo de coleta para AP-5 – Cenários 1 e 2	101
Tabela 38 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-5 – Cenário 1 (2032)	101
Tabela 39 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-5 – Cenário 2 (2040)	102
Tabela 40 – Resultado da modelagem de rotas tecnológicas da AP-5 – Cenários Base, 1, 2 e Controle	103
Tabela 41 – Geração de energia elétrica equivalente na AP-5 segundos Cenários 1 e 2	103
Tabela 42 – Balanço de emissões de GEE da AP-5	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMRSB	Atualização do Marco Regulatório do Saneamento Básico
AP	Área de Planejamento
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EC	Economia Circular
E.E.	Energia Elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDS	Índice de Desenvolvimento Social
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPP	Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos
IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano
IRM	Instituto Rio Metrópole
IRR	�ndice de Recupera�o de Resíduos
LDNSB	Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MRJ	Município do Rio de Janeiro
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
MME	Ministério de Minas e Energia
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organiza�o das Na�es Unidas
PCI	Poder calorífico inferior
PCRJ	Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro

PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PMetGIRS	Plano Metropolitano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
ProteGEEr	Cooperação para a proteção do clima na gestão dos resíduos sólidos urbanos – ProteGEEr
RDO	Resíduos Domiciliares
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RPU	Resíduos Públicos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINIR+	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNIS/RS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – módulo resíduos sólidos

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	7
1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS	21
2.1.1 Origem dos serviços de limpeza urbana no Brasil	21
2.1.2 Recuperação de materiais	22
2.1.3 Economia circular	23
2.1.4 Rotas tecnológicas.....	25
2.2 LEGISLAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	27
2.2.1 Nacional	28
2.2.1.1 A Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico - LDNSB (Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010)	28
2.2.1.2 Atualização do Marco Regulatório do Saneamento Básico - AMRSB (Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020)	29
2.2.1.3 O Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.....	30
2.2.1.4 O Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES (Decreto n. 11.043, de 13 de abril de 2022)	31
2.2.1.5 Os Certificados de Crédito da Reciclagem (Decreto nº 11.413, de 13 de fevereiro de 2023).....	32
2.2.2 Estadual	33
2.2.2.1 A Política Estadual de Resíduos Sólidos (Lei nº 4.191, de 30 de setembro de 2003)	33
2.2.2.2 O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro – PERS/RJ (2013) .	33
2.2.2.3 O Sistema de Logística Reversa de Embalagens (Lei nº 8.151, de 01 de novembro de 2018).....	34
2.2.2.4 O Plano Metropolitano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMetGIRS (2023)	34
2.2.3 Municipal	35
2.2.3.1 A Lei Diretrizes para a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos no Município do Rio de Janeiro (Lei nº 4.969, de 03 de dezembro de 2008).....	35
2.2.3.2 O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do município do Rio de Janeiro – PMGIRS (2021).....	36
2.3 O PANORAMA DO RSU NO BRASIL.....	36
2.3.1 Coleta domiciliar	37

2.3.2	Coleta seletiva	39
2.3.3	Composição gravimétrica.....	39
2.3.4	Processamento e disposição final.....	42
2.3.5	Síntese das rotas tecnológicas predominantes no Brasil	43
2.3.6	Sustentabilidade econômico-financeira.....	44
3	MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE ESTUDO	48
3.2	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS	59
3.2.1	Testes de aderência à normalidade.....	60
3.2.2	Testes paramétricos e não paramétricos.....	60
3.2.3	Testes de hipóteses - comparações.....	61
3.2.4	Ferramenta de análise estatística	62
3.3	PROJEÇÃO POPULACIONAL	62
3.3.1	Método de projeção aritmética.....	63
3.3.2	Método de projeção geométrica	63
3.3.3	Método de projeção AiBi ou <i>Apportionment Method</i>	64
3.4	PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE RSU	67
3.5	APLICAÇÃO DA FERRAMENTA PROTEGEER E METAS DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4.1	POPULAÇÃO, GERAÇÃO DE RSU E GRAVIMETRIA.....	74
4.2	MODELAGEM DE ROTAS TECNOLÓGICAS.....	80
4.2.1	Aspectos gerais da modelagem	80
4.2.2	Aspectos específicos da modelagem (APs 1 e 5).....	91
4.2.2.1	Rotas Tecnológicas AP-1	92
4.2.2.2	Rotas Tecnológicas AP-5	100
4.2.3	Análise crítica das modelagens	109
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
6	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	116
7	REFERÊNCIAS.....	117
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS TESTES DE NORMALIDADE DOS DADOS DE GRAVIMETRIA	134

1 INTRODUÇÃO

Quando se fala em resíduos remete-se à sua antiga semântica e torna-se quase inerente iniciar o presente trabalho falando sobre o lixo. Tal termo, muito utilizado quando deseja-se referir a algo sem valor (Eigenheer, 2003 p. 90), ainda é muito utilizado na cultura popular e pode ser parte da justificativa para a ineficiência do estado brasileiro em promover a valorização de materiais componentes da massa do que é tecnicamente classificado como Resíduo Sólido Urbano (RSU).

Retomando seu aspecto de classificação, lixo é, em geral considerado, aquilo que se considera imprestável, que demanda seu expurgo obrigatório para longe do convívio do indivíduo, não importando para onde vá. Segundo Eigenheer (2003) é possível trazer as definições do que é lixo em diversos dicionários de língua portuguesa em diversos momentos da história.

Lixo. s.m. 1. Aquilo que se varre da casa, do jardim, da rua, e se joga fora; entulho. 2. P. ext. Tudo o que não presta e se joga fora. 3. Sujidade, sujeira, imundície. 4. Coisa ou coisas inúteis, velhas, sem valor. (Ferreira, 1986).

Lixo. s.m. Lat. lix. 1. Tudo que é varrido para tornar limpa uma casa ou qualquer objeto. 2. Imundícias que vão estrumar terras. 3. Sobras de cozinha que se deitam fora. 4. Sujidade. 5. Farm. Ant. Excremento. 6. Escória, ralé. 7. Cousas inúteis. (Freire, 1957).

Lixo. s.m. O que se varre da casa e em geral tudo o que não presta e se deita fora; cisco; imundície; (fig) escória; ralé (Lima; Hildebrando, [s.d.]).

Lixo. s.m. imundície; porcaria (Fonseca, 1927).

Lixo. s.m. Aquilo que se varre, para tornar limpa uma casa, um imóvel, qualquer objeto. Sujidade, imundice. Fig. Ralé (Do lat. lix ou lixo) (Figueiredo, 1925).

Lixo. s.m. Tudo o que é varrido de uma casa e se deita para a estrumeira¹ ou para o reservatório portátil conhecido pela designação de barril de lixo. § Imundícias que vão estrumar terras; sobras de cozinha que se deitam fora. § Excremento: Em antigas farmacopéias o lixo de lagarto era medido preconizado contra as maleitas. §. (Fig.) Escória; ralé. § Barril do lixo, barril, celha ou caixote em que se deita o lixo das casas; lugar onde se deitam coisas inúteis; (fig. burl.) pessoa a quem se dá aquilo que os outros não querem. § Pá do Lixo; pequena pá concava ou em fôrma de gaveta aberta por um lado, onde se recolhe o lixo ao passo que se vai varrendo. § F. lat. Lix (Aulete; Valente, 1881).

Lixo. s.m. O que se varre da casa, e o que não serve nas cozinhas, e se lança fora, ou ao barril do lixo para ter depois a conveniente remoção. No Brazil dizem geralmente: cisco. Barril do lixo; barril, caixa, ou caixote em que se junta o lixo para depois ser removido. Excremento, imundície. O lixo do povo; (fig.) a ínfima plebe, a escória, ralé (Silva, [s.d.]).

Lixo. s.m. O que se varre das casas; imundícia (Fonseca, 1927).

¹ Estrumeira. s.f. Esterqueira, lugar onde se acumula, prepara e fermenta o estrume. Fig. Lugar imundo: Aquilo não é casa, é uma estrumeira... (Fig.) Coisa ou estado civil, grosseiro ou objecto. Estrume + eira.

Lixo, no sentido apresentado, na maioria dos casos é utilizado como um adjetivo, caracterizando aquela massa imunda gerada nas nossas atividades cotidianas – nossas externalidades – como imprestáveis. Nesse aspecto, o nosso subconsciente irá sempre rejeitar e deixar de atribuir valor a algo que culturalmente é classificado ou caracterizado como lixo ou imundície. Pode-se ver claramente como o poema “O Bicho”, do escritor pernambucano Manuel Bandeira, critica a miséria humana do Rio de Janeiro de 1948 por meio da metáfora do lixo/imundície (Sousa; Pereira; Calbino, 2019):

Vi ontem um bicho/Na imundície do pátio/Catando comida entre os detritos./Quando achava alguma coisa,/Não examinava nem cheirava:/Engolia com voracidade./O bicho não era um cão,/Não era um gato,/Não era um rato./O bicho, meu Deus, era um homem (Bandeira, 1948).

Ainda segundo Canejo (2021 p.10), o lixo é algo inventado, um erro de *design*, uma forma encontrada pela sociedade para fugir das suas responsabilidades para consigo mesmo. Colocado em perspectiva, é uma dívida que só aumenta com o avanço do adensamento populacional e a expansão das áreas urbanas, e, associados aos novos padrões de vida e consumo dos indivíduos, amplia-se o passivo das cidades e os desafios para a gestão do RSU (Luiz da Silva *et al.*, 2019 p.1).

O conceito de lixo ainda permeia a cultura das pessoas, talvez mais como um adjetivo do que um substantivo, já que a partir de 2010, a PNRS (Brasil, 2010) traz uma nova e definitiva mudança de conceito. Esse marco regulatório do setor passa a definir, de forma clara, o que é resíduo e o que é rejeito, extinguindo o termo lixo do rol semântico especializado. É o início da quebra do paradigma lixo como algo imprestável e sem valor e abre caminho para novas perspectivas no campo da gestão do RSU. Porém, segundo dados da ONU mais de 2 bilhões de toneladas de RSU foram geradas no planeta apenas no ano de 2023. A população vem crescendo, a geração de RSU cresce à mesma proporção e, como consequência, mais poluição e mais emissões associadas de gases de efeito estufa (GEE) são verificados.

No Brasil, com a entrada em vigor da PNRS (Brasil, 2010), passa-se a dispor de um marco regulatório específico para esse setor, estabelecendo ações de proteção à saúde humana, definindo conceitos de sustentabilidade e estabelecendo metas para a criação de novas tecnologias para a disposição final de rejeitos, em substituição aos antigos aterros controlados e lixões (Maiello *et al.*, 2018 p.26), que, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (Brasil, 2023) perfazem um total de 1.572 unidades ainda ativas no Brasil no ano de 2022, não contando as áreas contaminadas por resíduos ainda não recuperadas. A

PNRS passa, então, a impor aos municípios obrigações quanto ao adequado gerenciamento dos seus resíduos, sendo a coleta, a recuperação de materiais e a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos a rota tecnológica mínima aceitável (Pimentel, 2017 p.34).

Pouco mais de uma década após a promulgação da PNRS (Brasil, 2010), verifica-se que o conceito de Rotas Tecnológicas ganha força, no sentido da necessidade da adoção de medidas que impulsionem a logística reversa dos diversos materiais, promova a inclusão de catadores e catadoras e desvie dos aterros sanitários, aterros controlados e lixões os materiais com valor econômico agregado. E quando se fala em Rotas Tecnológicas, a reciclagem e compostagem são as rotas mais conhecidas para fins de recuperação econômica. No entanto, sua aplicabilidade se localiza em patamares mínimos, a exemplo de apenas 1,9% desses materiais (entre secos e úmidos) terem sido recuperados no Brasil no ano de 2021 (Brasil, 2023a), índice baixo se comparado ao potencial de geração de materiais.

Diante do presente cenário, entende-se que os 5.570 municípios e o Distrito Federal, titulares dos serviços de limpeza urbana e de posse da ferramenta adequada, podem modelar rotas tecnológicas para o manejo de RSU que mais se adequem à sua realidade, obtendo respostas quanto a abrangência das rotas selecionadas, investimentos necessários, custos operacionais, auferimento de receitas acessórias e tecnologias necessárias para enquadramento municipal à PNRS (Brasil, 2010) e às metas do PLANARES (Brasil, 2022c).

Por todo o exposto, o presente estudo tem como objetivo geral modelar rotas tecnológicas para o aproveitamento e valorização do RSU para o município do Rio de Janeiro utilizando-se como referência as Metas 4, 6, 7 e 9 estabelecidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c), relacionadas à recuperação de materiais (recicláveis e orgânicos) e recuperação energética, com seu consequente desvio de aterros sanitários e lixões. A modelagem será desenvolvida por meio do uso da ferramenta de suporte à decisão “Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU”, versão 1.01, do Programa de Cooperação para a Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos - ProteGEEr (Brasil, 2022b), oportunidade em que verificará a sua aplicabilidade como ferramenta, de caráter gratuita, de planejamento de sistemas de limpeza urbana.

Busca-se avaliar as rotas tecnológicas potenciais a serem adotadas pelo município do Rio de Janeiro (MRJ) em um cenário base (ano de 2024) e dois cenários futuros (anos de 2032 e 2040) com o propósito de se alcançar as metas de recuperação de materiais e aproveitamento energético estabelecidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c) e, ao mesmo tempo, entender se tais rotas conduzem ao que preconiza a PNRS – disposição final ambientalmente adequada de

rejeitos nos aterros sanitários após esgotadas todas as possibilidades de aproveitamento dos resíduos.

Como objetivos específicos, considera-se:

- Diagnosticar a rota tecnológica atual no município do Rio de Janeiro;
- Modelar três rotas tecnológicas com uso de ferramenta específica de apoio à tomada de decisão;
- Realizar análise crítica acerca dos resultados reportados e a realidade do município do Rio de Janeiro, com vistas a uma possível validação da ferramenta.

Importante não deixar de mencionar a Agenda 2030 da organização das Nações Unidas (ONU), onde a temática de gestão de RSU possui aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo eles:

- **ODS 1 – ERRADICAÇÃO DA POBREZA:** trabalhadores de resíduos em economias informais que não têm proteções de saúde ou sociais são vulneráveis à exploração e recebem apenas o valor material dos materiais que coletam.
- **ODS 2 – FOME ZERO E AGRICULTURA SUSTENTÁVEL:** enquanto a fome global está aumentando, um terço de todos os alimentos cultivados no mundo é desperdiçado, compondo massa considerável do RSU.
- **ODS3 – SAÚDE E BEM-ESTAR:** comunidades sem serviços municipais adequados de gestão de RSU recorrem ao despejo e à queima a céu aberto do RSU, ambos com consequências negativas significativas para a saúde, especialmente para mulheres e crianças.
- **ODS 4 – EDUCAÇÃO DE QUALIDADE:** a abordagem sobre a gestão do RSU nos ensinos fundamental e médio é incomum, resultando na formação de indivíduos pouco conectados ao tema.
- **ODS 5 – IGUALDADE DE GÊNERO:** a experiência das pessoas com o RSU e sua gestão é diferenciada por gênero, com maior peso sobre as mulheres.
- **ODS 6 – ÁGUA POTÁVEL E SANEAMENTO:** poluentes derivados de aterros controlados e lixões (em especial líquidos percolados) podem contaminar fontes de água doce e cadeias alimentares associadas.
- **ODS 7 – ENERGIA LIMPA E ACESSÍVEL:** o desperdício alimentar inevitável pode ser usado para produzir biogás, um combustível renovável de combustão limpa que pode ser utilizado para combater a pobreza energética.
- **ODS 8 – TRABALHO DECENTE E CRESCIMENTO ECONÔMICO:** o setor de gestão de resíduos e reciclagem está em uma posição única para melhorar a eficiência

global dos recursos, dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental e proporcionar oportunidades de trabalho seguras e dignas para todos.

- **ODS 9 – INDÚSTRIA, INOVAÇÃO E INFRAESTRUTURA:** sistemas descentralizados de gestão de RSU podem atrair investimentos do setor privado, incentivando a inovação, o empreendedorismo, o desenvolvimento de tecnologia nacional, maior eficiência no uso dos recursos e aumento das oportunidades de emprego.
- **ODS 10 – REDUÇÃO DAS DESIGUALDADES:** as desigualdades intrageracionais e intergeracionais devem ser abordadas por meio do desenvolvimento de sistemas de gestão de RSU e recursos. É necessário o envolvimento de todas as partes interessadas, pois a transição para uma economia mais circular não ocorrerá por si só.
- **ODS 11 – CIDADES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS:** a gestão de RSU é um serviço básico sem o qual a qualidade do ar e as condições de vida se degradam, levando a problemas de saúde e descontentamento social.
- **ODS 12 – CONSUMO E PRODUÇÃO RESPONSÁVEIS:** os padrões de produção e consumo impactam diretamente a geração do RSU. Para reduzir o desperdício e prevenir a poluição, são necessários esforços conjuntos de empresas, governos e cidadãos.
- **ODS 13 – AÇÃO CONTRA A MUDANÇA GLOBAL DO CLIMA:** resíduos mal gerenciados geram uma ampla gama de emissões de GEE que contribuem para as mudanças climáticas, sendo o metano de aterros e lixões a mais significativa, além de carbono preto e outras emissões resultantes da prática generalizada de queima a céu aberto de resíduos.
- **ODS 14 – VIDA NA ÁGUA:** compreender por que e como os resíduos terrestres chegam ao mar e implementar medidas de mitigação é essencial.
- **ODS 15 – VIDA TERRESTRE:** o ambiente terrestre continua sendo o principal local de descarte de resíduos.
- **ODS 16 – PAZ, JUSTIÇA E INSTITUIÇÕES EFICAZES:** a crescente globalização da gestão de resíduos exige uma cooperação internacional mais intensa para fortalecer a capacidade nacional para a gestão segura de resíduos perigosos e para prevenir seu tráfico ilegal.
- **ODS 17 – PARCERIAS E MEIOS DE IMPLEMENTAÇÃO:** os investimentos atuais em gestão de RSU são insuficientes. Investimentos muito maiores serão necessários no futuro, para lidar com o aumento da geração e o potencial de acúmulo do RSU no ambiente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o contexto legal e normativo brasileiro que cerca a temática de resíduos sólidos, com destaque aos avanços legais nos últimos anos, com marco inicial da promulgação da PNRS (Brasil, 2010) em agosto de 2010. Da mesma forma, será feita a conceituação do que se entende e discute sobre Rotas Tecnológicas, promovendo-se revisão bibliográfica acerca do tema. Por fim, será feito um panorama referente ao RSU no Brasil, demonstrando o contexto atual nacional.

2.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Para a presente revisão bibliográfica, torna-se importante apresentar alguns aspectos fundamentais necessários para os objetivos do presente estudo, conforme apresentado nos tópicos seguintes.

2.1.1 Origem dos serviços de limpeza urbana no Brasil

O primeiro serviço oficial de limpeza urbana do Brasil começa no município do Rio de Janeiro no ano de 1876, ainda no período imperial. O objetivo principal desse sistema de limpeza urbana, e que acaba por propagar-se posteriormente para os demais grandes centros urbanos, baseou-se em três princípios fundamentais até hoje utilizados: 1) coletar; 2) transportar; 3) destinar. Era o básico dos serviços, que ganham impulsionamento à medida que a sociedade civil, ainda representada por empresários (em especial comerciantes) pressiona governos locais para eliminar o incômodo dos resíduos abandonados nos logradouros públicos (IBAM, 2001 p.3).

Em última análise, os serviços de limpeza urbana não nascem com o objetivo do benefício direto da saúde pública, embora tal relação já fosse clara quanto aos efluentes sanitários e as consequências da sua disposição inadequada (Murtha; Castro; Heller, 2015 p.201). Ele nasce de uma necessidade da defesa dos interesses econômicos dos empresários dos grandes núcleos comerciais da capital do império, que acaba por impor maior grau de salubridade aos ambientes externos e conseqüente melhora das condições de saúde pública. Nas décadas seguintes, mesmo após inúmeras iniciativas governamentais que já demonstravam a preocupação com a problemática dos resíduos sólidos no país (Nascimento Neto; Moreira, 2010 p.18), esse componente sanitário só alcança o *status* oficial de eixo fundamental do saneamento

básico no Brasil no ano de 2007, por meio da Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico (LDNSB) (Brasil, 2007).

2.1.2 Recuperação de materiais

As ações no sentido da recuperação de materiais por meio da valorização econômica dos resíduos surgem em um momento em que se discute meios para o desenvolvimento sustentável como pressuposto para se garantir o futuro das próximas gerações (Eigenheer, 2003 p. 157). Tem como base a necessidade do desenvolvimento econômico ancorado em conceitos de utilização racional dos recursos naturais – matéria prima primária – e a valorização do RSU ao ponto de sua recuperação e reintrodução na cadeia produtiva como matéria prima secundária ou energia.

Porém, recuperar materiais oriundos do RSU é, em si, complexo. Independente do porte do município e do tipo de material, tal recuperação possui relação de dependência direta com as iniciativas de gestão de resíduos sólidos sob a responsabilidade de municípios e do Distrito Federal, segundo a LDNSB (Brasil, 2007). E quando se trata de gestão de resíduos sólidos, há uma grande variação entre as diferentes culturas e regiões. Demanda ampla compreensão de todos os seus aspectos, que envolvem geração, armazenamento, coleta, transporte, processamento para fins de recuperação e valorização de materiais e, por fim, a sua disposição final (Mihelcic; Zimmerman, 2018 p.549).

Segundo Canejo (2021), os materiais recuperados secos, por exemplo, devem ser armazenados em estrutura adequada, prensados, enfardados e transportados para a sua comercialização, esta última que absorverá parte ou todos os tipos de materiais, em função do mercado local. Logo, a avaliação de mercado torna-se fundamental para a definição de quais materiais secos recicláveis devem ser recuperados em uma ou mais modalidades de coleta seletiva, onde cada material apresenta um grau específico de complexidade, que segundo Mihelcic e Zimmerman (2018) podem ser assim sintetizados:

- **PLÁSTICOS:** o desafio de recuperação e reciclagem de plástico é a gama de materiais disponíveis no mercado, que não são necessariamente compatíveis quando reciclados. Demandam separação por tipo de plástico (segundo código internacional de resina), onde os plásticos mais recuperados são o Polietileno Tereftalado (PET) e o Polietileno de Alta Densidade (PEAD);
- **PAPEL/PAPELÃO:** o papel/papelão recuperado é transformado de volta em novos produtos celulósicos. Entretanto, o papel reciclado tem menos valor

agregado pois, no processo de reciclagem, há o encurtamento das fibras, diminuindo o seu potencial de uso posterior;

- METAIS: o elevado gasto energético no processamento de minérios brutos faz com que ligas metálicas recuperadas (ferrosos e não ferrosos) tenham grande valor no mercado de recicláveis, uma vez que a sua reconversão em matéria prima secundária requer menores gastos de energia, água e com consequente redução nas emissões gasosas;
- VIDROS: o sistema de conversão de vidros recuperados em novos vidros já está consolidado no mercado. Entretanto, as fundições de vidro estão presentes em número inferior às fundições de metais, demandando maiores custos de transporte. Ou seja, o fator geográfico pode limitar o interesse econômico na recuperação de resíduos de vidro dependendo da região.

Já a compostagem é igualmente complexa, agregando outros aspectos para a sua viabilização, como controle de temperatura, oxigênio e umidade por exemplo (Canejo, 2021). Diante da complexidade que se apresenta, a própria PNRS (Brasil, 2010) coloca a valorização dos materiais na esteira da busca por um maior desenvolvimento sustentável nacional. Entretanto, este desafio se associa a outros de igual complexidade, como a extinção dos lixões, a implantação de aterros sanitários e a valorização de catadores e catadoras, em uma problemática onde a gestão integrada dos resíduos é competência dos municípios (Brasil, 2010), os quais ainda são obrigados, segundo regramento legal nacional, a garantirem a sustentabilidade econômico-financeira dos seus sistemas de gestão de RSU.

Diante de tais desafios que pressionam as estruturas de cada um dos 5.570 municípios brasileiros, a valorização do RSU por meio da recuperação dos materiais de potencial valor econômico (secos e úmidos) torna-se estratégica para esses entes federativos (Canejo, 2021), de onde deriva a necessidade da criação de mecanismos de planejamento para a busca pela aplicação de diretrizes que retornem à cadeia econômica materiais comumente descartados e encaminhados, a custos elevados, para disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões.

2.1.3 Economia circular

A crescente geração de resíduos sólidos e a pressão sobre os recursos naturais têm impulsionado a busca por modelos de produção e consumo mais sustentáveis. Nesse contexto, a economia circular (EC) surge como uma alternativa promissora ao modelo linear tradicional,

que se baseia na extração, produção, consumo e descarte (Jugend; Stolte Bezerra; Gabbay de Souza, 2022 p. 23) e que caracteriza o grande progresso econômico do último século (Paes; Bezerra; Deus, 2022 p. 55). Nesse sentido, a EC se fundamenta em alguns princípios chave, priorizando a prevenção da geração de resíduos desde a concepção dos produtos e processos. Busca-se, também, a manutenção de produtos e materiais em longo uso, prolongando a vida útil dos produtos através de design durável, reparo, reutilização e remanufatura. Outro princípio importante é a regeneração de sistemas naturais, utilizando recursos renováveis e promovendo a recuperação de ecossistemas. (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

A EC oferece diversas soluções para a gestão de resíduos sólidos, como sistemas de coleta e separação eficientes, a exemplo da coleta seletiva, da reciclagem e da compostagem, que permitem a reutilização e a reciclagem de materiais. Tecnologias de tratamento e valorização de resíduos, como a digestão anaeróbia e a pirólise, podem transformar resíduos em energia e outros produtos de valor agregado. A logística reversa, com sistemas que garantem o retorno de produtos e materiais ao ciclo produtivo após o seu uso, como a coleta de embalagens e equipamentos eletrônicos, também se mostra como uma solução importante no contexto da EC. Por fim, o *ecodesign*, que visa projetar produtos com foco na durabilidade, desmontagem e reciclagem, minimizando a geração de resíduos, é crucial na economia circular. Porém, a implementação bem sucedida de um sistema baseado na economia circular envolve quebras de paradigma com reverberação direta nos aspectos comportamentais de todos os envolvidos na cadeia de geração (Paes; Bezerra; Deus, 2022 p. 67).

No Brasil, a prática da EC possui relação direta com políticas ambientais que convergem para o tema, uma vez que não existe um regramento específico para a temática de EC. A PNRS (Brasil, 2010) trata das diretrizes relacionadas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, bem como das responsabilidades de cada gerador e dos instrumentos econômicos aplicáveis, diretrizes essas que guardam conexão com os conceitos de EC (Delgado; Bertucci Lima, 2022 p.44). Já no cenário internacional, diversos países têm implementado políticas e iniciativas para promover a transição para uma EC. A União Europeia, por exemplo, através do Plano de Ação para a EC, define medidas para diversas áreas, como produção e consumo sustentáveis, gestão de resíduos e mercados de matérias-primas secundárias (PARLAMENTO EUROPEU, 2024).

Um exemplo específico é a diretiva de plásticos descartáveis, que visa reduzir o consumo e aumentar a reciclagem desses materiais. O Japão, pioneiro na implementação de políticas de EC, possui legislações como a Lei de Reciclagem de Aparelhos Domésticos e a Lei de Promoção da Utilização Eficaz de Recursos (ARLENE CARVALHO, 2024). O país também

se destaca na aplicação do conceito de "sociedade 5.0", que integra tecnologias avançadas para otimizar o uso de recursos e reduzir o impacto ambiental. A China, com o objetivo de reduzir a dependência de recursos naturais e minimizar a poluição, tem investido em políticas de EC, como o programa "*Made in China 2025*" (Iwasaka, 2018), que visa modernizar a indústria e promover a produção mais limpa. Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) desenvolve programas e iniciativas para promover a EC, como o programa "*WasteWise*", que incentiva empresas e organizações a reduzirem, reutilizarem e reciclarem resíduos (Iwasaka, 2018).

2.1.4 Rotas tecnológicas

Segundo Jucá *et al* (2014):

[...] rota tecnológica dos resíduos sólidos urbanos é um conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos, desde a sua geração até o seu destino final, que envolve os circuitos de coleta de resíduos indiferenciados (todo o tipo de resíduo) e resíduos diferenciados (incluindo coletas seletivas), contemplando o fluxo de tecnologias de tratamento com ou sem valorização energética. Faz parte do contexto de um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos (Jucá *et al.*, 2014, p. 89).

A definição das rotas tecnológicas é importante agente indutor de estratégias, colocando em perspectiva as ações prioritárias a serem adotadas no sentido da melhor gestão do RSU pelos municípios, definindo-se caminhos possíveis em um cenário com diversas perspectivas a serem consideradas. Farias (2018 p.61) define que a elaboração de rotas tecnológicas deve estar ancoradas em parâmetros de sustentabilidade socioambiental, cujas ações reverberem positivamente sobre a geração de emprego e renda, a minimização de passivos ambientais e a redução da demanda por recursos naturais.

Segundo Limeira Pimentel *et al* (2019), nenhum sistema de gerenciamento consegue tratar todo o material presente nos RSU com a adoção de um único tratamento, demandando a adoção de múltiplos sistemas, a exemplo da reciclagem, da compostagem e da valorização energética. Em teoria, a maior parte do RSU atualmente encaminhada para disposição final em aterros e lixões possui potencial para aproveitamento. Porém, colocar tais resíduos em rota tecnológica depende de diversos fatores técnicos e econômicos para a sua viabilização, muitos dos quais ainda encontram obstáculo para a sua adoção (Torres; Lange, 2022 p.26).

A escolha pelas rotas tecnológicas mais viáveis possui impacto direto na gestão dos serviços de limpeza urbana, uma vez que o número de variáveis para composição da rota mais

adequada está diretamente relacionado ao perfil do município, sua localização geográfica e os diversos atores envolvidos, assim agrupados: i) fonte geradora; ii) serviço de limpeza urbana (SLU); iii) catadores; iv) intermediários; v) indústria recicladora; e vi) indústria de embalagens (Carvalho *et al.*, 2019 p.240).

A despeito dos municípios serem autônomos em tudo que se refere aos interesses de caráter local (Pereira, 2021 p.18), os atores envolvidos possuem seus objetivos e esses objetivos devem se alinhar com a PNRS. Logo, incluir os diferentes agentes e setores da sociedade no processo decisório torna-se quase mandatório quando se fala em sistemas com reverberação direta sobre a qualidade de vida do cidadão, usuário final do serviço.

Logo, a definição das rotas tecnológicas mais viáveis consiste em uma tomada de decisão assim definido por Lima (2014):

[...] a tomada de decisão requer um grande esforço para resolver o dilema dos objetivos conflitantes que impede a existência da “solução ótima” e conduz para a “solução de melhor acordo”, e por ser uma questão de elevada complexidade, requer um tratamento qualificado e justifica a utilização de métodos de apoio à decisão em diversas circunstâncias. (Lima *et al.*, 2014, p. 34).

Tal tomada de decisão vem responder questões elementares em qualquer sistema de limpeza urbana, onde a avaliação das rotas tecnológicas mais viáveis guarda relação direta com aspectos que envolvem benefícios socioeconômicos, como geração de emprego e renda, otimização do uso de recursos públicos e minimização da pressão sobre recursos naturais, este último com desdobramento direto sobre emissões atmosféricas e contaminação do solo por RSU (Brasil, 2016 p.377).

Nesse campo, a reciclagem é uma das soluções mais utilizadas no Brasil para fins de minimização dos impactos oriundos dos resíduos sólidos e recuperação de materiais (Silva da Silva; Nascimento, 2017 p.34). Opera com predominância de catadores e catadoras formais e informais, cuja profissão é reconhecida pelo estado brasileiro (Colvero, 2014 p.30). Já em países europeus e asiáticos, as soluções mais tradicionais passam pelo aproveitamento energético de forma extensiva (Carvalho *et al.*, 2019 p.232), a despeito dos novos paradigmas que vêm cada vez mais explorando a reintrodução de materiais recicláveis previamente triados na cadeia produtiva.

Importante destacar que o cenário de recuperação de materiais não é uniforme no Brasil. Regiões com menor densidade populacional e menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) são aqueles com maior dificuldade para implementação de rotas tecnológicas para fins de aproveitamento econômico do RSU (Torres; Lange, 2022 p.26). Tal heterogeneidade conduz

a um resultado nacional onde apenas 1,9% dos materiais (recicláveis e orgânicos) coletados no ano de 2021 no país (Brasil, 2023a) foram aproveitados economicamente, indicador muito baixo diante do potencial existente.

É possível avaliar diversas discussões no sentido da modelagem de rotas tecnológicas mais adequadas e os diversos aspectos a serem considerados. Jucá (2014 p. 148) coloca em perspectiva o modelo de cobrança adotado pelos municípios para definição das rotas tecnológicas. Entende que a dificuldade da adoção de tecnologias mais desenvolvidas passa por um modelo de cobrança quase que basicamente ancorado no Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) dos municípios.

Já Farias (2018 p. 58) discute que a aplicabilidade das rotas tecnológicas deve considerar as metas definidas pela legislação de referência, sobretudo àquelas referentes ao encerramento dos descartes inadequados e a valorização dos resíduos por meio da reciclagem, compostagem e aproveitamento energético. Independente do porte do município, entende que a base para as propostas de rotas tecnológicas deve considerar as seguintes atividades: coleta seletiva de resíduos recicláveis (secos), coleta seletiva de resíduos orgânicos (úmidos), coleta de rejeitos, unidades de triagem, unidades de compostagem, incineração, biodigestão e aterro sanitário.

Ferreira e Jucá (2017 p. 519) entendem que o porte populacional de um município é um aspecto a ser considerado para definição das rotas tecnológicas mais adequadas, onde rotas tecnológicas para grandes cidades podem não ser as mesmas para cidades de portes inferiores. Dessa forma, sugerem as seguintes rotas tecnológicas para municípios com população superior a um milhão de habitantes em estudo conduzido no estado de Minas Gerais: coleta diferenciada de recicláveis (secos) e orgânicos (úmidos), coleta de resíduos não recicláveis (mistos), triagem, compostagem, aproveitamento energético e aterro sanitário.

Por fim, a adoção de rotas tecnológicas para a gestão eficiente do RSU pode adicionalmente contribuir para o atendimento dos ODS da Agenda 2030 da ONU com aderência na temática de resíduos, sendo um fator determinante para apoio ao desenvolvimento local.

2.2 LEGISLAÇÃO DE REFERÊNCIA

A legislação de referência consultada envolve Leis Ordinárias, Decretos e Planos de Gestão de Resíduos em âmbitos nacional, estadual e municipal, a seguir apresentados.

2.2.1 Nacional

2.2.1.1 *A Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico - LDNSB (Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010)*

Em 2007, com a entrada em vigor da LDNSB (Brasil, 2007), os serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de RSU foram definidos como aqueles compostos por atividades de varrição, capina e poda de árvores em vias e logradouros públicos e outros eventuais serviços pertinentes. Inclui-se nesse rol os serviços de coleta, transbordo, transporte, triagem (para fins de reuso ou reciclagem), tratamento (inclusive por compostagem) e disposição final dos resíduos.

Passados três anos da aprovação da LDNSB (Brasil, 2007) e um total de aproximadamente 20 anos de discussões temáticas no Congresso Nacional, é aprovada a Lei nº. 12.305/2010, que estabelece a PNRS, um marco legal que define as diretrizes para a gestão integrada de resíduos sólidos no Brasil.

Com esse novo regramento, a PNRS (Brasil, 2010) dá contorno à definição dos resíduos quando conceitua o RSU como aquele originado de atividades domésticas em residências urbanas (Resíduos Domiciliares - RDO) e aqueles originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços complementares de limpeza urbana (Resíduos de Limpeza Urbana – RLU). Estabeleceu ainda que os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços (os gerados nessas atividades, excetuados os referidos de limpeza urbana), se caracterizados como não perigosos, podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados ao RDO pelo poder público municipal.

A PNRS (Brasil, 2010) também incluiu os serviços de coleta seletiva na responsabilidade do titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Estabeleceu que a coleta seletiva deve ser efetuada minimamente diante da separação dos resíduos secos e úmidos (de forma segregada dos rejeitos) e se estender progressivamente à separação de parcelas específicas.

Neste contexto e considerando a geração de rejeitos², resíduos secos são entendidos como recicláveis secos; resíduos orgânicos como resíduos úmidos; e rejeitos aqueles que não

² Rejeitos: Resíduos Sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (art. 3º, inciso XV da PNRS).

tem enquadramento nas duas categorias definidas não apresentando outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Considerando a geração desses resíduos, a PNRS (Brasil, 2010) definiu como destinação final ambientalmente adequada a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações, desde que admitidas pelos órgãos competentes, entre elas a disposição final ambientalmente adequada.

Desta forma, entende-se que o avanço do país na definição de uma legislação de referência e com estruturação clara, traz aos titulares dos serviços (municípios por exemplo) uma forma segura e firme de interpretar tal regramento e aplicá-lo, sobretudo considerando suas conceituações e denominações, inovando na implementação de um modelo de responsabilidade compartilhada no âmbito de sistemas de logística reversa (De Souza, 2017 p. 38).

2.2.1.2 Atualização do Marco Regulatório do Saneamento Básico - AMRSB (Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020)

Seguindo na esteira de atualizações e modernizações do setor de saneamento no Brasil, a Atualização do Marco Regulatório do Saneamento Básico - AMRSB (Brasil, 2020) vem atualizar a LDNSB (Brasil, 2007) e a PNRS (Brasil, 2010), promovendo ajustes com o propósito de impulsionar o setor no sentido da universalização dos serviços (Marques; Cançado; De Campos Souza, 2021 p.8) e, ainda, promovendo avanços sobretudo no que se refere à sua regulação e à busca pela sustentabilidade econômico-financeira dos titulares dos serviços.

No âmbito do segmento de resíduos sólidos, a AMRSB (Brasil, 2020) trouxe novos dispositivos direcionados à necessidade de se colocar em outra perspectiva a forma de prestar os serviços de limpeza urbana no país. Considerando serem os 5.570 municípios brasileiros (incluindo o Distrito Federal) os titulares dos serviços, lida-se com realidades econômicas diversas, dimensões geográficas únicas e um mesmo padrão de problemas: a execução diária dos serviços de forma ambientalmente e economicamente sustentável. E nesse cenário, a AMRSB (Brasil, 2020) traz aos municípios a necessidade de se comportarem como agentes econômicos, imbuídos da necessidade da oferta dos melhores serviços (Guerra; Veras, 2021 p.203), colaborativo para um ambiente salubre e livre dos resíduos gerados por ela própria.

Os principais pontos trazidos pela AMRSB (Brasil, 2020) são os seguintes:

- **No âmbito da titularidade:** estímulo à regionalização, no sentido do ganho de escala e da viabilização do financiamento das iniciativas de implantação de medidas estruturais de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos;
- **No âmbito da sustentabilidade econômico-financeira:** inclui outras formas de cobrança que não apenas a cobrança de taxas e tarifas, como subsídios ou subvenções;
- **No âmbito das metas:** estende as metas para disposição final ambientalmente adequada de rejeitos segundo o porte populacional do município (último prazo até o ano de 2024);
- **No âmbito da destinação final:** permite adoção de outras soluções de destinação final quando a solução por aterro sanitário for economicamente inviável;
- **No âmbito da normatização:** estabelece a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) como órgão competente para o estabelecimento de normas de referência dos sistemas de saneamento básico;
- **No âmbito da contratação dos serviços:** proíbe a contratação dos serviços de limpeza urbana por meio de terceirização direta dos serviços.

Tais pontos vêm com o propósito de aperfeiçoar a PNRS (Brasil, 2010), buscando resolver questões de ordem técnica e econômica que se apresentam face aos desafios contemporâneos da gestão do RSU pelos seus titulares. Abre novas possibilidades para que municípios de pequeno porte, técnica e economicamente vulneráveis, se consorciem com outros municípios para permitir uma gestão mais eficiente do RSU e, ao mesmo tempo, buscar as melhores rotas tecnológicas para a destinação final ambientalmente adequada de resíduos.

2.2.1.3 O Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022

O Decreto nº 10.936/2022 é instrumento de aprimoramento da PNRS, modernizando e consolidando as diretrizes para a gestão de resíduos no Brasil. Ele atualiza as regras para a logística reversa, com a criação do Programa Nacional de Logística Reversa, facilitando a devolução de produtos e embalagens pelos consumidores. O decreto também reforça a responsabilidade compartilhada entre governo, empresas e cidadãos, estabelecendo metas e prazos para a eliminação de lixões e a ampliação da coleta seletiva. Além disso, incentiva a implementação de tecnologias para o tratamento e valorização de resíduos, com foco na recuperação energética e na produção de compostos orgânicos.

2.2.1.4 O Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES (Decreto n. 11.043, de 13 de abril de 2022)

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) (Brasil, 2022c) é uma materialização da própria PNRS (Brasil, 2010), à medida que se configura no documento que estabelece diretrizes, metas e normas para os diferentes titulares responsáveis pela geração de resíduos (públicos e privados), com o propósito de se alcançar os objetivos estabelecidos na própria PNRS (Brasil, 2010), a exemplo dos planos estaduais e municipais de gestão integrada de resíduos sólidos também exigidos por esse dispositivo legal.

Segundo o PLANARES (Brasil, 2022c) são definidas metas e indicadores para três diferentes grupos de resíduos, a saber: RSU, RCC e RSS. Para o segmento de RSU, foram estabelecidas nove metas principais, a saber:

- META 1 - Aumentar a sustentabilidade econômico-financeira do manejo de resíduos pelos municípios;
- META 2 - Aumentar a capacidade de gestão dos municípios;
- META 3 - Eliminar práticas de disposição final inadequada e encerrar lixões e aterros controlados;
- META 4 - Reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada;
- META 5 - Promover a inclusão social e emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis;
- META 6 - Aumentar a recuperação da fração seca dos RSU;
- META 7 - Aumentar a reciclagem da fração orgânica dos RSU;
- META 8 - Aumentar a recuperação e aproveitamento energético de biogás de RSU; e
- META 9 - Aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU.

As metas estabelecidas pelo PLANARES nascem da análise de um cenário base onde prevê-se a recuperação de 50% dos resíduos em 20 anos (Terranova; Biazini Filho, 2022 p.84). Nesse mesmo cenário, a expectativa é de avanço do desenvolvimento de tecnologias de recuperação de materiais já conhecidas e com reflexo em melhor retorno econômico a nível nacional nesse segmento (Brasil, 2022c), promovendo a diminuição da disposição final de resíduos em aterros e lixões.

2.2.1.5 *Os Certificados de Crédito da Reciclagem (Decreto nº 11.413, de 13 de fevereiro de 2023)*

O Decreto nº. 11.413/2023 (Brasil, 2023b) é criado quando a PNRS (Brasil, 2010) recebe nova regulamentação, por meio do Decreto nº. 10.936 de 12 de janeiro de 2022 (Brasil, 2022a). Ele é uma evolução do Decreto nº. 11.044 de 13 de abril de 2022 (Brasil, 2022g), que estabelece o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura, no âmbito dos sistemas de logística reversa. Tais certificados consistem em créditos financeiros a serem gerados por meio da emissão de notas fiscais eletrônicas no ato da comercialização de materiais recicláveis recuperados, cujo objetivo é impulsionar o mercado de comercialização de recicláveis e atrair para a formalidade os diversos atores dessa cadeia (organizados em pessoas jurídicas) por meio do retro financiamento da atividade com a comercialização dos créditos. (Brasil, 2023b).

O Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa é um instrumento utilizado para incentivar e reconhecer a adoção de práticas sustentáveis de gestão de resíduos, especialmente no contexto da logística reversa, amparando as ações de reciclagem e fomentando o cumprimento de metas que visam atender as necessidades ambientais, sociais e econômicas do país (De Melo *et al*, 2023). Ele pode ser emitido por autoridades governamentais, organizações ambientais ou outras entidades responsáveis pela regulamentação e promoção da gestão de resíduos. Esse certificado está intimamente ligado às políticas e regulamentações relacionadas à gestão de resíduos sólidos e à promoção da economia circular, sendo especialmente relevante para produtos que podem ser reciclados, reutilizados ou remanufaturados, no âmbito da logística reversa de materiais que, a exemplo da reciclagem, reaproveita materiais como matéria prima secundária na fabricação de novos produtos (Guimarães Santos, 2012).

Quanto à sua importância e utilidade no contexto nacional, destaca-se: o cumprimento de obrigações regulatórias por parte das empresas, no sentido do cumprimento de metas específicas de reciclagem ou participação na logística reversa; incentivos financeiros das empresas que já possuem certificados de crédito de reciclagem ; reconhecimento público, como parte das estratégias de marketing e comunicação das empresas para destacar seus esforços em prol da sustentabilidade e da proteção ambiental, aumentando sua reputação junto aos consumidores e à sociedade em geral; e negociação dos certificados de crédito de reciclagem

entre empresas ou vendidos em mercados secundários, sendo uma fonte adicional de receita para as empresas que os possuem.

2.2.2 Estadual

2.2.2.1 A Política Estadual de Resíduos Sólidos (Lei nº 4.191, de 30 de setembro de 2003)

A Política Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro, estabelecida pela Lei nº 4.191/2003, visa a proteção do meio ambiente e da saúde pública através da gestão e gerenciamento adequados dos resíduos sólidos. A lei busca erradicar os lixões, promover a coleta seletiva e a reciclagem, além de estimular a reutilização e o tratamento de resíduos. Para alcançar esses objetivos, a política incentiva a participação dos municípios na gestão dos resíduos, a criação de sistemas de logística reversa e a implementação de tecnologias limpas para o tratamento e destinação final dos resíduos. A lei também prevê a educação ambiental como ferramenta fundamental para a conscientização da população sobre a importância da gestão correta dos resíduos sólidos, buscando a mudança de hábitos e a responsabilidade compartilhada entre o poder público, o setor privado e a sociedade.

2.2.2.2 O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro – PERS/RJ (2013)

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (PERS/RJ) (RIO DE JANEIRO, 2013) nasce na esteira da aprovação da PNRS (Brasil, 2010), que vem definir objetivos, metas e ações relacionadas a um conjunto de medidas, já existentes, para aumentar a capacidade do estado em promover a gestão de seus resíduos em um novo cenário que se apresenta. Estabelece diretrizes para a ampliação da cobertura dos serviços de limpeza urbana nos 92 municípios fluminenses, recuperação de áreas degradadas por antigos lixões e o encaminhamento de 100% dos resíduos coletados para destinos finais ambientalmente adequados, considerando a recuperação energética, a reciclagem, a compostagem e a disposição final da fração inservível em aterros sanitários.

Com base nos cenários analisados, o PERS/RJ (Rio de Janeiro, 2013) define cinco metas, a saber:

- META 1 - Coleta seletiva implantada nos municípios;
- META 2 - Abrangência da coleta seletiva nos municípios;

- META 3 - Municípios com tratamento da fração orgânica dos RSU (municipal ou consorciada) implantados e em funcionamento;
- META 4 - Triagem e beneficiamento dos materiais recicláveis oriundos da fração seca da coleta seletiva; e
- META 5 - Aproveitamento energético de rejeitos.

A despeito de ser um plano apresentado 9 anos antes do PLANARES (Brasil, 2022c), o PERS/RJ (Rio de Janeiro, 2013) também estabelece metas de curto, médio e longo prazo que convergem para a recuperação de materiais com potencial econômico e energético, em sinergia com o que futuramente seria estabelecido como metas nacionais.

2.2.2.3 *O Sistema de Logística Reversa de Embalagens (Lei nº 8.151, de 01 de novembro de 2018)*

A Lei nº 8.151/2018 configura-se como um instrumento fundamental para a consolidação da logística reversa de embalagens no estado. Publicada em 1º de novembro de 2018, a lei institui um sistema que visa o retorno das embalagens pós-consumo aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, com o objetivo de promover a reutilização, a reciclagem ou a destinação ambientalmente adequada. Em consonância com a PNRS, define-se as responsabilidades de cada agente participante do ciclo de vida das embalagens, buscando minimizar o impacto ambiental e incentivar a sustentabilidade. Para atingir seus objetivos, a lei exige a elaboração de Planos de Metas e Investimentos pelas empresas, com a descrição detalhada das ações para a logística reversa, e a emissão do Ato Declaratório de Embalagens (ADE), que atesta o cumprimento das obrigações. Ademais, incentiva-se a inclusão de cooperativas de catadores de materiais recicláveis no sistema, visando a promoção da inclusão social e a geração de renda.

2.2.2.4 *O Plano Metropolitano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMetGIRS (2023)*

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) é uma unidade territorial composta por 22 (vinte e dois) municípios limítrofes, com características socioeconômicas comuns entre si, estabelecida pela Lei Complementar nº. 184 de 27 de dezembro de 2018 (Rio de Janeiro, 2018). Essa organização tem como objetivo o planejamento e a execução de funções e serviços públicos de interesse comum. O mesmo dispositivo legal criou os Conselhos Deliberativo e Consultivo, bem como o Instituto Rio Metrópole (IRM), a autoridade executiva da RMRJ,

responsável pela elaboração do Plano Metropolitano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMetGIRS) (Rio de Janeiro, 2023).

O PMetGIRS (Rio de Janeiro, 2023) tem como objetivo aprimorar o planejamento de políticas públicas referentes ao manejo de RSU na RMRJ, em consonância com o novo cenário do saneamento básico no Brasil, em especial com a AMRSB (Brasil, 2020). Estabelece diretrizes para a não geração, redução, reutilização e reciclagem por meio da implantação da coleta seletiva nos municípios com a participação de catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis organizados em associações ou cooperativas (Rio de Janeiro, 2023).

Entretanto, cabe salientar que o PMetGIRS não encontrava-se finalizado até o término do presente estudo, cujas diretrizes estabelecidas para a ampliação da coleta seletiva nos municípios ainda não se materializam em metas bem definidas para a recuperação de materiais, assim como estabelecidas pelo PLANARES (Brasil, 2022C), PERS/RJ (Rio de Janeiro, 2013) e PMGIRS (PCRJ, 2021).

2.2.3 Municipal

2.2.3.1 A Lei Diretrizes para a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos no Município do Rio de Janeiro (Lei nº 4.969, de 03 de dezembro de 2008)

A Lei Diretrizes para a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos no Município do Rio de Janeiro, destaca-se como um instrumento legal para a gestão de resíduos sólidos no município do Rio de Janeiro. Seu principal objetivo reside na instituição da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, visando prevenir e controlar a poluição, proteger o meio ambiente e a saúde pública, além de assegurar o uso adequado dos recursos naturais. A lei define princípios norteadores para a gestão de resíduos, como a responsabilidade compartilhada entre o poder público, o setor privado e a sociedade, e a priorização da redução, reutilização e reciclagem. Para alcançar tais objetivos, a lei estabelece instrumentos como a coleta seletiva, a compostagem, a logística reversa e a educação ambiental, buscando promover a conscientização da população e a mudança de hábitos de consumo.

2.2.3.2 *O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do município do Rio de Janeiro – PMGIRS (2021)*

O município do Rio de Janeiro (MRJ), capital e maior município do estado do Rio de Janeiro, antiga capital da colônia, do império e da república, sempre foi um município à frente do seu tempo no que se refere a saneamento. Uma das primeiras capitais do mundo a conceber um sistema de saneamento alinhado com diretrizes de planejamento urbano, visando sua modernização e, ao mesmo tempo o controle de epidemias (Silva, 2002 p.59).

Com passar das décadas, o MRJ vem administrando, por meio da atual Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB), quantitativos que variam entre 7 e 8 mil toneladas por dia de resíduos (PCRJ, 2023a), em um ambiente com maior grau de urbanização, maior contingente populacional e demais características que tornam o desafio maior a cada dia. Diante desse cenário, o município do Rio de Janeiro estabelece o seu próprio regramento legal e normativo referente ao manejo e ao gerenciamento municipal de resíduos sólidos antes da própria PNRS (Brasil, 2010) ser aprovada, com definição da necessidade da elaboração de um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) e o estabelecimento de diretrizes e metas a serem alcançadas a curto, médio e longo prazo.

O PMGIRS do MRJ (PCRJ, 2021) tem como objetivo principal estabelecer diretrizes e metas para a gestão integrada dos resíduos sólidos no município. O plano abrange diversas etapas do ciclo de vida dos resíduos, desde a geração até a destinação final, incluindo coleta, tratamento, reciclagem e disposição final.

As metas estabelecidas pelo PMGIRS do MRJ para a gestão de RSU são:

- META 1 - Percentual da fração orgânica tratada através de compostagem, metanização e outros processos;
- META 2 - Percentual de recuperação e materiais recicláveis.

As metas estabelecidas pelo plano concentram-se na valorização de materiais (orgânicos e recicláveis) para fins econômicos e energéticos, estimulando a redução da utilização do aterro sanitário como umas das diretrizes principais.

2.3 O PANORAMA DO RSU NO BRASIL

Apresentar o Panorama do RSU no Brasil é de extrema importância para contextualizar o momento que o Brasil vivencia no que se refere a coleta de RSU, sua composição gravimétrica, o cenário de recuperação de materiais pós processamento, as rotas tecnológicas

predominantes e a sustentabilidade econômico-financeira dos titulares dos serviços de limpeza urbana. Torna-se importante destacar que foram utilizados do SNIS disponibilizados no ano de 2023 (ano base 2021), bem como os dados do PLANARES disponibilizados no ano de 2022 (ano base 2020), sendo esses os dados mais atuais com origem em fontes governamentais durante a composição do presente estudo. Nesse sentido, os tópicos seguintes trarão um panorama do RSU no Brasil.

2.3.1 Coleta domiciliar

De acordo com dados extraídos do SNIS (Brasil, 2023a), no ano 2021 foram coletadas, nas áreas urbanas brasileiras, 65,63 milhões de toneladas de RSU, conforme apresentado na Tabela 1, com destaque para as regiões Nordeste e Sudeste com maior massa coletada nesse ano, sendo essas as regiões que concentram 60% dos municípios e aproximadamente 70% da população urbana nacional.

Tabela 1 – Estimativa de massa de RSU coletada segundo macrorregiões de governo – 2021

Macrorregião	Municípios (quant.)	RSU (milhões de t./ano)	RSU (%)
Nordeste	1.794	18,90	28,8
Sudeste	1.668	28,94	44,1
Sul	1.191	7,70	11,7
Centro-Oeste	467	4,94	7,5
Norte	450	5,15	7,8
Total	5.570	65,63	100,0

Fonte: Brasil, 2023a

No que se refere à cobertura de coleta, 89,9% da população total e 98,3% da população urbana (média) são contemplados com coleta de resíduos domiciliares no ano de 2021, conforme dados extraídos do SNIS (Brasil, 2023a) (Tabela 2), onde destacam-se as regiões Sudeste e Sul com os maiores índices. No outro extremo, os menores indicadores de cobertura de coleta encontram-se nas regiões Norte e Nordeste, regiões, com maior concentração de população vivendo em zonas rurais, representando 44% do total de habitantes rurais do país (Brasil, 2023a). Nessas zonas, há maior dificuldade e/ou precariedade dos sistemas de coleta devido a condições de acesso para o transporte dos resíduos.

Tabela 2 – Índice de cobertura dos serviços de coleta domiciliar (população total e urbana) segundo macrorregiões de governo – 2021

(continua)				
Macrorregião	População Total Atendida (milhões de hab.)	População Urbana Atendida (milhões de hab.)	Índice de cobertura total (%)	Índice de cobertura urbana (%)
Nordeste	47,5	41,2	82,40	97,00
Sudeste	85,8	82,7	95,80	99,10
Sul	27,8	25,9	91,60	99,40
Centro-Oeste	15,2	14,7	90,90	98,50
(conclusão)				
Macrorregião	População Total Atendida (milhões de hab.)	População Urbana Atendida (milhões de hab.)	Índice de cobertura total (%)	Índice de cobertura urbana (%)
Norte	14,9	13,4	79,00	95,70
Total	191,20	177,90	-	-

Fonte: Brasil, 2023

Outro indicador é a massa *per capita*. No ano de 2021 estima-se que a massa coletada *per capita* média nas áreas urbanas foi de 0,99 kg/hab.dia de RSU. Considerando a população total (urbana + rural), esse número foi de 0,95 kg/hab.dia de RSU (Brasil, 2023). Destaca-se as regiões Nordeste, com (1,22 kg/hab.dia - maior índice) e Sul (0,81 kg/hab.dia - menor índice), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Massa média *per capita* de RSU segundo macrorregiões de governo – 2021

Macrorregião	Índice de geração <i>per capita</i> População Total (kg/hab.dia)	Índice de geração <i>per capita</i> População Urbana (kg/hab.dia)
Nordeste	1,12	1,22
Sudeste	0,93	0,95
Sul	0,76	0,81
Centro-Oeste	0,90	0,91
Norte	0,97	1,01
Brasil (média)	0,95	0,99

Fonte: Brasil, 2023

Nas regiões Sul e Sudeste há um maior número de aterros sanitários privados, dotados de sistema de pesagem, o que pode conferir maior precisão nos números diante de um maior rigor no controle do destino final (Brasil, 2023).

2.3.2 Coleta seletiva

Segundo dados extraídos do SNIS (Brasil, 2023a), 1.567 municípios brasileiros (28,1% do total) declararam possuir alguma modalidade de coleta seletiva de RDO no ano de 2021 (Tabela 4), seja, na modalidade porta a porta (semimecanizada ou manual), seja em outra modalidade (postos de entrega voluntária). Destaca-se a região Sul com maior quantitativo de municípios com coleta seletiva e a região Sudeste a que possui a maior população atendida

Tabela 4 – Coleta seletiva segundo macrorregiões de governo – 2021

Macrorregião	Municípios (quant.)	Municípios (%)	Pop. total atendida (milhões de hab.)	Pop. total atendida (%)
Nordeste	142	2,5	3,0	1,4
Sudeste	626	11,2	38,4	18,0
Sul	647	11,6	19,9	9,3
Centro-Oeste	110	2,0	6,6	3,1
Norte	42	0,8	1,8	0,8
Total	1.567	28,1	69,7	32,7

Fonte: Brasil, 2023a

Conforme apresentado, o percentual de municípios que declaram possuir alguma modalidade de coleta seletiva é baixo, considerando a importância dessa cadeia produtiva, seja na geração de emprego e renda, seja na promoção do desvio de materiais com potencial econômico de aterros sanitários, aterros controlados e lixões. Apesar de aproximadamente 1/3 da população ser atendida pelo serviço, apenas 1,9% dos materiais (incluindo-se parcela orgânica) são efetivamente recuperados pelos sistemas de limpeza urbana municipais e reintroduzidos na cadeia produtiva (Brasil, 2023a).

2.3.3 Composição gravimétrica

O RSU é composto por matéria úmida e outros materiais típicos das atividades diárias humanas. As suas características variam em função de aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos, sendo esses fatores os mesmos que diferenciam as comunidades e as próprias cidades (IBAM, 2001 p.33). Tais características determinam a chamada Composição Gravimétrica dos Resíduos, importante ferramenta de gestão integrada que permite conhecer

quantitativamente as frações geradas e o perfil das fontes geradoras de resíduos (Menezes *et al*, 2019 p.271)

Como o planejamento no que se refere ao manejo de RSU é competência de municípios e do Distrito Federal (Brasil, 2020), determinar a composição dos mesmos torna-se necessário para o melhor planejamento do setor e o estabelecimento de políticas públicas aderentes (Brasil, 2022c). No Brasil, a fração orgânica é a principal componente do RSU, respondendo, na média nacional, por 45,3% de sua massa (Brasil, 2022c), o que representa pouco mais de 30 milhões de t/ano de matéria orgânica produzida. (Tabela 5).

Tabela 5 – Quantitativo estimado de materiais produzidos, segundo composição gravimétrica do RSU no Brasil – 2020

Tipologia de material	Total (milhões de t)	Total (%)
Matéria Orgânica	30,19	45,30
Papel/papelão, plástico, vidro, metais	22,39	33,60
Rejeitos	14,06	21,1
TOTAL	66,64	100,00

Fonte: Brasil, 2022c

Conforme pode ser observado, na sequência dos materiais orgânicos, os materiais recicláveis, em especial papel/papelão, plástico, vidro e metais representam aproximadamente 1/3 da massa total de RSU, com maior representatividade de materiais plásticos, que já respondem por 50% da massa de materiais recicláveis gerados, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantitativo estimado de materiais recicláveis produzidos, segundo composição gravimétrica do RSU no Brasil – 2020

Material	Total (milhões de t/ano)	Total em Relação aos Materiais Recicláveis (%)	Total em Relação à Massa de RSU (%)
Metais	1,53	6,85	2,30
Vidro	1,80	8,04	2,70
Plástico	11,20	50,00	16,80
Papel e papelão	6,93	30,95	10,40
Outros	0,93	4,17	1,40
TOTAL	22,39	100,00	33,60

Fonte: Brasil, 2022c

Atualmente esses materiais já possuem relevante participação no mercado de produção de matérias primas secundárias, com protagonismo para as latas de alumínio, cuja quase totalidade (98,7% de todas as latas de alumínio comercializadas no país) foi reciclada no ano de 2021 (Brasil, 2022h). Entretanto, ainda não há dados consistentes em relação à taxa de recuperação dos demais materiais, uma vez que os dados sobre introdução dos diferentes produtos no mercado e a sua recuperação é divergente. Considerando os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2023), referentes à recuperação de materiais no âmbito dos sistemas oficiais de logística reversa de embalagens em geral, embalagens de aço e latas de alumínio, em comparação com a estimativa de materiais produzidos (Tabela 6), é possível estimar a seguinte taxa de recuperação de materiais no Brasil (Tabela 7).

Tabela 7 – Taxa estimada de recuperação de materiais no Brasil – 2022

Material	Total Produzido Estimado (t/ano) (1)	Total Recuperado (t/ano) (2)	Taxa Estimada de Recuperação de Materiais (%)
Ligas metálicas	1.530.000,00	594.715,00	38,87%
<i>Latas de alumínio</i>		<i>390.200,00</i>	
<i>Embalagens de aço</i>		<i>67.214,00</i>	
<i>Embalagens metálicas em geral</i>		<i>137.301,00</i>	
Vidro	1.800.000,00	136.633,00	7,59%
Plástico	11.200.000,00	205.663,00	1,84%
Papel e papelão	6.930.000,00	316.940,00	4,57%
Outros	930.000,00	9.343,00	1,00%
TOTAL	22.390.000,00	1.263.294,00	5,64%

Fonte: (1) Brasil, 2022c (2) ABRELPE, 2023

O baixo aproveitamento dessa matéria prima reciclável deixa de produzir diversos impactos positivos ao país, com vertentes econômicas e socioambientais. Na vertente socioambiental, o gasto energético é um fator de amplo impacto na indústria de transformação. A produção de alumínio, por exemplo, a partir de matéria prima reciclada consome 5% do total de energia se comparado à produção de alumínio com base em seu minério (bauxita) (Chaves; Marques; Silva, 2018 p.112). Já a produção de plástico, utilizando-se matéria prima reciclada em sua composição, promove a economia de energia elétrica de aproximadamente 1,2 GW mensais no Brasil (Lacerda *et al*, 2018 p.1105).

Com preços médios dos materiais básicos variando de R\$/kg 0,28 para o vidro até R\$/kg 6,45 para o alumínio no ano de 2021 (ANCAT, 2022), estima-se que oito bilhões de reais anuais

deixem de ser movimentados apenas na cadeia de comercialização de materiais reciclados (Conke; Nascimento, 2018 p.211), cujos valores tentem a serem superiores se considerados os demais componentes de toda a cadeia de transformação, como energia, transporte, mão de obra, entre outros. Apenas na cadeia do plástico, que possui a segunda menor taxa média de recuperação no Brasil (Tabela 7), estima-se que seria possível retornar R\$ 5,7 bilhões para a economia (Agência Brasil, 2018).

2.3.4 Processamento e disposição final

A disposição final de RSU no Brasil é majoritariamente em soluções como Aterros Sanitários, Aterros Controlados e Lixões. No ano de 2021, 23% das unidades de disposição final de resíduos já são compostas por aterros sanitários (Brasil, 2023a). Entretanto, os 77% restantes são compostos por aterros controlados e lixões predominando este último. (Brasil, 2022e)

A disposição final ambientalmente adequada de RSU no Brasil está aquém do que preconiza a PNRS (ABRELPE, 2022 p.26), a exemplo do grande número de lixões ainda em operação. Mesmo com o estabelecimento de um marco regulatório específico dos resíduos sólidos no ano de 2010, estima-se que, em 2020, 92,6% do RSU gerado foi encaminhado para aterros sanitários, aterros controlados e lixões, cujos dados de destinação final podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estimativa de destinação final de RSU no Brasil – 2020

Destinação	Tipo de unidade	RSU destinado segundo tipo de unidade (%)	Total (%)
Disposição final sem processamento prévio de materiais	Aterro Sanitário	67,3	92,6
	Lixão	14,2	
	Aterro Controlado	11,1	
Processamento prévio de materiais	Unidades de Compostagem (pátio ou usina)	0,4	7,4
	Unidades de Triagem (galpão ou usina)	7,0	
Total		100,0	100

Fonte: Brasil, 2022e

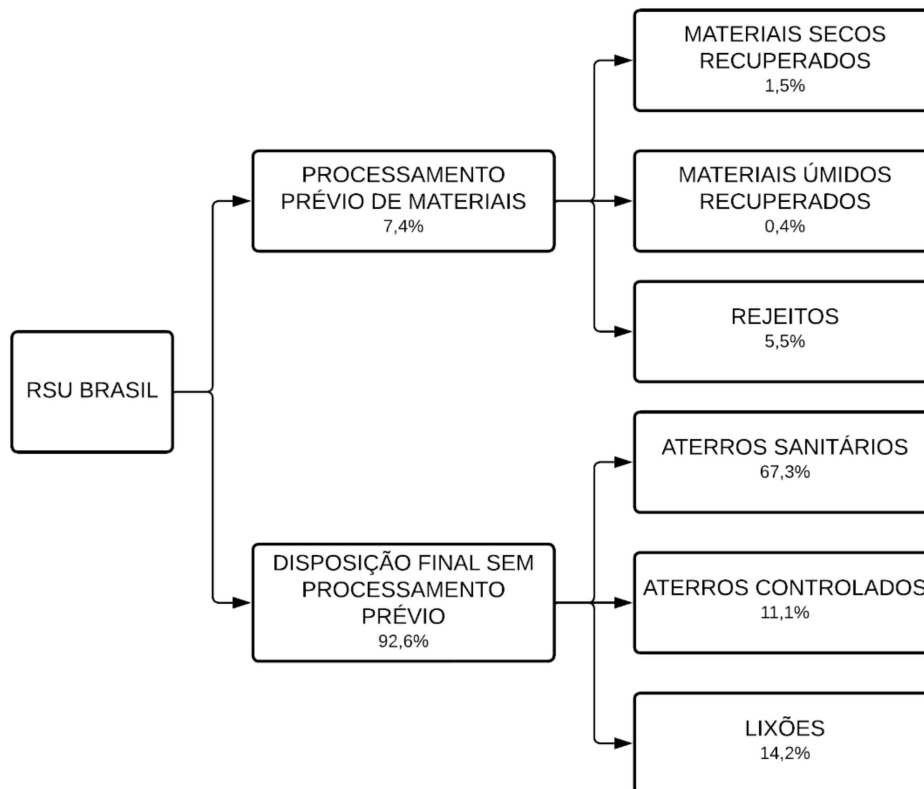
Conforme observado na Tabela 8, a massa coletada encaminhada para algum tipo de processamento prévio, em especial recuperação de materiais secos e úmidos, representa 7,4% da massa coletada de RSU (Brasil, 2022e). Entretanto, cabe destacar que o encaminhamento

dos resíduos para equipamentos de processamento prévio não necessariamente determina a recuperação dos materiais em sua totalidade, havendo ainda rejeitos de processo.

2.3.5 Síntese das rotas tecnológicas predominantes no Brasil

Diante do cenário apresentado, pode-se inferir que a rota tecnológica do RSU no Brasil se concentra, de forma incipiente, em ações de recuperação de materiais secos (para fins de reciclagem) e úmidos (para fins de produção de composto orgânico). No sentido oposto, a parcela majoritária desse RSU é encaminhada para disposição final diretamente em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sem nenhum tipo de processamento preliminar, cujo balanço encontra-se ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Síntese das rotas tecnológicas predominantes de RSU no Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Em um contexto em que o desvio de materiais para fins de pré-processamento e aproveitamento econômico é baixo, ainda há uma geração de rejeitos elevada se considerado o percentual que é desviado de aterros e lixões. Considerando apenas a massa de resíduos secos

e orgânicos desviada para algum tipo de processamento, apenas 1/4 dessa massa é efetivamente reintroduzida na cadeia produtiva, sendo os demais 3/4 convertidos em rejeitos, indicando a baixa eficiência do sistema existente.

O baixo indicador de recuperação de materiais ilustrado na Figura 1 é uma realidade nacional, onde diversos fatores cooperam para tal cenário. Os obstáculos impostos pelos atuais modelos de coleta seletiva (porta a porta e postos de entrega voluntária por exemplo), associados a aspectos como separação inadequada de materiais, falta de conscientização socioambiental, heterogeneidade do mercado de recicláveis, barreiras geográficas e a falta de maiores incentivos para atuação de catadores e catadoras, conduzem a um resultado de baixa recuperação de materiais (Kuhn; Botelho; Alves, 2018 p.653). Nesse quesito, o Brasil posiciona-se atrás de Chile, Argentina, África do Sul e Turquia, países com grau de desenvolvimento econômico e industrial semelhantes e que apresentam média de recuperação de materiais de 16% sobre o total de RSU coletados (Gandra, 2022 p.1), contra os atuais 1,9% do Brasil (Brasil, 2022d).

2.3.6 Sustentabilidade econômico-financeira

A ideia de sustentabilidade econômica e financeira está relacionada à capacidade de o Poder Público compatibilizar, segundo uma visão empresarial, o atendimento e a realização dos serviços, reduzindo – ou otimizando – o uso de recursos naturais sem desprezar a rentabilidade econômico-financeira da atividade (Pereira, 2021 p.35).

A obrigatoriedade pela cobrança por serviços públicos executados é uma prática comum em muitos municípios e tem como objetivo garantir a sustentabilidade econômica desses serviços. A maioria das atividades relacionadas à prestação de serviços públicos, como abastecimento de água, energia elétrica, limpeza urbana, transporte público, entre outros, demanda recursos financeiros para sua manutenção e melhoria contínua, uma vez que:

Toda atividade de oferecimento de utilidade ou comodidade material fruível diretamente pelos administrados, prestado pelo Estado ou por quem lhe faça as vezes, sob um regime de direito público – portanto, consagrador de prerrogativas de supremacia e de restrições especiais - instituído pelo Estado em favor de interesses que houver definido como próprios no sistema normativo (Mello, 2021)

Esses serviços são essenciais para o bem-estar da população e para o desenvolvimento adequado das cidades. Portanto, é fundamental que haja uma fonte de financiamento para cobrir

os custos operacionais, investimentos em infraestrutura e a remuneração dos profissionais envolvidos na sua execução.

A cobrança por serviços públicos pode ocorrer por diferentes mecanismos, que incluem tarifas, taxas e contribuições, cada um com suas características específicas e objetivos distintos (Powell; Bromley, 1987 p.66). Alguns exemplos comuns incluem:

1. Tarifas: A cobrança de tarifas é uma forma tradicional de pagamento pelos serviços públicos. As tarifas são estabelecidas com base nos custos de produção, distribuição e manutenção dos serviços, levando em consideração fatores como consumo, demanda ou capacidade de pagamento dos usuários. As concessionárias ou empresas responsáveis pela prestação dos serviços costumam ser responsáveis pela definição das tarifas, sujeitas à aprovação dos órgãos reguladores competentes.
2. Taxas: As taxas são uma forma de cobrança específica para determinados serviços ou atividades prestados pelo poder público. Elas são estabelecidas por lei e destinam-se a custear despesas relacionadas a serviços específicos, como a taxa de coleta de lixo, taxa de iluminação pública, entre outras. As taxas são cobradas de forma compulsória, geralmente com base na utilização ou na disponibilidade do serviço.
3. Contribuições: As contribuições são uma forma de financiamento dos serviços públicos que se baseiam na solidariedade dos cidadãos. Elas podem ser destinadas a financiar serviços de interesse coletivo, como a contribuição para o custeio da iluminação pública. As contribuições são estabelecidas por lei e cobradas compulsoriamente dos cidadãos.

Em última análise, os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, de titularidade dos municípios, estão no grupo dos serviços públicos com maior relação com a dignidade humana. Não são realizados exclusivamente no interesse individual de quem gera, mas no interesse coletivo no âmbito da necessidade de conferir ambiente saudável e digno para a população, com forte aderência ao bem-estar e à saúde pública (Filho; Pereira, 2000). Nesse contexto, limpeza urbana e o manejo adequado dos resíduos sólidos são desafios enfrentados por todas os municípios, independentemente do tamanho ou localização geográfica.

O crescimento populacional, o aumento do consumo e a urbanização acelerada têm levado a um aumento significativo na geração de resíduos, o que demanda uma abordagem sustentável e integrada para lidar com essa questão. Desta forma, a sustentabilidade econômico-financeira envolve o equilíbrio entre os recursos disponíveis e as necessidades operacionais, de modo a garantir a continuidade dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos

sem comprometer a capacidade financeira do município, assim determinado pela AMRSB (Brasil, 2020):

Art. 29. Os serviços públicos de saneamento básico terão a sustentabilidade econômico-financeira assegurada por meio de remuneração pela cobrança dos serviços, e, quando necessário, por outras formas adicionais, como subsídios ou subvenções, vedada a cobrança em duplicidade de custos administrativos ou gerenciais a serem pagos pelo usuário, nos seguintes serviços:

I - de abastecimento de água e esgotamento sanitário, na forma de taxas, tarifas e outros preços públicos, que poderão ser estabelecidos para cada um dos serviços ou para ambos, conjuntamente;

II - de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, na forma de taxas, tarifas e outros preços públicos, conforme o regime de prestação do serviço ou das suas atividades; e

III - de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, na forma de tributos, inclusive taxas, ou tarifas e outros preços públicos, em conformidade com o regime de prestação do serviço ou das suas atividades (Brasil, 2020).

Para alcançar esse equilíbrio, torna-se necessário considerar diferentes aspectos de planejamento. A esse exemplo, um plano de gestão integrada de resíduos sólidos é essencial para identificar as necessidades locais, estabelecer metas e objetivos claros, além de determinar as estratégias e ações necessárias para alcançá-los. O planejamento deve levar em conta a realidade socioeconômica do município e considerar soluções sustentáveis, como a redução, reutilização, reciclagem e tratamento adequado dos resíduos. A implementação de programas de coleta seletiva, aliada a iniciativas de educação ambiental, promove a separação correta dos resíduos na fonte, aumentando o potencial de reciclagem e reduzindo os custos de destinação final. A reciclagem gera receitas adicionais e pode contribuir para a sustentabilidade financeira dos municípios.

Ainda, há que se avaliar a busca por parcerias com o setor privado, organizações não governamentais e outras esferas governamentais, podendo ser uma estratégia eficaz para compartilhar custos, recursos e conhecimentos, fortalecendo assim a sustentabilidade econômica dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. A definição de uma tarifa justa e adequada pelos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos também é essencial para garantir a receita necessária para cobrir os custos operacionais. A tarifa deve refletir os custos reais do serviço, considerando aspectos como coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos.

A adoção de soluções inovadoras e tecnologias avançadas pode melhorar a eficiência operacional, reduzir custos e minimizar impactos ambientais. A implantação de sistemas de monitoramento, a otimização das rotas de coleta, o uso de veículos e equipamentos mais

eficientes e a aplicação de práticas de tratamento de resíduos sustentáveis são exemplos de medidas que podem contribuir para a sustentabilidade econômico-financeira dos municípios. Nesse escopo torna-se importante destacar a Norma de Referência (NR) nº 1 da Agência Nacional de Águas (ANA) (Brasil, 2021), que dispõe sobre o regime, a estrutura e parâmetros de cobrança pela prestação do serviço público de manejo de RSU, bem como a NR nº 7 (Brasil, 2024), que dispõe sobre as condições gerais para a prestação direta ou mediante concessão dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de RSU.

Ao adotar medidas sustentáveis, os municípios podem promover a proteção ambiental, melhorar a qualidade de vida da população e garantir a viabilidade financeira desses serviços a longo prazo, conforme determinam os objetivos da PNRS (Brasil, 2010) os quais aludem a necessidade da recuperação dos custos relativos aos serviços prestados no espectro da sustentabilidade operacional e financeira do setor (Brasil, 2010). Considerando o cenário nacional, apenas 45% dos 5.570 municípios brasileiros promovem algum tipo de cobrança pelos serviços executados, o que significa dizer que quase 2.500 municípios não possuem nenhum tipo de cobrança (Brasil, 2019). E mesmo aqueles que cobram pelos serviços, menos de 10% alcançam a sustentabilidade econômico-financeira, ou seja, não cobram o suficiente para cobrir as despesas com limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, restando clara a necessidade pela busca por soluções ancoradas na valorização econômica dos resíduos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo desempenha um papel crucial na estrutura e no rigor científico do trabalho acadêmico. Neste capítulo serão detalhados os métodos e técnicas utilizados para o desenvolvimento do presente estudo, justificando as escolhas e demonstrando a adequação dos procedimentos adotados para responder às questões de pesquisa.

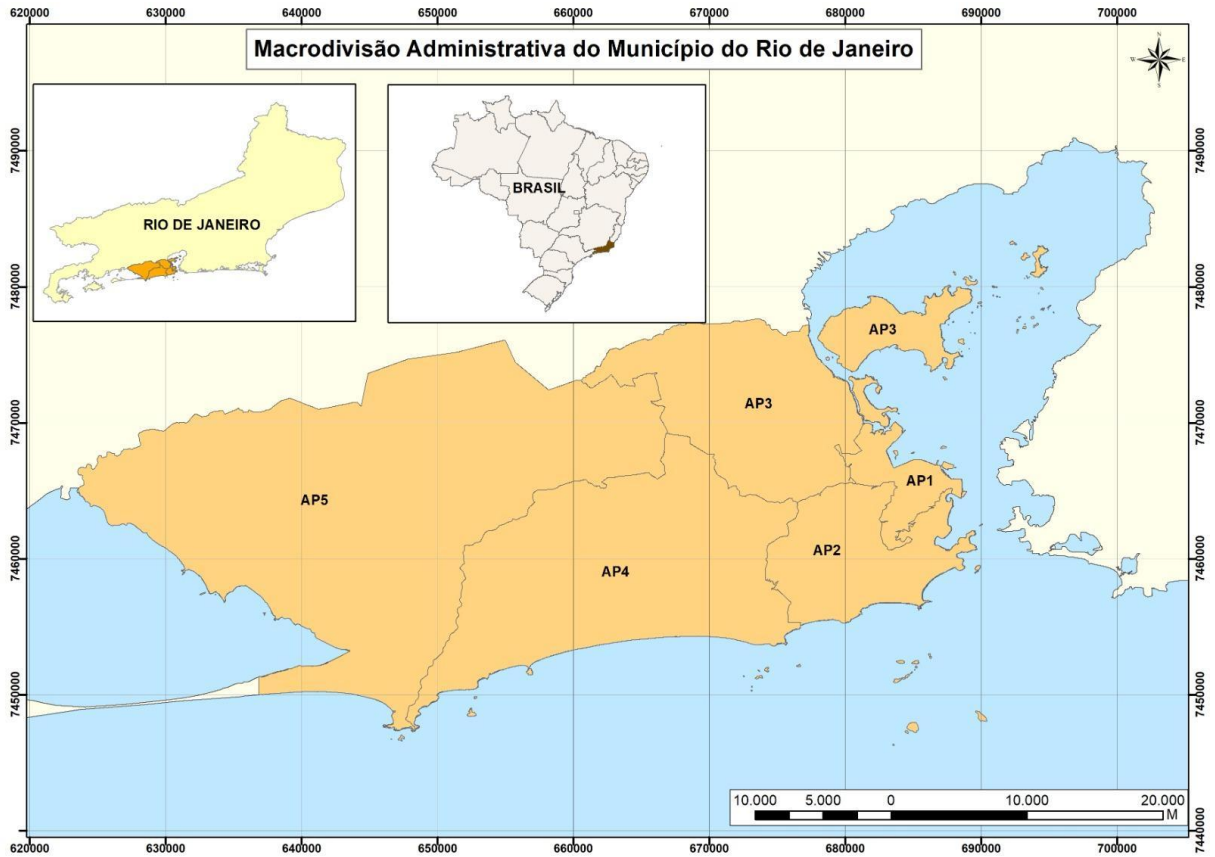
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE ESTUDO

Localizada na região sudeste do Brasil, o município do Rio de Janeiro - aqui chamado de município do Rio de Janeiro (MRJ) - é a capital do estado do Rio de Janeiro. Ocupa a segunda posição no ranking das cidades mais populosas do Brasil, representada por um total aproximado de 6,2 milhões de habitantes (PCRJ, 2024b), distribuídos em 1.204 km² de área territorial e com uma densidade demográfica de 5.556 hab/km² (PCRJ, 2024b).

O MRJ possui 600 km² de áreas urbanizadas e 604 km² de áreas não urbanizadas (mata, campo, áreas agrícolas, áreas sujeitas à inundação, corpos hídricos, afloramentos rochosos e depósitos sedimentares), onde 408 km² (ou 33,9%) do território é composto por Unidades de Conservação da Natureza (UCN) (PCRJ, 2024b).

A sua divisão territorial é composta por cinco Áreas de Planejamento (AP), 16 Regiões de Planejamento (RP), 33 Regiões Administrativas (RA) e 165 Bairros (PCRJ, 2024b). Essa divisão tem como objetivo facilitar a governança e a gestão municipal, permitindo uma melhor organização e provisão de serviços públicos para a população, onde cada uma dessas Áreas de Planejamento possui suas próprias características, geográficas, socioeconômicas e culturais. A Figura 2 apresenta a macrodivisão administrativa do MRJ.

Figura 2 – Macrodivisão administrativa do MRJ



Nota: AP - Área de Planejamento

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Cada AP possui uma denominação específica e são compostas pelos diferentes bairros do município, sendo assim organizadas (Quadro 1):

Quadro 1 – Bairros do Rio de Janeiro segundo Áreas de Planejamento

(continua)

Áreas de Planejamento	Denominação	Bairros	Área (km ²)	%
AP-1	Área Central	Saúde, Gamboa, Santo Cristo, Caju, Centro, Catumbi, Rio Comprido, Cidade Nova, Estácio, São Cristóvão, Mangueira, Benfica, Vasco da Gama, Paquetá, Santa Teresa.	34,394	2,86

(continuação)

Áreas de Planejamento	Denominação	Bairros	Área (km ²)	%
AP-2	Zona Sul e Grande Tijuca	Flamengo, Glória, Laranjeiras, Catete, Cosme Velho, Botafogo, Humaitá Urca, Leme, Copacabana, Ipanema, Leblon, Lagoa, Jardim Botânico, Gávea, Vidigal, São Conrado, Rocinha, Praça da Bandeira, Tijuca, Alto da Boa Vista, Maracanã, Vila Isabel, Andaraí, Grajaú.	100,433	8,34
AP-3	Zona Norte	Manguinhos, Bonsucesso, Ramos, Olaria, Maré, Jacaré, São Francisco Xavier, Rocha, Riachuelo, Sampaio, Engenho Novo, Lins de Vasconcelos, Méier, Todos os Santos, Cachambi, Engenho de Dentro, Água Santa, Encantado, Piedade, Abolição, Pilares, Jacarezinho, Campinho, Quintino, Bocaiúva, Cavalcanti, Engenheiro Leal, Cascadura, Madureira, Vaz Lobo, Turiaçú, Rocha Miranda, Honório Gurgel, Oswaldo Cruz, Bento Ribeiro, Marechal Hermes, Higienópolis, Maria da Graça, Del Castilho, Inhaúma, Engenho da Rainha, Tomás Coelho, Complexo do Alemão, Penha, Penha Circular, Brás de Pina, Cordovil, Parada de Lucas, Vigário Geral, Jardim América, Guadalupe, Anchieta, Parque Anchieta, Ricardo de Albuquerque, Coelho Neto, Acari, Barros Filho, Costa Barros, Pavuna, Parque Colúmbia, Ribeira Zumbi, Cacuia, Pitangueiras, Praia da Bandeira, Cocotá, Bancários, Freguesia, Jardim Guanabara, Jardim Carioca, Tauá, Moneró, Portuguesa, Galeão, Cidade Universitária.	203,500	16,90
AP-4	Zona Oeste (Baixada da Barra da Tijuca, Baixada de Jacarepaguá)	Jacarepaguá, Anil, Gardênia Azul, Barra Olímpica, Curicica, Freguesia, Pechincha, Taquara, Tanque, Praça Seca, Vila Valqueire, Cidade de Deus, Joá, Itanhangá, Barra da Tijuca, Camorim, Vargem Pequena, Vargem Grande, Recreio dos Bandeirantes, Grumari.	293,825	24,40

(conclusão)

Áreas de Planejamento	Denominação	Bairros	Área (km ²)	%
AP-5	Zona Oeste (Regiões de Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Bangu)	Padre Miguel, Bangu, Senador Camará, Gericinó, Deodoro, Vila Militar, Campo dos Afonsos, Jardim Sulacap, Magalhães Bastos, Realengo, Santíssimo, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Inhoaíba, Cosmos, Paciência, Santa Cruz, Sepetiba, Guaratiba, Barra de Guaratiba, Pedra de Guaratiba.	572,204	47,51
Total			1.204,356	100,00

Fonte: PCRJ, 2011

A população do município do Rio de Janeiro é de 6.211.223 habitantes (PCRJ, 2024a), assim dividida segundo suas Áreas de Planejamento (Quadro 2).

Quadro 2 – População do MRJ segundo Áreas de Planejamento – 2022

Áreas de Planejamento	Denominação	População (Censo 2022)	%
AP-1	Área Central	282.058	4,54
AP-2	Zona Sul e Tijuca	890.910	14,34
AP-3	Zona Norte	2.092.292	33,69
AP-4	Zona Oeste (Baixada da Barra da Tijuca, Baixada de Jacarepaguá)	1.105.620	17,80
AP-5	Zona Oeste (Regiões de Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Bangu)	1.840.343	29,63
Total		6.211.223	100,00

Fonte: PCRJ, 2024a

Conforme pode ser observado, a Área de Planejamento 3 (Zona Norte) é a mais populosa, agregando pouco mais de 33% da população do MRJ, representada por bairros como Ilha do Governador, Penha e Bonsucesso. A economia do Rio de Janeiro é diversificada e desempenha um papel importante no cenário nacional, representando a maior economia do estado Rio de Janeiro e a segunda maior economia do Brasil. Os setores de prestação de serviço

e industrial são os pilares da economia municipal. O turismo desempenha um papel significativo na economia carioca, representando aproximadamente 4% da economia municipal, impulsionado por grandes eventos como o Carnaval, o Réveillon em Copacabana e o *Rock in Rio* (PCRJ, 2022b). Além disso, a cidade também hospeda a administração das maiores empresas do setor de óleo e gás, agências reguladoras, bancos de fomento e um grande parque científico e educacional (PCRJ, 2022b).

O Índice de Desenvolvimento Social (IDS) é um indicador que possui inspiração no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). Tem como objetivo medir o grau de desenvolvimento das diferentes unidades territoriais do MRJ. A sua metodologia de cálculo se utiliza de indicadores relacionados ao Censo Demográfico, obtidos nas mais de 11 mil unidades territoriais presentes no município, compostas por aquelas definidas pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do município do Rio de Janeiro (PCRJ, 2011) (Áreas de Planejamento, Regiões de Planejamento, Regiões Administrativas e Bairros) em associação a dados oriundos das mais de 800 favelas cariocas e 10.000 setores censitários do IBGE, assim detalhados na Tabela 9.

Tabela 9 – Unidades territoriais para cálculo do IDS no MRJ

Item	Unidades Territoriais	Quantitativo
1	Áreas de Planejamento	5
2	Regiões de Planejamento	16
3	Regiões Administrativas	33
4	Bairros *	165
5	Favelas **	827
6	Setores censitários	10.144
	Total	11.185

Notas:

* Ano de referência: 2024

** Favelas cadastradas pela prefeitura do MRJ ainda no ano de 2010, sendo este o dado mais atualizado no momento da pesquisa.

Fonte: PCRJ, 2010; PCRJ, 2024b

Dessa forma, as Áreas de Planejamento do MRJ possuem os seguintes IDSs (Tabela 10):

Tabela 10 – IDS segundo indicadores específicos – 2010

Áreas de Planejamento	IDS	Indicadores de Saneamento				Indicador de Educação	Indicadores Econômicos		
		% de domicílios com serviço de abastecimento de água adequado	% de domicílios com serviço de esgoto adequado	% de domicílios com serviço de coleta de lixo adequado	Nº de banheiros por moradores	% de analfabetismo de 10 a 14 anos	Rendimento domiciliar per capita em salários-mínimos	% dos domicílios, com rendimento domiciliar per capita até um salário-mínimo	% dos domicílios com rendimento domiciliar per capita superior a 5 salários-mínimos
AP-1	0,600	99,496	97,407	98,690	1,250	2,196	1,689	44,069	8,351
AP-2	0,710	99,024	98,206	99,777	2,007	1,448	5,280	17,762	41,988
AP-3	0,591	99,133	95,290	99,033	1,328	2,013	1,526	46,879	5,845
AP-4	0,624	96,383	81,975	99,226	1,757	2,040	3,201	33,837	21,795
AP-5	0,554	98,060	82,889	99,303	1,290	2,164	1,128	58,073	2,626
MRJ	0,609	98,466	90,932	99,252	1,504	2,013	2,270	42,163	14,277

Fonte: PCRJ, 2010

Fazendo uma comparação com a população segundo Área de Planejamento e respectivas áreas territoriais, tem o seguinte resultado (Tabela 11):

Tabela 11 – IDS segundo Áreas de Planejamento e População

Áreas de Planejamento	Denominação	População (Censo 2022)	Área (km ²)	IDS
AP-1	Área Central	282.058	34,394	0,600
AP-2	Zona Sul e Tijuca	890.910	100,433	0,710
AP3	Zona Norte	2.092.292	203,500	0,591
AP4	Zona Oeste (Baixada da Barra da Tijuca, Baixada de Jacarepaguá)	1.105.620	293,825	0,624
AP-5	Zona Oeste (Regiões de Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Bangu)	1.840.343	572,204	0,554
Total		6.211.223	1.204,356	0,609

Fonte: PCRJ, 2010; PCRJ, 2024b

É possível observar que as duas APs mais populosas do MRJ (AP-3 e AP-5) possuem IDS abaixo da média municipal (0,609). Essas APs representam aproximadamente 2/3 da população municipal, cuja renda *per capita* predominante varia entre 1,1 e 1,5 salários-mínimos, sendo essas APs com os menores indicadores de renda per capita do município, abaixo da média de 2,27 salários-mínimos (Tabela 10).

No que se refere ao manejo de resíduos sólidos, o município do Rio de Janeiro instituiu, no ano de 1975, a Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB), empresa municipal de capital misto, atualmente vinculada à Secretaria Municipal de Conservação e responsável por diversas ações relacionadas à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos, incluindo: serviços de varrição, coleta de resíduos domiciliares e públicos, coleta de resíduos de saúde e da construção civil, limpeza de praças e parques, limpeza e higienização de áreas de feiras livres, limpeza de monumentos, coletas especiais (resíduos volumosos), limpeza de praias, podas e galhadas, limpeza de túneis e passagens subterrâneas, entre outros serviços correlatos. (PCRJ, 2021). Foi responsável, no ano de 2022, pela coleta de aproximadamente 2,6 milhões de toneladas de RSU (PCRJ, 2023a), com uma taxa de cobertura de 100% da população total (PCRJ, 2023c), cujos dados podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Geração de RSU no MRJ – 2022

Áreas de Planejamento	Denominação	População (Censo 2022)	Total de RDO Coletado (t/ano)	Total de RPU Coletado (t/ano)	Total de RSU Coletado (t/ano)	Total de RSU Coletado (t/d)	Total de RSU Coletado (kg/d)
AP-1	Área Central	282.058	77.554	82.612	160.166	438,81	438.812
AP-2	Zona Sul e Tijuca	890.910	213.920	111.359	325.279	891,18	891.175
AP3	Zona Norte	2.092.292	600.396	371.728	972.124	2.663,35	2.663.354
AP4	Zona Oeste (Baixada da Barra da Tijuca, Baixada de Jacarepaguá)	1.105.620	307.076	145.250	452.326	1.239,25	1.239.250
AP-5	Zona Oeste (Regiões de Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Bangu)	1.840.343	432.090	262.935	695.024	1.904,18	1.904.176
Total		6.211.223	1.631.035	973.885	2.604.920	7.136,77	7.136.767

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

Desse total, houve a recuperação de aproximadamente 48 mil toneladas de materiais secos (recicláveis) e úmidos (orgânicos), este último para fins de compostagem e Biometanização de caráter ainda experimental (PCRJ, 2023b).

A cobertura de coleta seletiva porta a porta executada pela COMLURB em relação à população urbana é de 61,53% (PCRJ, 2023b). Entretanto, segundo os dados publicados pela COMLURB (PCRJ, 2023b), o índice de recuperação de resíduos (IRR), composto pelo somatório de materiais desviados para fins de reutilização, reciclagem, compostagem e recuperação energética, divididos pela geração de RSU, é de 1,85%, semelhante ao indicador nacional de 1,9% (Brasil, 2023b), conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Índice de Recuperação de Resíduos - IRR do MRJ – 2022

RDO (t/ano)	RPU (t/ano)	RSU (RDO+RPU) (t/ano)	Materiais Recuperados (secos+orgânicos) (t/ano)	IRR
1.631.035,49	973.884,64	2.604.920,13	48.160,00	1,85

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

Considerando o porte do MRJ, que possui uma escala de geração elevada e apropriada para a implantação de outras rotas tecnológicas possíveis, o IRR pode ser considerado mínimo, refletindo-se em uma ampla disposição final (98,15% do total de RSU coletado) no Aterro Sanitário de Seropédica – município de Seropédica/RJ, a seguir sintetizado na Tabela 14.

Tabela 14 – Recuperação e descarte de materiais no MRJ – 2022

Destino	t/ano	%
Materiais recuperados	48.160,00	1,85%
Materiais descartados	2.556.760,13	98,15%
Total	2.604.920,13	100,00%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Tal volume de resíduos sem aproveitamento gerou ao município um custo aproximado de R\$ 326 milhões apenas no ano de 2022 (PCRJ, 2022a), ou R\$ 125,33 por tonelada, a seguir apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Gastos com transferência, transporte e disposição final de resíduos em aterro sanitário – 2022

Empresa	Valor Empenhado (R\$)	Valor Pago (R\$)	Total de RSU Coletado (t/ano)	R\$/t
10319900000230 - CICLUS AMBIENTAL DO Brasil S.A	326.480.527,64	R\$ 326.480.527,64	2.604.920,13	125,33

Nota: os custos apresentados incluem os seguintes serviços: transferência intramodal em 7 Estações de Transferência de Resíduos; transporte de resíduos em carretas de transferência; e disposição final no Aterro Sanitário de Seropédica.

Fonte: PCRJ, 2022a

O baixo indicador de recuperação de materiais observado no MRJ é uma realidade nacional, onde diversos fatores podem contribuir para isso. Segundo Ribeiro e Besen (2007) a baixa adesão na recuperação de materiais pode ser motivada pela falta de informação, baixa divulgação da coleta seletiva, dificuldades na separação dos materiais no ato da geração, entre outros que interferem na baixa eficiência da coleta seletiva quando existente. Em última análise, como os municípios são quase que exclusivamente os responsáveis por operacionalizar seus sistemas de manejo de resíduos, os critérios para definição de uma maior ou menor abrangência dos serviços de coleta seletiva, bem como adoção de políticas para ampliar a comunicação e educação ambiental, também são sua responsabilidade, sendo parâmetros que interferem diretamente na eficiência do sistema.

No que se refere à composição gravimétrica do RSU gerado no MRJ, a Gerência de Pesquisas, vinculada à Diretoria Técnica e de Logística da COMLURB é responsável por essa análise, sendo realizada em bases anuais desde o ano de 1995, tendo como objetivo principal a determinação do percentual de cada um dos componentes do RSU (papel, papelão, vidro, matéria orgânica putrescível etc.), a partir da relação entre o peso do componente analisado e o peso total da amostra considerada (PCRJ, 2020). A COMLURB busca avaliar os hábitos e tendências de consumo da população, estabelecendo correlações entre os resíduos e respectivos estratos socioeconômicos e culturais dos grupos geradores, além de indicar possibilidades de aproveitamento dos materiais, a exemplo do que já é realizado no município cujos dados são publicados anualmente por meio do Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos - IPP.

As amostras analisadas são diferenciadas em 3 tipologias, 7 componentes principais e 24 (vinte e quatro) subcomponentes, cujo resultado é publicado anualmente para todo o MRJ e de forma individualizada por AP, cujos resultados do ano de 2022 são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Composição gravimétrica do RSU do MRJ, segundo APs (%) – 2022

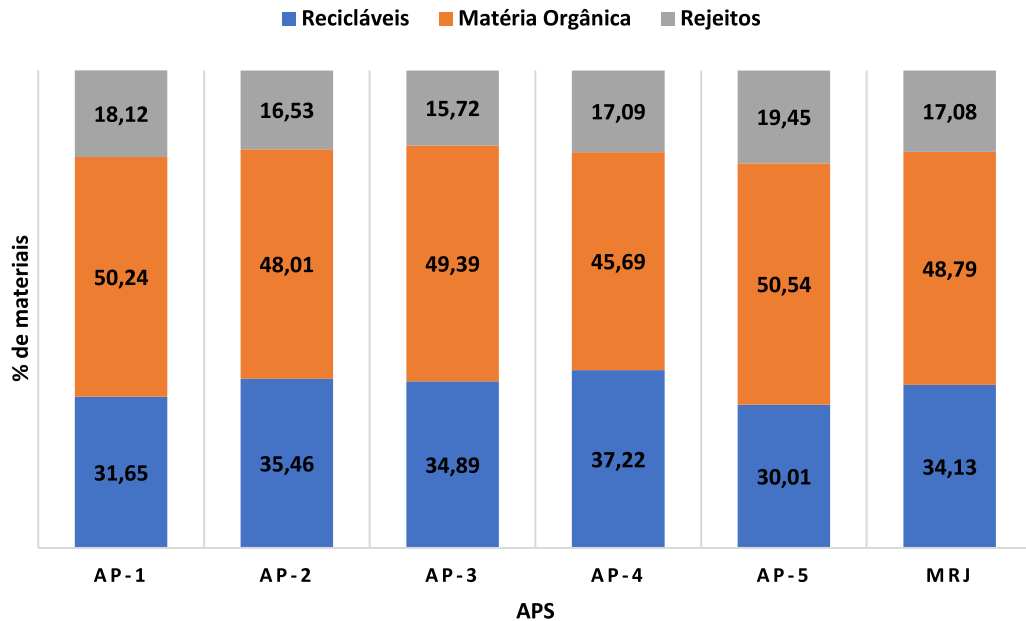
Materiais	AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5	MRJ
Recicláveis	31,65	35,46	34,89	37,22	30,01	34,13
Papel - Papelão(1)	15,05	16,31	16,87	16,54	13,89	15,95
Plástico (2)	12,44	12,80	13,14	13,14	12,42	12,89
Vidro(3)	3,34	5,08	3,79	6,14	2,85	4,18
Metal (4)	0,82	1,27	1,09	1,40	0,85	1,11
Matéria Orgânica (5)	50,24	48,01	49,39	45,69	50,54	48,79
Rejeitos	18,12	16,53	15,72	17,09	19,45	17,07
Inerte total (6)	2,74	2,29	2,07	2,33	2,74	2,34
Folha / flores	1,64	2,81	1,16	2,37	1,83	1,8
Madeira	0,32	0,99	0,61	0,64	0,56	0,64
Borracha	0,29	0,07	0,46	0,30	0,25	0,32
Pano - Trapo	4,29	2,06	2,53	2,20	3,60	2,75
Couro	0,58	0,21	0,65	0,29	0,61	0,5
Osso	0,44	0,39	0,47	0,34	0,35	0,4
Coco	1,01	0,66	0,66	0,79	1,22	0,83
Vela / parafina	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
Eletro/ Eletrônico	0,13	0,33	0,25	0,31	0,37	0,29
Têxteis e Papéis Sanitários	6,67	6,72	6,84	7,50	7,90	7,18

Fonte: PCRJ, 2023b

Como resultado, verifica-se que a matéria orgânica compõe o maior percentual da massa de RSU do MRJ no ano de 2022, que associada à parcela reciclável, representa pouco mais de 80% da massa de RSU com elevado potencial de valorização econômica. Tais dados acompanham a média nacional, com pouco menos de 80% dos resíduos compostos por essas tipologias de materiais (Tabela 5).

A Figura 3 sintetiza, em grandes grupos de materiais, os resultados da gravimetria do RSU do MRJ.

Figura 3 – Composição do RSU segundo grandes grupos de materiais no MRJ (%) – 2022



Fonte: PCRJ, 2023b

3.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS

Os dados gravimétricos são essenciais para a modelagem de rotas tecnológicas a que se propõe o presente estudo. No caso do MRJ, a COMLURB desenvolve análises gravimétricas do RSU desde o ano de 1995, em uma série histórica de 27 anos de dados (1995 a 2022) que foi considerada na modelagem, onde cabe destacar que o último ano disponível para consulta ao longo do desenvolvimento do presente trabalho refere-se a 2022. Entretanto, considerando essa série histórica, optou-se por proceder com um tratamento estatístico dos dados, com o objetivo de se avaliar a sua consistência e posterior identificação da melhor medida de tendência central (média e mediana por exemplo), dado o histórico disponível. Diante disso, conduziu-se os seguintes testes estatísticos:

- Teste de aderência à normalidade;
- Testes paramétricos ou não paramétricos de comparações múltiplas.

Os testes são aplicados para os grupos de RECICLÁVEIS e ORGÂNICOS, por se tratar das frações majoritárias dos RSU, representando pouco mais de 80% da sua composição no MRJ.

3.2.1 Testes de aderência à normalidade

Uma das avaliações estatísticas adotadas foi o teste de aderência à normalidade dos dados gravimétricos, de forma a se verificar se a distribuição desses dados se ajusta bem ou não aos dados amostrais.

A distribuição Normal, também conhecida como Distribuição de Gauss, é uma das distribuições de probabilidade estatística mais usadas, sendo essencial para a descrição adequada da amostra e a sua análise inferencial. É representada por um gráfico com uma curva simétrica ao redor do ponto médio e em forma de sino, sendo a distribuição de dados normal ao atender esses critérios (ÁUREA SOUZA, 2019).

Há diversos testes de aderência para avaliar se a distribuição de um conjunto de dados adere à distribuição normal como, por exemplo, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk e, sendo este último a ser utilizado para a avaliação da aderência à distribuição normal dos dados gravimétricos do MRJ entre os anos de 1995 e 2022, com índice de confiança de 95%.

O teste de Shapiro-Wilk fornece o parâmetro de p-valor, podendo ser analisado como medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0). A regra de decisão adotada para saber se a distribuição dos dados é normal ou não é: (i) se p-valor $\leq \alpha$, rejeita-se o H_0 – o conjunto de dados em questão não tem aderência a uma distribuição normal; (ii) se p-valor $> \alpha$, não se rejeita H_0 – e a hipótese de que o conjunto de dados apresenta aderência à distribuição normal (Lopes *et al.*, 2013 p.60).

Após realizados o teste de aderência, tem-se a definição se os dados da série histórica conduzirão à realização de testes paramétricos ou não paramétricos, para apoio à tomada de decisão em relação à medida de tendência central dos dados gravimétricos a ser utilizada.

3.2.2 Testes paramétricos e não paramétricos

Métodos paramétricos em estatística referem-se a técnicas de análise que assumem que os dados seguem uma distribuição específica baseada em parâmetros fixos. Esses métodos são fundamentais quando se conhece a forma da distribuição dos dados ou quando há uma hipótese razoável de que os dados se ajustam a essa distribuição. Os métodos paramétricos, portanto, são uma escolha poderosa na estatística quando as condições para sua aplicação são cumpridas (validação por meio de um teste de normalidade por exemplo), possuindo maior capacidade de detecção de diferenças na comparação dos parâmetros (Lapa, 2021). Eles permitem a utilização de toda a teoria matemática que suporta a distribuição dos dados, proporcionando uma base

sólida para a inferência estatística, análise e modelagem em uma variedade de campos científicos.

Já os métodos não paramétricos, em estatística, referem-se a técnicas de análise de dados que não assumem uma forma fixa ou pré-definida para a distribuição dos dados. Diferentemente dos métodos paramétricos, os testes não paramétricos são menos exigentes, dispensando, por exemplo, a normalidade dos dados (Firmino, 2015). Porém, são ferramentas essenciais quando as suposições de modelos paramétricos não são atendidas ou quando se deseja uma abordagem menos restritiva e mais baseada nos dados reais coletados, proporcionando uma análise mais flexível e robusta em diversos contextos de pesquisa (Lapa, 2021).

3.2.3 Testes de hipóteses - comparações

Testes de hipóteses são uma técnica estatística usada para decidir se uma afirmação sobre um conjunto de dados é plausível, com bases nas informações obtidas de uma amostra extraída desses dados. Ou seja, é um método aplicado para verificar a validade ou não de uma hipótese (Firmino, 2015).

Primeiro, define-se a hipótese a ser testada, ou Hipótese Nula (H_0), que sugere que não há efeito ou mudança e os dados podem ser aceitos, sendo a hipótese a se refutar. E a Hipótese Alternativa (H_1) sugere o contrário. Se a estatística de teste indicar que os dados são muito improváveis sob a Hipótese Nula, rejeita-se H_0 em favor de H_1 . O p-valor, uma medida da probabilidade de obter os dados observados se H_0 for verdadeira, ajuda a decidir se a evidência é forte o suficiente. Em considerando as possibilidades que se apresentam, tem-se para os dados gravimétricos do MRJ:

- **Se p-valor > 0,05** – os dados gravimétricos das APs não possuem diferenças significativas a 95% de índice de confiança, onde será considerada a média da série histórica dos dados gravimétricos consolidados do MRJ para modelagem de rotas tecnológicas do MRJ, sem individualização por AP;
- **Se p-valor < 0,05** – os dados gravimétricos das APs possuem diferenças significativas a 95% de índice de confiança, onde serão considerados os dados gravimétricos individualizados por AP.

Para o presente caso, a Hipótese Nula (H_0) sugere que os dados gravimétricos consolidados para o MRJ sejam aceitos para a modelagem de rotas tecnológicas, sem individualização por AP. Em rejeitando essa hipótese, aplicar-se-á a Hipótese Alternativa (H_1), que conduzirá a uma modelagem de rotas tecnológicas individualizadas por AP.

Existem vários testes de hipóteses possíveis de utilização para a análise em tela, a exemplo do Teste t Student, Teste de qui-quadrado, Teste ANOVA e teste de Mann-Whitney U. Para o presente caso, utilizou-se o Teste ANOVA (Teste Paramétrico de Comparação Múltipla por Análise de Variância), usado para comparar as médias de três ou mais grupos independentes para ver se pelo menos um grupo difere significativamente dos outros, e, por fim, um teste complementar *post hoc*, sendo aplicado o Teste de Tukey.

3.2.4 Ferramenta de análise estatística

As análises estatísticas são desenvolvidas com o apoio do *software Statistica*, versão 12.0, desenvolvido pela *StatSoft*[®]. Esse *software* possibilita a criação de tabelas e gráficos que resumem as informações obtidas e, ainda, realiza procedimentos avançados, tais como: inferência estatística, teste de hipóteses e estatística descritiva.

3.3 PROJEÇÃO POPULACIONAL

O cálculo de estimativa populacional foi desenvolvido considerando as APs do MRJ, tomando como base uma série histórica de Censos Demográficos desde o ano de 2000, a seguir ilustrado na Tabela 17.

Tabela 17 – População das APs segundo Censos Demográficos

Áreas de Planejamento	2000	2010	2022
AP-1	268.280	296.400	282.058
AP-2	997.478	1.009.170	890.910
AP-3	2.353.590	2.400.148	2.092.292
AP-4	682.051	909.955	1.105.620
AP-5	1.556.505	1.704.773	1.840.343
Total	5.857.904	6.320.446	6.211.223

Fonte: PCRJ, 2023c

Com base nesses dados, foram avaliados 3 métodos estimativos de projeção, a seguir descritos.

3.3.1 Método de projeção aritmética

Mais conhecido simplesmente como Método Aritmético, este permite determinar a evolução populacional segundo uma taxa constante ao longo do decorrer do período considerado, mediante dados conhecidos de população em 2 momentos (Tavares; Pereira Neto, 2020), como a população dos 2 últimos censos demográfico, por exemplo. Logo, este método traça a evolução populacional segundo uma linha reta. É definida segundo as seguintes fórmulas (Marra, 2023):

$$Ka = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (1)$$

$$Pt = P_0 + Ka \times (t - t_0) \quad (2)$$

Onde:

t = ano final;

t₀ = ano inicial;

K_a = coeficiente;

P₀ = população inicial; e

P_t = população final

3.3.2 Método de projeção geométrica

Este método, também simplesmente conhecido como Método Geométrico, determina a evolução populacional levando em conta uma fase de crescimento acelerado, definida por uma curva exponencial. Segundo Marra (2023) “a velocidade de crescimento (q) é subtraída do quociente entre a população final e a população no início do período da análise”.

Por meio desse método, as taxas futuras de crescimento geométrico são determinadas a partir de dados de censos demográficos passados, cujas equações são as seguintes (Marra, 2023):

$$Kg = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t^2 - t^0} \quad (3)$$

$$P_t = P_0 \times e^{kg \times (t-t_0)} \quad (4)$$

Onde:

K_g = coeficiente;

P_0 = população do último censo conhecido;

P_2 = população do censo anterior ao último conhecido; t_0 = Ano do último censo;

t_2 = ano do censo anterior ao último conhecido;

P_t = população Projetada;

t = ano projetado (início, meio e fim).

3.3.3 Método de projeção AiBi ou *Apportionment Method*

O Método AiBi determina a tendência de crescimento demográfico tendo como princípio fundamental a subdivisão de uma área maior (já conhecida) em n áreas menores. Segundo Madeira e Simões (1972), busca-se assegurar ao final das estimativas das áreas menores a reprodução da estimativa, previamente conhecida, da área maior através da soma das estimativas das áreas menores. Ou seja, as populações dos municípios têm relação com a população do estado a qual pertence. Já as populações dos estados têm relação com a população total do Brasil (Marra, 2023).

Logo, considera-se uma área maior com uma população estimada em um momento t [$P(t)$]. Divide-se esta área em n áreas menores (i) que possuem uma população $P(i)$ em uma época t , como evidenciado nas equações (5) e (6) (Marra, 2023):

$$P_i(t); i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

$$P(t) = \sum_1^n P_i(t) \quad (6)$$

Segundo Lins *et al* (2023) decompondo-se, por hipótese, a população desta área i em dois termos:

- $a_i P(t)$, que depende do crescimento da população da área maior; e
- b_i .

O coeficiente a_i é denominado coeficiente de proporcionalidade do incremento da população da área menor i em relação ao incremento da população da área maior, e b_i é o denominado coeficiente linear de correção. Como consequência, tem-se a equação (7) (Marra, 2023):

$$P_i(t) = a_i P(t) + b_i \quad (7)$$

Ainda segundo Lins *et al* (2013), para a determinação destes coeficientes, utiliza-se o período delimitado por dois Censos Demográficos, sendo t_0 e t_1 , respectivamente, as datas dos dois Censos. Ao se substituir t_0 e t_1 na equação (7), tem-se as equações (8) e (9) a seguir (Marra, 2023).

$$P_i(t_0) = a_i P(t_0) + b_i \quad (8)$$

$$P_i(t_1) = a_i P(t_1) + b_i \quad (9)$$

Por meio da resolução das equações (8) e (9), cujas incógnitas são a_i e b_i , tem-se as equações (10) e (11) (Marra, 2023).

$$a_i = \frac{P_i(t_1) - P_i(t_0)}{P(t_1) - P(t_0)} \quad (10)$$

$$b_i = P_i(t_0) - a_i P(t_0) \quad (11)$$

Nas equações apresentadas, deve-se considerar os seguintes dados:

- t_0 : 1º censo demográfico (2010);
- t_1 : 2º censo demográfico (2022);
- t : ano desejado para projeção futura.

Considerando as demandas dessa metodologia, foram consideradas como maior área territorial e menor área territorial, respectivamente, o MRJ e as APs.

A despeito das variáveis apresentadas, a população da maior área no tempo t (Pt) é um dado fixo, com base em projeções populacionais pré-determinadas pelo IBGE ou por órgãos como IPP do MRJ. Nesse caso, as projeções populacionais disponíveis, desenvolvidas pelo IBGE e pelo IPP, tiveram como base as taxas de crescimento geométricas definidas pelos

Censos de 1980, 1991 e 2000, os quais definiam, para o ERJ e para o MRJ curvas de crescimento um pouco mais acentuadas, resultando nas diferenças a seguir apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Diferenças entre o Censo 2022 e projeções populacionais baseadas em censos anteriores

Unidade Territorial	Censo 2022 (habitantes)	Projeção para 2022* (habitantes)	Diferença (habitantes)	Diferença (% em relação ao Censo 2022)
ERJ	16.055.174	17.078.778	1.023.604	+6,38%
MRJ	6.211.223	6.428.785	217.562	+3,50%

Nota: * projeção com base nos Censos 1980, 1991 e 2000, até o ano de 2065

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Como não foram desenvolvidas novas projeções populacionais com base nos Censos de 2010 e 2022, foi necessário estimar a população do ERJ para definição da população do MRJ e de suas APs, para os anos de 2024, 2032 e 2040 (cenários de modelagem, conforme apresentado na Tabela 25 do Capítulo 3.5), aplicando-se taxa média de crescimento geométrico (r) entre os anos de 2010 e 2022 com base no seguinte cálculo (De Miranda Rocha; Amora, 2016):

$$r = \sqrt[12]{\frac{\text{População 2022}}{\text{População 2010}}} - 1 \quad (12)$$

O radicando utilizado na equação (12) possui índice igual a 12 por ser essa a diferença de anos entre os Censos de 2010 e 2022. Logo, aplicando-se tal equação, tem-se que a taxa média de crescimento geométrico (r) entre os anos de 2010 e 2022 é de 0,032%. Extrapolando-se para os anos seguintes, tem-se a seguinte projeção populacional para o ERJ (com base nos últimos 2 censos) (Tabela 19).

Tabela 19 – Projeção populacional do ERJ – 2010 a 2040

(continua)

Ano	População	Ano	População	Ano	População
2010	15.993.583	2021	16.050.032	2032	16.106.681
2011	15.998.707	2022	16.055.174	2033	16.111.841
2012	16.003.832	2023	16.060.317	2034	16.117.002
2013	16.008.959	2024	16.065.462	2035	16.122.165

(conclusão)

Ano	População	Ano	População	Ano	População
2014	16.014.087	2025	16.070.609	2036	16.127.330
2015	16.019.217	2026	16.075.757	2037	16.132.496
2016	16.024.349	2027	16.080.907	2038	16.137.664
2017	16.029.482	2028	16.086.058	2039	16.142.834
2018	16.034.617	2029	16.091.212	2040	16.148.006
2019	16.039.754	2030	16.096.366		
2020	16.044.892	2031	16.101.522		

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Por fim, cabe mencionar que o Método de Projeção Populacional AiBi é utilizado pelo IBGE na produção das estimativas e projeções oficiais de estados municípios brasileiros (Borges; Ervatti; Silva, 2011), também sendo aplicado pelo MRJ no desenvolvimento de planejamentos que envolvam aspectos demográficos, em disciplinas como saúde e educação por exemplo (PCRJ, 2013).

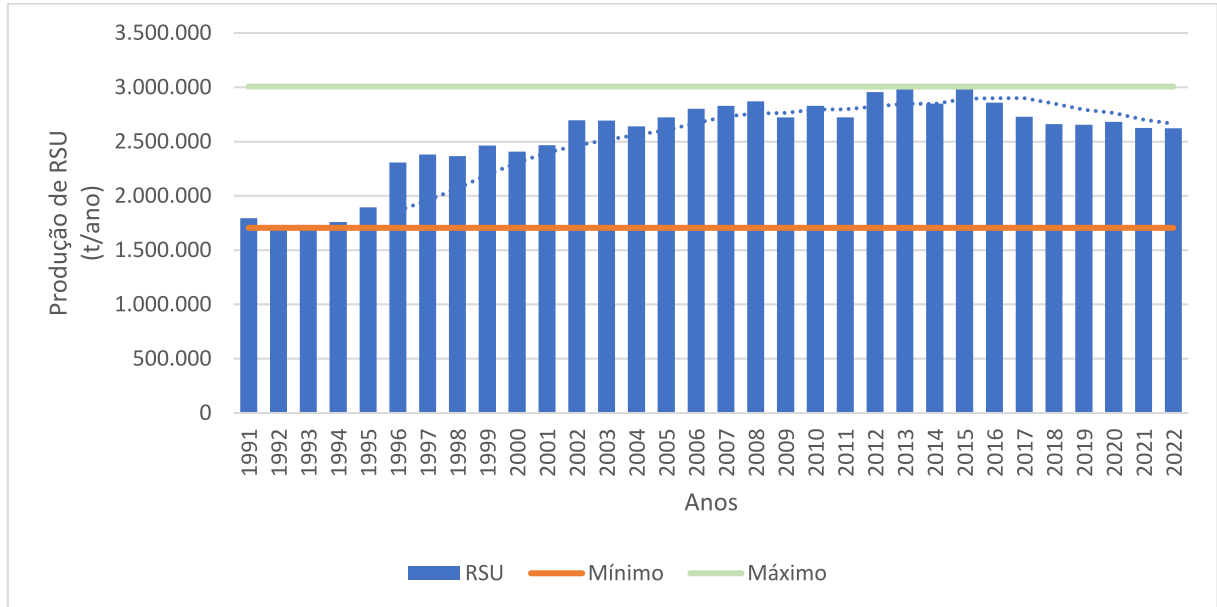
3.4 PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE RSU

A geração de resíduos é uma métrica de planejamento urbano que guarda relação direta com o consumo de bens e serviços necessários à satisfação das necessidades humanas e expectativas materiais da sociedade (Costa; Diz; Oliveira, 2018). Em uma sociedade baseada na economia de mercado, o consumo de bens e serviços é um aspecto fundamental para a garantia do desenvolvimento, em uma roda onde o consumo movimentava a economia, estimula o crescimento do Produto Interno Bruto – PIB, promove a arrecadação de impostos e garante a prestação de serviços aos cidadãos que promovem o consumo e pagam impostos (Moura, 2018).

Em um cenário contemporâneo com ascensão da curva populacional associada à elevação do consumo para além das necessidades fundamentais, o consumismo, enquanto termo que define o consumo como uma cultura individualista com o propósito de valorização das liberdades individuais e atendimento às necessidades de insaciabilidade do indivíduo em uma economia de mercado, é componente vital na geração de resíduos (Correa da Silva; Galvão Júnior; Costa, 2023). Não diferente, o MRJ sofre tais efeitos como qualquer grande metrópole, onde a crescente populacional das últimas décadas e a elevação nos padrões de consumo alavancados pela melhoria da economia neste século, alcançando os PIBs estadual e municipal entre os anos de 2010 e 2020. Nesse mesmo período, o RSU produzido no MRJ teve elevação,

onde, em teoria, pode ser sido consequência da elevação dos indicadores macroeconômicos desse mesmo período, a seguir ilustrado na Figura 4.

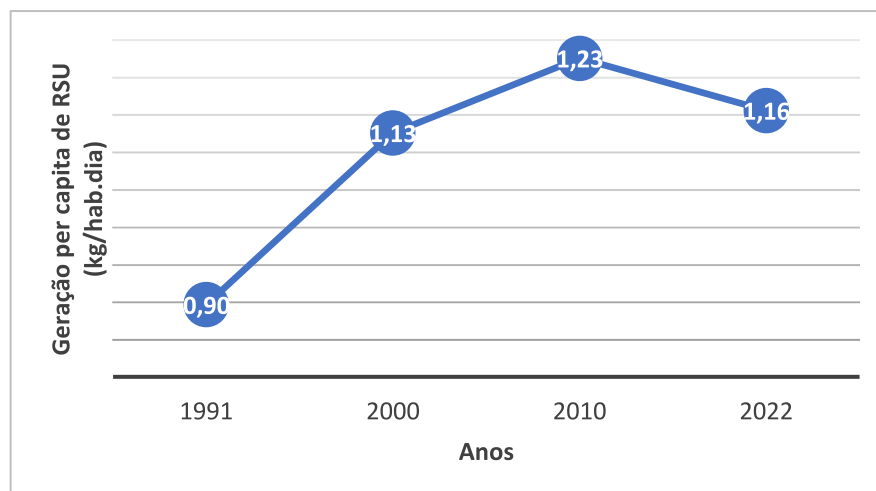
Figura 4 – Evolução da produção de RSU no MRJ – 1991 a 2022



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Tal fenômeno também se manifesta no índice de geração *per capita* de resíduos do MRJ, conforme ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 – Evolução do índice de geração *per capita* de RSU no MRJ (kg/hab.dia) – 1991 a 2022



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Para o presente trabalho optou-se pela utilização do índice de geração *per capita* do ano de 2022 como indicador de projeção de RSU para os cenários de estudo (base e futuros), sendo este indicador calculado com base nos dados de RSU coletado do MRJ (ano de 2022) e na população aferida pelo Censo Demográfico do mesmo ano, os quais podem ser observados na Tabela 20.

Tabela 20 – Índice de geração per capita de RSU a ser adotado para modelagem de cenários futuros

APs	Denominação	Índice de geração per capita a ser adotado (kg/hab.dia)
AP-1	Área Central	1,36
AP-2	Zona Sul e Tijuca	0,93
AP-3	Zona Norte	1,18
AP-4	Zona Oeste (Baixada da Barra da Tijuca, Baixada de Jacarepaguá)	1,09
AP-5	Zona Oeste (Regiões de Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Bangu)	1,03
MRJ		1,16

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

3.5 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA PROTEGEER E METAS DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS

Os modelos de apoio à decisão são ferramentas que apoiam a escolha das melhores alternativas para a resolução de determinados problemas. No Brasil, os sistemas de limpeza urbana municipais se adequam a diferentes realidades culturais, geográficas e econômicas, onde as soluções de uma região nem sempre se aplicam a outra região. Nesse sentido, a definição dos arranjos tecnológicos mais adequados passam pela necessidade da adoção de modelos matemáticos que confirmam suporte à melhor tomada de decisão (Lima *et al*, 2014 p.36).

A esse exemplo, o projeto ProteGEer, formado por meio de uma cooperação técnica entre Brasil e Alemanha na busca por uma gestão sustentável e integrada do RSU, propõe uma ferramenta de suporte a decisão que auxilia estudos de pré-viabilidade de soluções tecnológicas presentes e futuras para manejo de RSU em municípios, consórcios ou regiões. (Brasil, 2019a).

Essa ferramenta possibilita a simulação de rotas tecnológicas para o gerenciamento de RSU através de balanço de massa e estimativa de custos associados (Brasil, 2019a), sendo que as rotas avaliadas pela ferramenta são aquelas já consolidadas no Brasil e com potencial de serem implantadas, como triagem manual e mecanizada; produção CDR; compostagem e biodigestão anaeróbia; incineração e aterro sanitário.

A ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) é aplicada para o MRJ, utilizando-se, para a sua alimentação, dados oficiais disponibilizados pela PCRJ, por meio do IPP e da COMLURB, referentes a geração anual de resíduos, composição gravimétrica e recuperação de materiais.

A ferramenta é composta por 17 abas, sendo:

- 1 aba de apresentação da ferramenta;
- 5 abas para inserção de dados e cálculo de balanço de massa;
- 1 aba para estimativa de emissão de gases de efeito estufa (GEE);
- 10 abas para simulação de custos associados às rotas modeladas.

A ferramenta avança além dos objetivos do estudo, onde será utilizado apenas o recurso com foco na avaliação das melhores rotas tecnológicas a serem aplicadas à luz das metas do PLANARES (Brasil, 2022c) e seus resultados incidentes sob as dimensões técnica e ambiental.

Dessa forma, são utilizadas as seguintes abas da ferramenta:

- R-Entrada
- R-Definição
- R-Avançado
- R-Fluxo Massa
- R-Resumo Bal. Massa

Importante destacar que a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) também indica métricas de geração de e.e. com base no RSU, onde o tratamento térmico por meio da incineração de RSU é uma das rotas modeladas pela ferramenta para atendimento das metas do PLANARES (Brasil, 2022c). Com isso, é possível quantificar o total de energia elétrica (E.E.), em kWh/dia, oriundo da rota de tratamento térmico do RSU e do próprio aproveitamento de biogás do aterro sanitário. Da mesma forma, a ferramenta também permite definir o balanço de emissões evitadas de gases de efeito estufa (GEE), estimando o quantitativo líquido, em t_{CO_2eq}/ano , de emissões de GEE evitados por meio da adoção das rotas tecnológicas modeladas.

Para composição da modelagem das rotas tecnológicas do MRJ, torna-se necessária a alimentação da ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) com os seguintes dados de cada AP:

- População (presente e futura)

- Geração de RSU (presente e futura)
- Gravimetria (presente e futura)

A modelagem das rotas tecnológicas considera as Metas e Indicadores Globais 4, 6, 7 e 9 definidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c) referentes ao percentual de recuperação de materiais na massa de RSU coletada. Tais cenários são estabelecidos em função da necessidade de encerramento dos lixões e previsão do fortalecimento da cadeia de logística reversa no país, com o objetivo de impulsionar a recuperação e valorização de resíduos no país nesse período (Brasil, 2022c), os quais encontram-se apresentados na Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24.

Tabela 21 – Percentual de recuperação de materiais recicláveis (Meta 6/ Indicador Global 6)

Macrorregião	(%)	
	2032	2040
Sudeste	16,2	25,8
Brasil	12,8	20,0

Fonte: Brasil, 2022c

Tabela 22 – Percentual de recuperação de matéria orgânica para tratamento biológico (Meta 7/ Indicador Global 7)

Macrorregião	(%)	
	2032	2040
Sudeste	10,8	18,1
Brasil	8,1	13,5

Fonte: Brasil, 2022c

Tabela 23 – Percentual de recuperação de materiais para fins de aproveitamento energético por meio de tratamento térmico (Meta 9/ Indicador Global 9)

Macrorregião	(%)	
	2032	2040
Sudeste	12,1	20,0
Brasil	10,1	14,6

Nota: A presente tabela não é apresentada no PLANARES. Entretanto, é informada a metodologia de cálculo dos presentes resultados.

Fonte: Brasil, 2022c

Tabela 24 – Percentual de massa total recuperada (Meta 4/ Indicador Global 4)

Macrorregião	(%)	
	2032	2040
Sudeste	39,1	63,9
Brasil	31,0	48,1

Nota: A Meta 4/ Indicador Global 4 é o somatório das metas 6, 7 e 9

Fonte: Brasil, 2022c

Considerando as metas definidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c), serão modelados os seguintes cenários (Tabela 25):

Tabela 25 – Cenários a serem modelados

Cenário	Ano
Base	2024
1	2032 + Controle
2	2040 + Controle

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

O Cenário Controle é baseado na modelagem da Rota do Cenário Base para fins de entendimento do seu comportamento ao serem inseridos os dados existentes do ano de 2022. Cada cenário (Tabela 25), é modelado considerando os indicadores futuros (progressão da geração, progressão do custo do resíduo disposto no aterro sanitário, entre outros), porém baseados na estrutura da Rota do Cenário Base, em especial nos indicadores de recuperação de materiais. Dessa forma, busca-se obter resultados com maior grau de comparabilidade diante das metas futuras para recuperação de materiais.

Cabe aqui uma avaliação referente ao PERS e ao PMGIRS. Ambos os planos definiram, a seu tempo, metas para recuperação de materiais, os quais foram avaliados e encontram-se apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Metas para recuperação de materiais definidas pelo PERS e pelo PMGIRS em comparação ao PLANARES

Planos	Metas	2032 (%)	2040 (%)
PMGIRS	META 1 – Percentual da fração orgânica tratada através de compostagem, metanização e outros processos	-	-
	META 2 – Percentual de recuperação e materiais recicláveis	-	-
PERS/RJ	META MRSU 4 – Percentual de triagem e beneficiamento dos materiais recicláveis oriundos da fração seca da coleta seletiva	100,0	-
PLANARES	META 7/ INDICADOR GLOBAL 7 – Percentual de recuperação de matéria orgânica para tratamento biológico	10,8	18,1
	META 6/ INDICADOR GLOBAL 6 – Percentual de recuperação de materiais recicláveis	16,2	25,8

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Sobre o PERS/RJ (Rio de Janeiro, 2013) o PMGIRS (PCRJ, 2021) e o PMetGIRS (Rio de Janeiro, 2023) cabem as seguintes considerações:

- As metas estabelecidas pelo PERS/RJ (Rio de Janeiro, 2013) são muito destoantes daquelas estabelecidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c) e pelo PMGIRS (PCRJ, 2021). Logo, opta-se pela sua não utilização;
- O PMGIRS (PCRJ, 2021) adotou metas apenas para o ano de 2024, não havendo a previsão de metas posteriores;
- O PMetGIRS (Rio de Janeiro, 2023) ainda não possui metas definidas para recuperação de materiais, uma vez que o referido plano ainda não encontrava-se concluído no período do desenvolvimento do presente estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo possibilitaram avaliar, por meio da aplicação da ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b), o quantitativo de RSU que o MRJ pode colocar em rota tecnológica de aproveitamento nos cenários futuros, mas que são encaminhados quase que integralmente para disposição final no Aterro Sanitário de Seropédica no cenário base (2024). A avaliação segundo AP trouxe resultados que indicaram a necessidade de um planejamento com olhar específico para cada unidade territorial, onde o tratamento estatístico aplicado aos dados corrobora com tal necessidade.

4.1 POPULAÇÃO, GERAÇÃO DE RSU E GRAVIMETRIA

Para definição das estimativas populacionais, aplica-se o Método AiBi de projeção populacional, sendo este o método já utilizado pelo MRJ, cujos resultados, segundo AP, podem ser observados na Tabela 27.

Tabela 27 – Estimativa populacional das APs segundo Método AiBi

APs	Censos			Coeficientes		Cenário Base	Cenários Futuros	
	2000	2010	2022	ai	bi	2024	2032	2040
AP-1	268.280	296.400	282.058	0,131	-533.534	279.662	270.064	260.441
AP-2	997.478	1.009.170	890.910	1,083	-5.834.223	871.156	792.012	712.666
AP-3	2.353.590	2.400.148	2.092.292	2,819	-15.414.664	2.040.868	1.834.840	1.628.284
AP-4	682.051	909.955	1.105.620	-1,791	12.232.571	1.138.304	1.269.250	1.400.531
AP-5	1.556.505	1.704.773	1.840.343	-1,241	9.549.850	1.862.989	1.953.717	2.044.678
Total	5.857.904	6.320.446	6.211.223	-	-	6.192.978	6.119.883	6.046.599

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Ao avaliar-se o comportamento demográfico do MRJ por meio da análise das APs, verifica-se que as APs 4 e 5, juntas representam 48,5% da população do MRJ e tiveram evolução demográfica positiva entre os Censos de 2000 e 2022. Essas duas APs localizam-se na Zona Oeste do MRJ, região que ancora a expansão do município nas últimas décadas, o que pode justificar tal crescimento populacional.

O cálculo de projeção de geração de RSU constitui-se essencialmente no produto de 2 variáveis: índice de geração per capita de RSU (Tabela 20) e população estimada (Tabela 27) cujos resultados, segundo AP, estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Estimativa de geração de RSU segundo cenários de modelagem e APs do MRJ – 2024 a 2040

APs	Índice de geração <i>per capita</i> de RSU (kg/hab.dia)	Geração de RSU (t/d)		
		Cenário Base	Cenários Futuros	
		2024	(1) 2032	(2) 2040
AP-1	1,36	380,34	367,29	354,20
AP-2	0,93	810,17	736,57	662,78
AP-3	1,18	2.408,22	2.165,11	1.921,37
AP-4	1,09	1.240,75	1.383,48	1.526,58
AP-5	1,03	1.918,88	2.012,33	2.106,02
MRJ	1,16	6.758,37	6.664,78	6.570,95

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

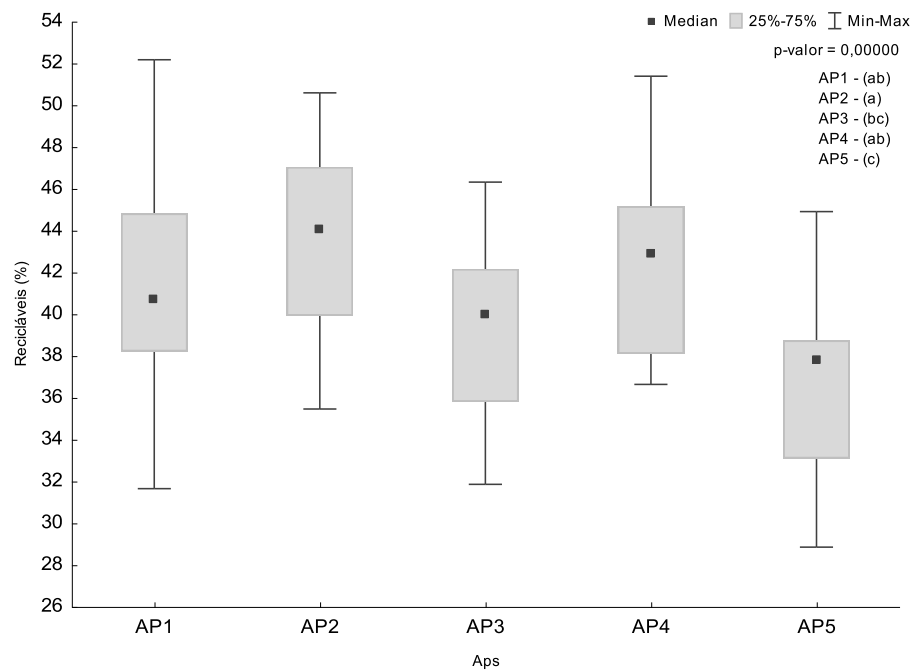
No que se refere à composição gravimétrica, este é importante dado de entrada da ferramenta de modelagem em aplicação. Com base no perfil do RSU, a ferramenta direciona cada tipologia para uma rota específica de aproveitamento. Considerando-se a série histórica de dados gravimétricos do MRJ, aplica-se tratamento estatístico aos dados, com o objetivo de se avaliar a sua consistência e posterior identificação da melhor medida de tendência central a ser utilizada, conforme apresentado no Capítulo 3.2. Dessa forma, são executados os seguintes testes: aderência à normalidade, paramétrico de comparação múltipla por análise de variância (ANOVA) e, por fim, teste complementar *post hoc* (Teste de Tukey).

Conforme apresentado no Capítulo 3.2.1, o teste de aderência à normalidade é uma das etapas de tratamento estatístico necessária para a verificação da consistência dos dados amostrais, considerando a série histórica de 27 anos de análises gravimétricas, onde aplicou-se o teste de aderência à normalidade de Shapiro-Wilk. Como resultado, verifica-se que a série histórica dos dados gravimétricos avaliados, segundo AP, apresenta aderência à distribuição normal para os grupos recicláveis e orgânicos, com índice de confiança de 95% (p-valor > 0,05), cujos resultados podem ser observados no APÊNDICE A.

Como os resultados de p-valor indicam distribuição normal, procede-se com teste paramétrico de comparação múltipla por análise de variância (ANOVA), com o objetivo de verificar se há diferenças significativas entre as médias amostrais dos valores reportados para as frações de recicláveis e orgânicos, segundo APs, no período entre os anos de 1995 e 2022, também para as frações de recicláveis e orgânicos. Um p-valor > 0,05 indica que as médias não possuem desvio significativo, ou seja, assume-se a gravimetria consolidada de todo o MRJ (Hipótese Nula (H0)) para fins de modelagem de rotas tecnológicas. Em oposição, um p-valor

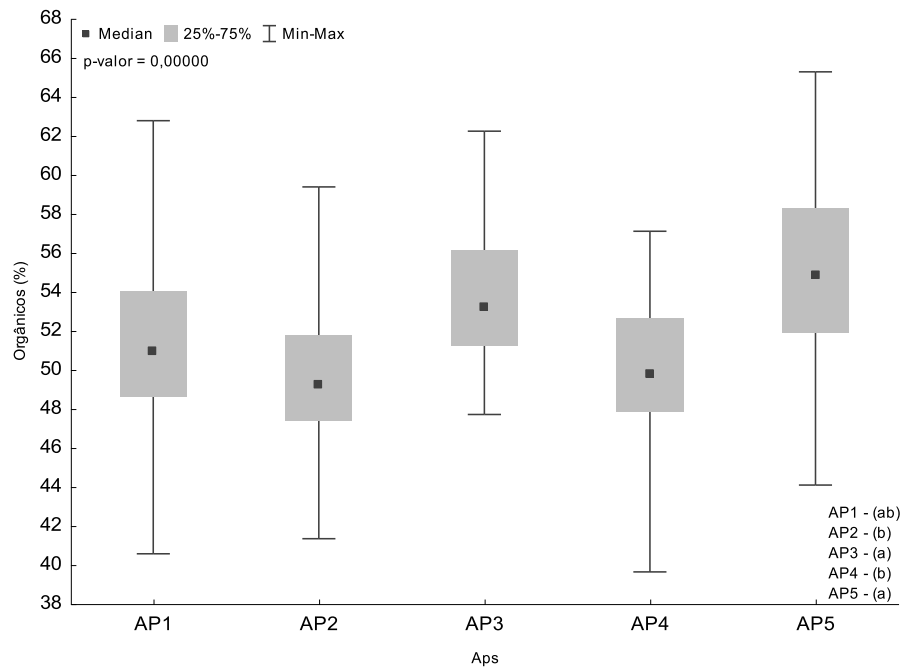
< 0,05 indica um desvio significativo nas médias dos valores, rejeitando-se a gravimetria consolidada do MRJ, em função da evidência de diferenças significativas entre as gravimetrias individualizadas, adotando-se valores específicos de cada AP (Hipótese Alternativa (H1)). A Figura 6 e a Figura 7 sintetizam os resultados do teste ANOVA.

Figura 6 – *Boxplot* de variâncias amostrais nas análises gravimétricas segundo APs – grupo Recicláveis



Nota: Para índices iguais não existe diferenças significativa a 95% de confiança.
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 7 – *Boxplot* de variâncias amostrais nas análises gravimétricas segundo APs – grupo Orgânicos



Nota: Para índices iguais não existe diferenças significativas a 95% de confiança.
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Os resultados apresentados no teste ANOVA demonstram que os dados gravimétricos das APs possuem diferenças significativas a 95% de índice de confiança ($p\text{-valor} < 0,05$). Com isso, refuta-se a Hipótese Nula (H_0) (utilização da gravimetria de todo o MRJ sem diferenciação por AP) e acata-se a Hipótese Alternativa (H_1), que considera a média da série histórica dos dados gravimétricos por AP, levando a uma modelagem de rotas tecnológicas do MRJ individualizadas segundo essas unidades territoriais.

A Tabela 29 apresenta a gravimetria a ser utilizada na modelagem das rotas tecnológicas do MRJ, segundo APs, para o Cenário Base (2024), Cenários Futuros (2032 e 2040) e Cenário Controle.

Tabela 29 – Gravimetria média segundo APs

Grupos	Componentes	Áreas de Planejamento				
		AP-1 (%)	AP-2 (%)	AP-3 (%)	AP-4 (%)	AP-5 (%)
Matéria Orgânica	Resíduos de alimentos	51,72	49,71	53,54	49,66	55,02
	<i>Total</i>	51,72	49,71	53,54	49,66	55,02
Recicláveis	Papel, papelão	17,80	19,48	16,57	17,63	14,71
	Plástico filme	13,12	13,01	12,97	13,38	12,66
	Plásticos rígidos	4,85	4,81	4,79	4,95	4,68
	Vidros	3,44	4,22	2,99	4,30	2,71
	Metais ferrosos	1,28	1,33	1,27	1,41	1,18
	Metais não ferrosos	0,62	0,65	0,61	0,69	0,58
	<i>Total</i>	41,11	43,50	39,20	42,36	36,52
Outros/Rejeitos	Têxteis	2,09	1,47	2,02	1,65	2,21
	Borracha, couro	0,52	0,37	0,55	0,47	0,59
	Fraldas descartáveis e similares	1,00	1,08	1,03	1,11	1,15
	Madeira	0,54	0,43	0,47	0,45	0,47
	Resíduos verdes (jardins e parques)	0,84	1,21	1,27	2,32	2,12
	Resíduos minerais	1,32	1,35	1,25	1,15	1,14
	Outros	0,86	0,88	0,67	0,83	0,78
	<i>Total</i>	7,17	6,79	7,26	7,98	8,46
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

O RSU possui a matéria orgânica como o seu principal constituinte, seguido de uma parcela de materiais potencialmente recicláveis. No entanto, essa composição pode variar de região para região e ao longo do tempo, mesmo dentro do próprio município, devido a fatores como dinâmica de crescimento populacional, diferenças nos hábitos de consumo, sazonalidade e diferenças socioeconômicas (de Oliveira Silva *et al*, 2021). No MRJ, cabe destacar que as gravimetrias de cada AP localizam-se nos mesmos patamares, porém guardando diferenças entre si. As APs 2 (Zona Sul e Grande Tijuca) e 4 (Zona oeste - Baixadas da Barra da Tijuca e Jacarepaguá) apresentam composição gravimétrica semelhante, onde destaca-se que estas APs possuem características de uso do solo e dinâmicas populacionais semelhantes, bem como os maiores IDss do MRJ. São predominantemente residenciais, comerciais e turísticas, com eixos empresariais periféricos à área central do MRJ. A composição gravimétrica do seu RSU possui as menores concentrações de matéria orgânica.

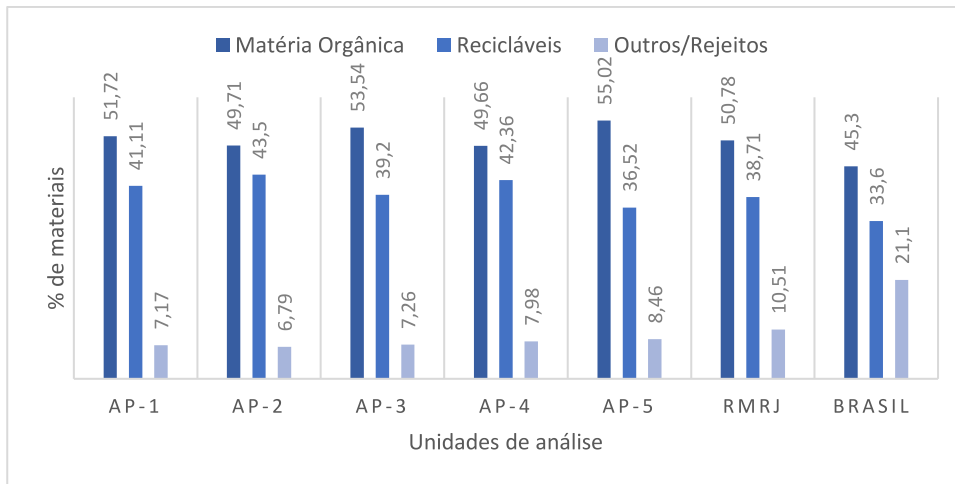
Da mesma forma, as APs 3 (Zona Norte) e 5 (Zona Oeste - Regiões de Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Bangu) possuem semelhante composição gravimétrica do RSU, com uso do solo predominantemente residencial e industrial, onde a AP-3 possui uma ocupação mais antiga e tradicional e a AP-5 configura-se em uma zona de expansão recente do MRJ. Ambas

apresentam os menores IDSs municipais, e uma composição de resíduos com as maiores concentrações de matéria orgânica.

Considerando suas composições gravimétricas, em especial as concentrações de matéria orgânica presente em suas massas de RSU, o que se observa no MRJ é que quanto maior os IDSs, menor é a concentração de matéria orgânica na massa de RSU. Segundo Kaza *et al* (2018 p. 29), a composição dos resíduos varia consideravelmente segundo aspectos econômicos, onde a concentração de matéria orgânica diminui à medida que o nível econômico cresce. A AP-1, que possui características de uso do solo um pouco diferenciadas das demais APs por ser importante eixo empresarial do MRJ, apresenta o terceiro maior IDS municipal, ao mesmo tempo que possui e terceira menor concentração de matéria orgânica.

Em uma análise comparativa com a RMRJ e com o indicador nacional, é possível observar que a composição gravimétrica do RSU das APs do MRJ está em patamar próximo das médias nacional e regional, a seguir apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Gravimetria média das APs do MRJ em relação às médias metropolitana e nacional



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Os dados apresentados demonstram uma variação nas características dos resíduos dentro das APs e em relação às médias nacional e regional. Considerando-se a RMRJ, as APs possuem características semelhantes, dentro de uma variação que incorpora as características de cada local. Ampliando-se a avaliação, é possível verificar que a média nacional de matéria orgânica na composição do RSU (45,3%) é inferior às APs do MRJ, onde outras capitais nacionais apresentam dados semelhantes à média nacional como Manaus (45,2%) e Brasília (48,3%). Já a cidade de São Paulo apresenta uma média semelhante à da RMRJ e das APs (51,2%), e no outro extremo Porto Alegre apresenta uma média superior a todas apresentadas (61,4%). Tais

resultados demonstram que a composição gravimétrica do RSU varia de região para região, com base, onde as características populacionais e os hábitos de consumo são aspectos contribuintes para essa variação (Claudionor Silva *et al*, 2021).

4.2 MODELAGEM DE ROTAS TECNOLÓGICAS

A modelagem de rotas tecnológicas, à luz das características do RSU gerado no MRJ, tem como objetivo buscar o aproveitamento econômico dos materiais e alcançar as metas estabelecidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c), conforme apresentado no Capítulo 3.5. Tal objetivo só pode ser alcançado por meio da compreensão do funcionamento do fluxo dos resíduos, desde a sua geração até seu destino final (Farias, 2018 p.57) e da aplicação de métodos diferenciados e associados entre si, potencializando-se rotas já existentes e implementando outras novas, com o objetivo da maximização da recuperação de materiais e do seu aproveitamento econômico, levando aos aterros sanitários apenas os rejeitos do RSU após esgotadas todas as possibilidades do seu aproveitamento, assim preconizado pela PNRS (Brasil, 2010). Nesse contexto, a identificação de rotas tecnológicas torna mais simples o planejamento do sistema e a montagem de estratégias para fins decisórios (Pimental *et al*, 2019).

4.2.1 Aspectos gerais da modelagem

A metodologia aplicada no presente estudo considera a modelagem das rotas tecnológicas de forma individual em cada AP, cuja integração dos resultados das modelagens das APs conflui para a composição de um resultado geral de todo o MRJ. A ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) traz as opções de triagem manual de seletivos, triagem mecanizada de seletivos, triagem mecanizada de mistos, produção de CDR, biodigestão anaeróbia, compostagem e incineração (com aproveitamento energético) como as rotas tecnológicas a serem exploradas nas modelagens de cada AP e em suas diferentes características como população, geração *per capita* e gravimetria. Os resultados gerais das modelagens de rotas tecnológicas de todo o MRJ podem ser observados na Tabela 30.

Tabela 30 – Resultados da modelagem de rotas tecnológicas para o MRJ – Cenários Base, 1 (2032) e 2 (2040)

Aps	Cenários	Ano	Recuperação de Materiais	Evaporação		Aterro Sanitário	Total
				Perdas Atmosféricas	Tratamento Térmico (geração de e.e.)		
1	Base	2024	5,85 t/d	0,94 t/d	0,00 t/d	373,54 t/d	380,34 t/d
			1,54%	0,25%	0,00%	98,21%	100,0%
	1 (Planares)	2032	99,52 t/d	44,37 t/d	44,40 t/d	179,00 t/d	367,29 t/d
			27,10%	12,08%	12,09%	48,74%	100,0%
	2 (Planares)	2040	155,51 t/d	70,78 t/d	80,16 t/d	47,75 t/d	354,20 t/d
			43,91%	19,98%	22,63%	13,48%	100,0%
2	Base	2024	12,54 t/d	1,95 t/d	0,00 t/d	795,68 t/d	810,17 t/d
			1,55%	0,24%	0,00%	98,21%	100,0%
	1 (Planares)	2032	202,65 t/d	88,40 t/d	89,65 t/d	355,88 t/d	736,57 t/d
			27,51%	12,00%	12,17%	48,32%	100,0%
	2 (Planares)	2040	291,44 t/d	132,76 t/d	149,91 t/d	88,67 t/d	662,78 t/d
			43,97%	20,03%	22,62%	13,38%	100,0%
3	Base	2024	37,00 t/d	6,21 t/d	0,00 t/d	2.365,01 t/d	2.408,22 t/d
			1,54%	0,26%	0,00%	98,21%	100,0%
	1 (Planares)	2032	582,93 t/d	259,93 t/d	263,31 t/d	1.058,94 t/d	2.165,11 t/d
			26,92%	12,01%	12,16%	48,91%	100,0%
	2 (Planares)	2040	846,33 t/d	433,54 t/d	442,13 t/d	1.99,37 t/d	1.921,37 t/d
			44,05%	22,56%	23,01%	10,38%	100,0%
4	Base	2024	19,16 t/d	3,05 t/d	0,00 t/d	1.218,54 t/d	1.240,75 t/d
			1,54%	0,25%	0,00%	98,21%	100,0%
	1 (Planares)	2032	377,90 t/d	165,29 t/d	166,82 t/d	673,47 t/d	1.383,48 t/d
			27,32%	11,95%	12,06%	48,68%	100,0%
	2 (Planares)	2040	670,92 t/d	345,51 t/d	351,03 t/d	159,12 t/d	1.526,58 t/d
			43,95%	22,63%	22,99%	10,42%	100,0%
5	Base	2024	29,34 t/d	5,14 t/d	0,00 t/d	1.884,40 t/d	1.918,88 t/d
			1,53%	0,27%	0,00%	98,20%	100,0%
	1 (Planares)	2032	543,07 t/d	242,38 t/d	243,50 t/d	983,38 t/d	2.012,33 t/d
			26,99%	12,04%	12,10%	48,87%	100,0%
	2 (Planares)	2040	925,15 t/d	477,11 t/d	485,35 t/d	218,42 t/d	2.106,02 t/d
			43,93%	22,65%	23,05%	10,37%	100,0%

Nota: a ferramenta ProteGEEr considera a Evaporação como o somatório entre perdas atmosféricas (desidratação dos resíduos durante a compostagem) e incineração.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

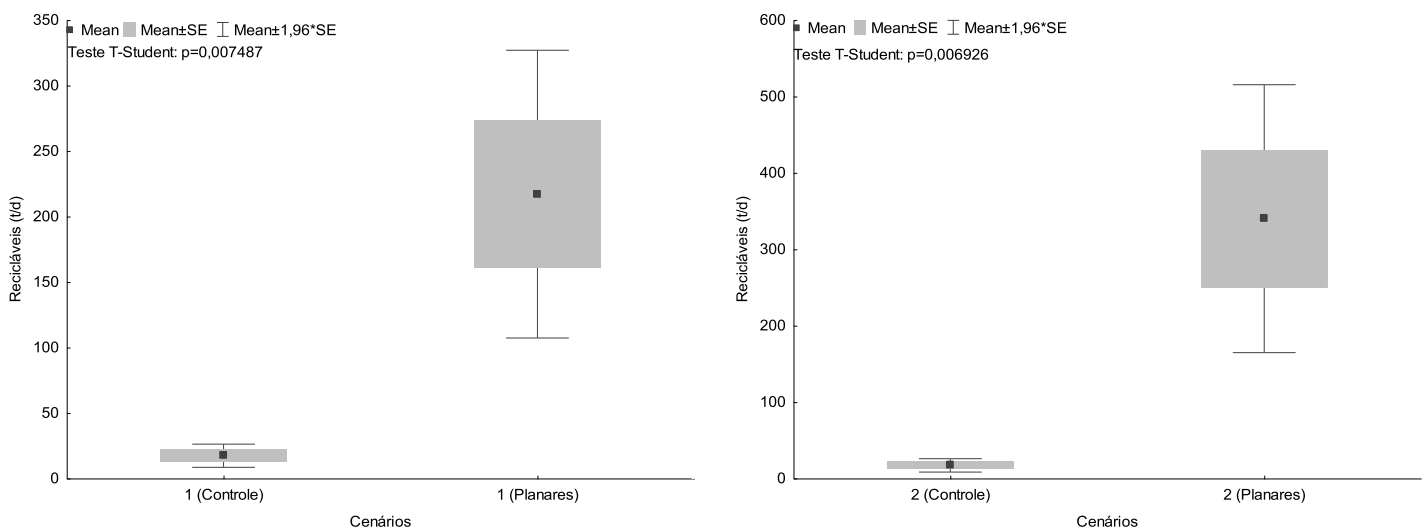
A Tabela 30 configura-se em uma base de dados com potencial de apoio ao planejamento de um novo sistema, direcionado à busca do atendimento das metas de recuperação e aproveitamento de materiais do PLANARES (Brasil, 2022c). Essa base de dados foi submetida a tratamento estatístico para avaliação da sua consistência. Essas análises foram feitas para 2 situações:

- Situação 1 - avaliação da consistência dos dados referentes aos Cenários 1 (2032) e 2 (2040) em comparação aos seus respectivos Cenários Controle nos grupos recicláveis, orgânicos e tratamento térmico (geração de e.e.); e
- Situação 2 - avaliação da consistência dos dados referentes à análise dos Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) nos grupos recicláveis, orgânicos e tratamento térmico (geração de e.e.) e aterro sanitário.

Para a Situação 1 foi aplicado o Teste de Aderência à Normalidade de Shapiro-Wilk, comparando-se os Cenários Controle aos Cenários 1 (2032) e 2 (2040), nos grupos Recicláveis, Orgânicos e Tratamento Térmico. Os resultados do teste indicaram aderência à distribuição normal para os 3 grupos analisados ($p\text{-valor} > 0,05$), com índice de confiança de 95%.

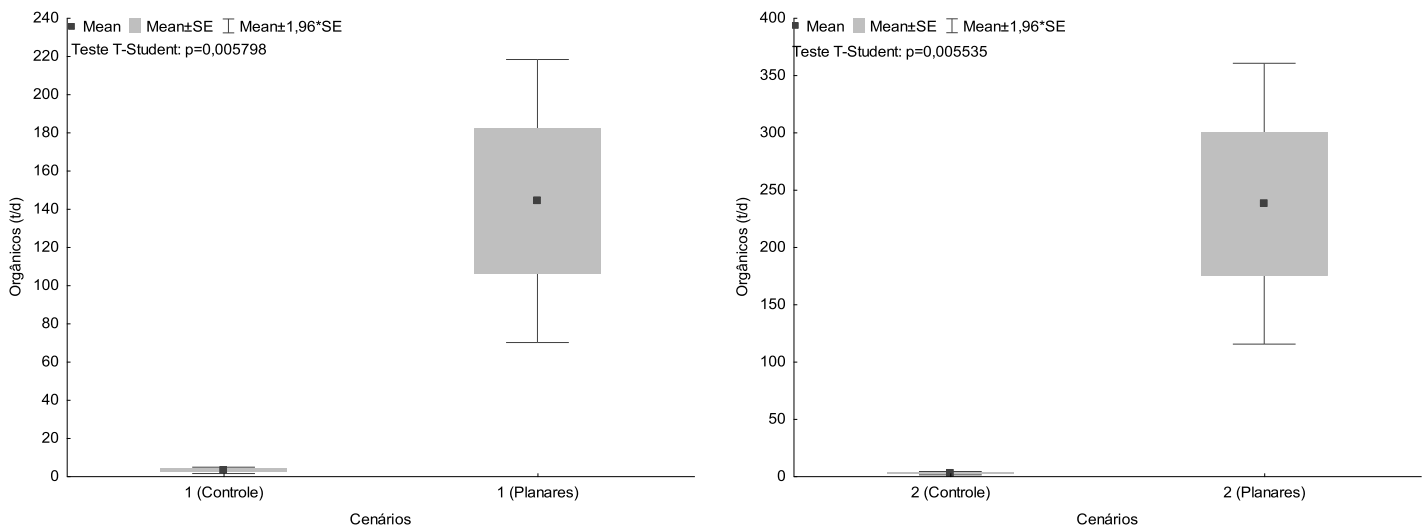
Como os resultados de $p\text{-valor}$ indicaram aderência à normalidade ($p\text{-valor} > 0,05$), procedeu-se com o teste de hipótese T de *Student*, cujo objetivo foi identificar diferenças significativas entre os Cenários Controle e os Cenários 1 (2032) e 2 (2040), onde um $p\text{-valor} > 0,05$ indica que as médias dos resultados não apresentam diferenças significativas, e um $p\text{-valor} < 0,05$ indica diferenças significativas, a um índice de confiança de 95%. As figuras seguintes apresentam os gráficos resultantes do teste de hipóteses dos Cenários Controle em relação aos Cenários 1 (2032) e 2 (2040), nos grupos Recicláveis, Orgânicos e Tratamento Térmico.

Figura 9 – *Boxplot* comparativo entre o Cenário Controle e os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) – grupo recicláveis



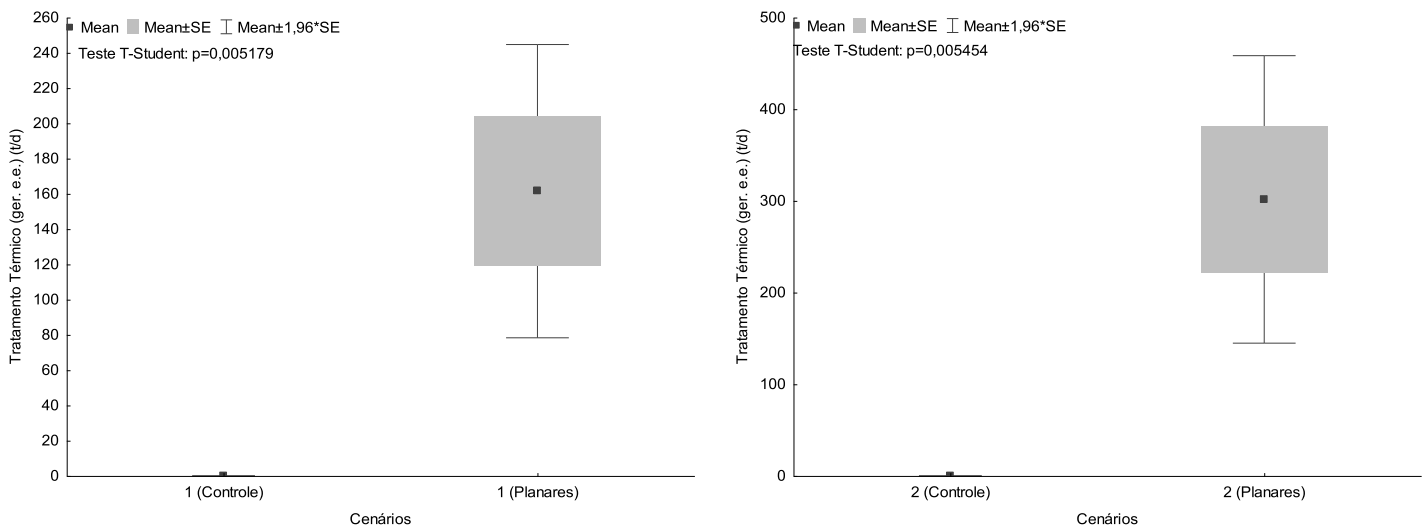
Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 10 – *Boxplot* comparativo entre o Cenário Controle e os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) – grupo orgânicos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 11 – *Boxplot* comparativo entre o Cenário Controle e os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) – tratamento térmico (geração de e.e.)



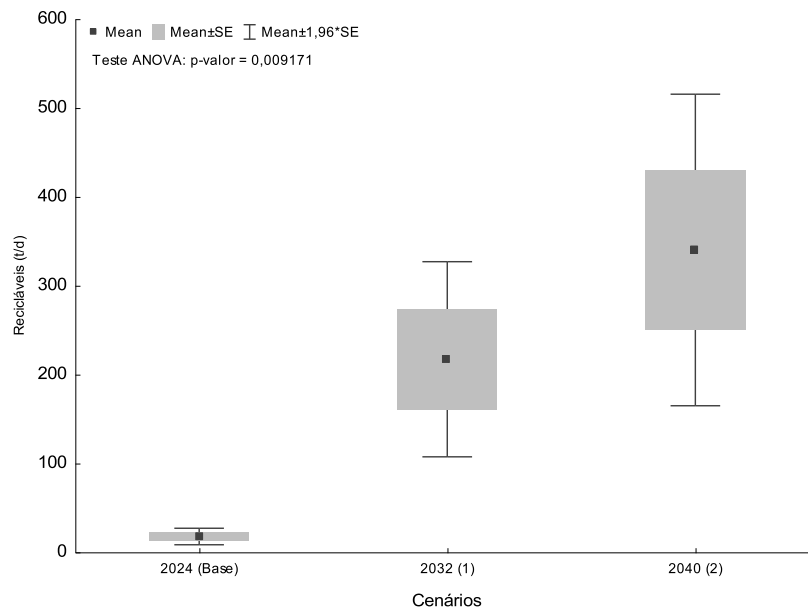
Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Os Cenários Controle apresentam um contraponto à análise, onde a progressão demográfica do MRJ para cenários futuros, aplicando-se os mesmos indicadores atuais de recuperação de materiais, demonstram o quantitativo de materiais que o MRJ tende a deixar de recuperar nos próximos anos caso não sejam adotadas rotas tecnológicas de aproveitamento com o propósito de se buscar as metas nacionais. Em última análise, a diferença verificada nas figuras anteriores representa o quantitativo diário de material que o MRJ continuará

encaminhando para o Aterro Sanitário de Seropédica nos anos de 2032 e 2040, marcos do PLANARES (Brasil, 2022c) para recuperação de materiais.

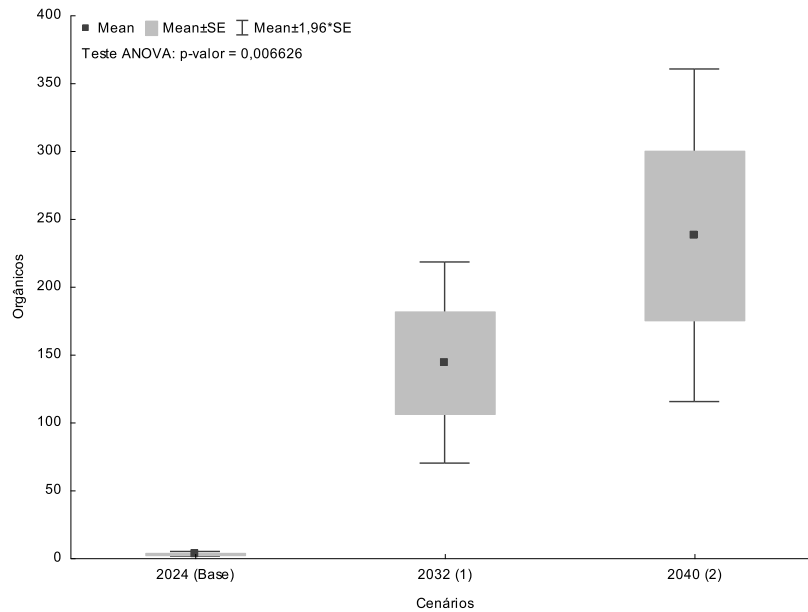
Para a Situação 2 também procede-se com o tratamento estatístico dos resultados gerais da modelagem de Rotas Tecnológicas para os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040), com o propósito de se verificar a consistência dos dados na evolução entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040), nos grupos recicláveis, orgânicos, tratamento térmico e aterro sanitário. Após avaliada e confirmada a aderência à distribuição normal para os grupos analisados, por meio teste de aderência à normalidade de Shapiro-Wilk ($p\text{-valor} > 0,05$ a um índice de confiança de 95%), procede-se com o teste paramétrico de comparação múltipla por análise de variância (ANOVA), com o objetivo de se verificar variações significativas nos resultados obtidos para cada cenário. Da mesma forma, um $p\text{-valor} > 0,05$ indica que as médias dos resultados não possuem diferenças significativas, e um $p\text{-valor} < 0,05$ indica diferenças significativas entre os cenários, a um índice de confiança de 95%. As figuras seguintes ilustram a evolução na recuperação de materiais com a adoção das rotas tecnológicas modeladas pela ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b).

Figura 12 – *Boxplot* comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – grupo recicláveis



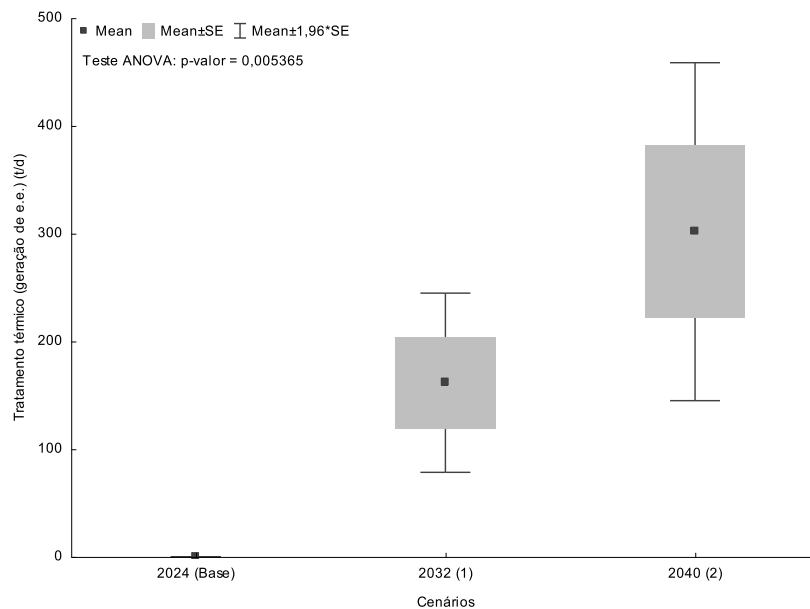
Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 13 – *Boxplot* comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – grupo orgânicos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 14 – *Boxplot* comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – tratamento térmico (geração de e.e.)

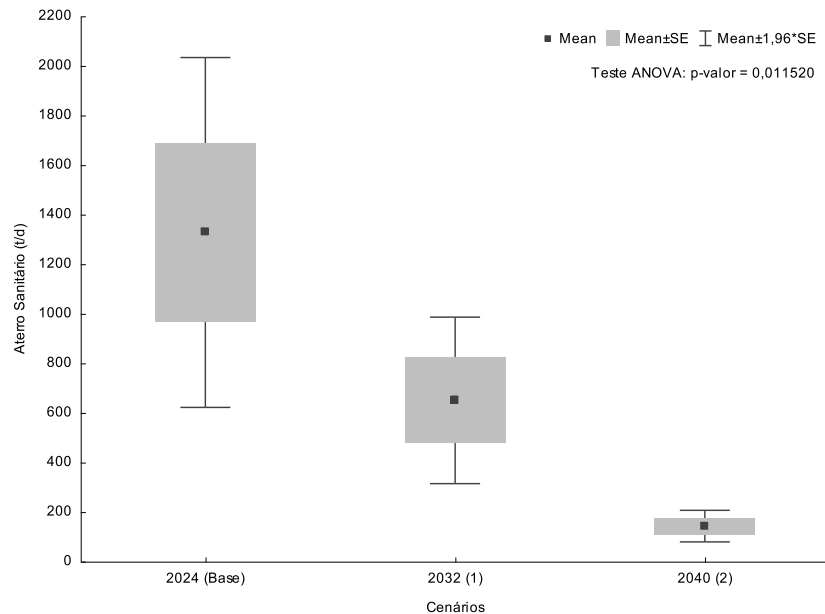


Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Conforme observado, todos os grupos analisados apresentaram um p-valor $< 0,05$, indicando uma variância significativa nas médias dos valores dos materiais recuperados. Com esse resultado, é possível afirmar que a modelagem de rotas tecnológicas indica a necessidade

de aumentos significativos no desvio de materiais para o seu aproveitamento, no sentido do alcance das metas nacionais e com conseqüente redução no aporte de RSU no Aterro Sanitário de Seropédica. A Figura 15 apresenta, em sentido contrário aos anteriores, o resultado quanto à disposição de RSU no Aterro Sanitário de Seropédica quando adotadas as rotas tecnológicas modeladas, também com um p-valor $< 0,05$ a um índice de confiança de 95%, que indica variações significativas na redução do aporte de RSU com a adoção das rotas tecnológicas modeladas.

Figura 15 – *Boxplot* comparativo entre os Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040) – disposição final de RSU no aterro sanitário

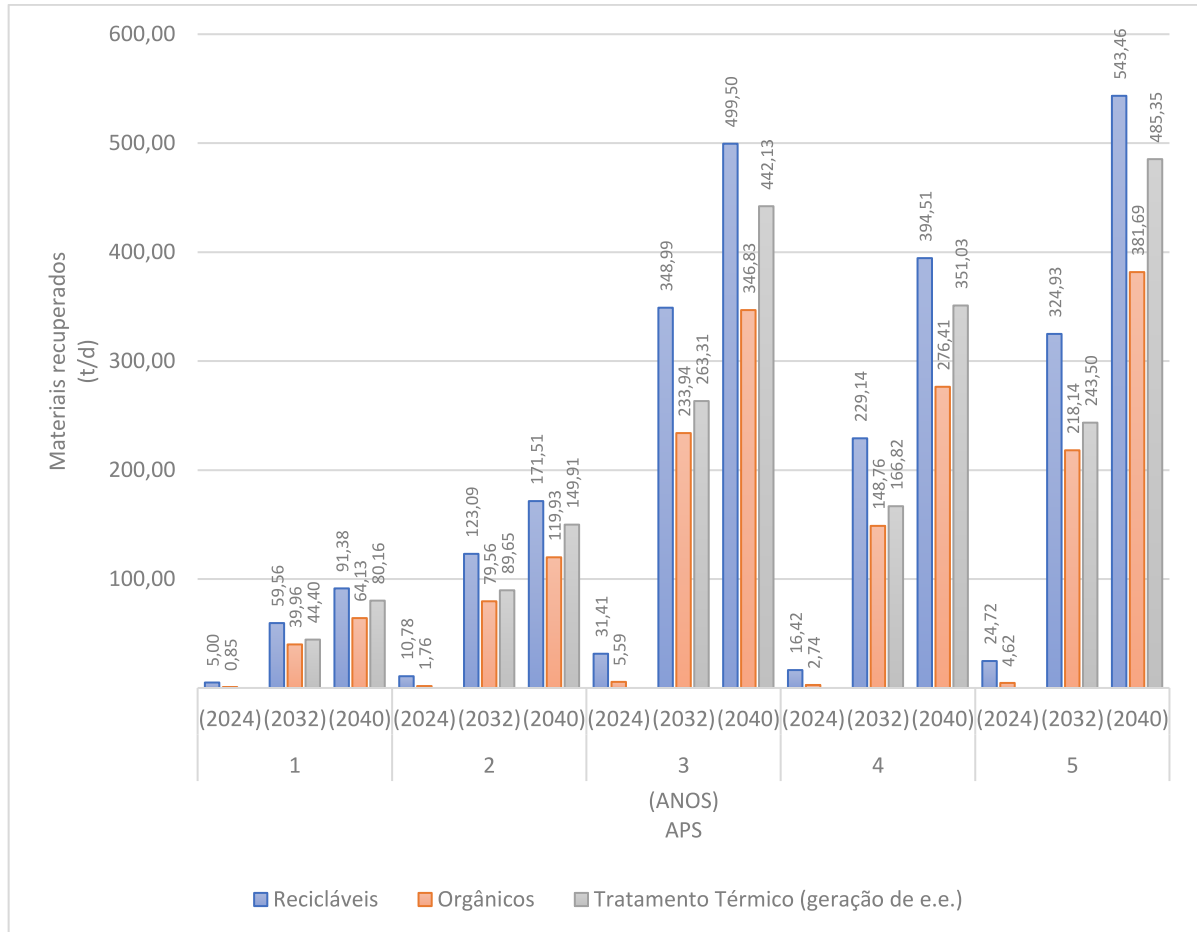


Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Os resultados anteriormente apresentados demonstram a importância da composição de uma base de dados com os resultados das modelagens de rotas tecnológicas, no sentido da busca pelo entendimento do comportamento do MRJ nos diferentes cenários e em seu contraponto nos Cenários Controle. O tratamento estatístico dos dados dá credibilidade à informação, e apoia a utilização desses dados como base de apoio para o planejamento de um sistema de limpeza urbana (Souza Farias, 2018) com objetivo de buscar as metas de recuperação do PLANARES (Brasil, 2022c). Entretanto, a base de dados não se limita apenas ao MRJ, onde cada AP modelada possui suas características específicas e que impõem necessidades diferenciadas de planejamento em um contexto amplo de sistema de limpeza urbana. A Figura

16 apresenta a evolução no aproveitamento de materiais nos Cenários Base (2024), 1 (2032) e 2 (2040).

Figura 16 – Evolução temporal do aproveitamento de materiais segundo Cenários Base (2024) e Futuros (2032 e 2040) e APs



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

As APs 3, 4 e 5 apresentam os maiores resultados quantitativos no que se refere ao aproveitamento de materiais. Tais resultados refletem as características de geração dessas APs, que juntas produzem 82,4% do total de RSU do MRJ no ano de 2024. A AP-3 apresenta a maior população do MRJ nesse mesmo ano, e o segundo maior índice de geração *per capita* de RSU. Entretanto, considerando a projeção populacional apresentada na Tabela 27, a AP-5 terá o maior contingente populacional do MRJ no ano de 2040, levando a uma maior geração de RSU e consequente maior aproveitamento de materiais.

Outro aspecto importante, ora apresentado na Figura 16, é a recuperação dos diferentes tipos de materiais. As metas estabelecidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c) determinam, em

última análise, a ordem de prioridade de aproveitamento de materiais para o planejamento das rotas tecnológicas, sendo: recuperação de materiais recicláveis, aproveitamento energético por meio de tratamento térmico e recuperação da matéria orgânica.

Recuperar materiais recicláveis é crucial porque reduz a necessidade de extrair e processar novas matérias primas, economizando energia e diminuindo a poluição associada à produção de novos produtos, onde tais materiais, quando separados na fonte geradora e/ou por processos de triagem, são reintroduzidos na cadeia produtiva, promovendo a sua efetiva reciclagem (Brasil, 2022c). A reciclagem por meio do aproveitamento dos materiais recicláveis segue na linha da sustentabilidade socioambiental, cujos impactos positivos vão desde a otimização no uso de recursos naturais até a movimentação do mercado de catadores e catadoras de materiais recicláveis, potencializando as ações de Logística Reversa previstas na PNRS (Krauczuk, 2010).

Na sequência das metas de aproveitamento de materiais, o aproveitamento energético por meio do tratamento térmico, abre a oportunidade para a recuperação do RSU segundo diferentes métodos que transformam o poder calorífico do RSU em energia, resultando, ao final, rejeitos para disposição final em aterro sanitário. No Brasil, a PNRS (Brasil, 2010) abre caminho para o aproveitamento energético do RSU, dando origem à Portaria Interministerial MMA/MME/MDR nº 274/2019, que disciplina a recuperação energética do RSU no Brasil e estabelece as bases e diretrizes operacionais para o aproveitamento energético de tais materiais.

Posteriormente, as Portarias MME nº 435/2020 e nº 480/2021 definem os critérios para a inclusão da recuperação energética do RSU, como uma fonte específica, nos leilões de compra de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração, tendo por objetivo suprir o crescimento do mercado das distribuidoras a partir de 2026 e com previsão de suprimento variando entre 15 e 25 anos (Brasil, 2022c). Entretanto, as diretrizes nacionais não estabelecem quais tecnologias devem ser aplicadas na recuperação energética do RSU, onde tecnologias conhecidas como a incineração, o plasma, a pirólise e a gaseificação são opções a serem exploradas nesse segmento (Prates; Pimenta; Ribeiro, 2019), cada qual com as suas características, a seguir apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Exemplos de métodos de tratamento térmico de RSU

Métodos de Tratamento Térmico	Benefícios	Dificuldades
Incineração	Maior geração de energia;	Maior potencial de geração de dioxinas e furanos;
	Grande redução de massa e volume dos resíduos.	Maior complexidade de tratamento de gases.
Plasma	Grande redução de massa e volume.	Maior complexidade de implantação e operação;
		Alto consumo de energia;
		Aplicável somente em larga escala.
Pirólise	Produção de produto carbonizado combustível.	Operação em batelada;
		Consumo de combustível auxiliar para manutenção da temperatura.
Gaseificação	Produção de gás combustível;	Maior custo de implantação e operação;
	Permite tratamento de resíduos industriais;	Maior ação de processos corrosivos no equipamento.
	Não requer combustíveis auxiliares.	

Fonte: Prates; Pimenta; Ribeiro, 2019

Na mesma linha, recuperar materiais orgânicos, por sua vez, é essencial para a redução de resíduos em aterros e a diminuição da produção de GEE (Alves de Souza *et al*, 2020). Conforme apresentado na Tabela 29, o MRJ possui concentração de matéria orgânica que varia entre 49,66% (AP-4) e 55,02% (AP-5), sendo a fração com maior concentração na massa de RSU. Sua recuperação pode se dar por diferentes métodos, onde a compostagem e a digestão anaeróbia são métodos já aplicados no Brasil, cujas características podem ser observadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Exemplos de métodos de recuperação de matéria orgânica

(continua)

Métodos de Recuperação de Matéria Orgânica	Benefícios	Dificuldades
Compostagem	conversão dos resíduos orgânicos em composto com possibilidade de aplicações diversas;	podem causar mau cheiro e proliferação de insetos e roedores;
	tecnologia simples e comprovada;	necessidade de triagem dos RSU;
	aplicável em diversas escalas.	necessidade de mercado para comercializar composto.

(conclusão)

Métodos de Recuperação de Matéria Orgânica	Benefícios	Dificuldades
Digestão anaeróbia	conversão dos resíduos orgânicos em composto e biogás para fonte energética;	sensível a composição heterogênea RSU;
	possibilidade de venda de créditos de carbono.	quantidade de biogás variável.

Fonte: Prates; Pimenta; Ribeiro, 2019

Diante das possibilidades de tratamento térmico e de recuperação de matéria orgânica, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) traz o tratamento térmico por meio da incineração, a produção de Combustível Derivado do Resíduo (CDR), a incineração, a digestão anaeróbia e o aproveitamento de biogás em aterro sanitário como alternativas de geração de energia elétrica, apresentando o total, em kWh/d, de energia gerada em cada cenário modelado de cada AP do MRJ. As modelagens indicaram que o quantitativo de energia elétrica gerada apenas por meio da incineração é de grande relevância, onde apenas a AP-1 possui potencial para geração de energia elétrica para alimentar pouco mais de 4.700 residências no Cenário 1 (2032) e aproximadamente 6.000 no Cenário 2 (2040), conforme apresentado no tópico 4.2.2.1.

Outro aspecto importante de análise é a disposição final em aterro sanitário. Quando comparados os resultados dos Cenários Futuros e seus respectivos Cenários Controle (Tabela 30), é possível observar o quantitativo de RSU que deixa de ser encaminhado para o Aterro Sanitário de Seropédica, promovendo dois impactos principais: emissões evitadas de (GEE) e aumento da vida útil do aterro sanitário.

O arcabouço normativo brasileiro de referência já preconiza que apenas os rejeitos, após esgotadas todas as possibilidades de seu aproveitamento, devem seguir para disposição final nos aterros sanitários (Brasil, 2010). Quando encaminha-se o RSU para aterros sanitários sem aproveitamento de materiais, permite-se que essa massa de RSU, com elevadas concentrações de matéria orgânica, produza metano (CH₄) por degradação anaeróbia após seu aterramento. O CH₄ é um GEE cujo Potencial de Aquecimento Global³ é mais de 80 vezes superior ao dióxido de carbono (CO₂) durante os 20 anos que se seguem à sua liberação na atmosfera, sendo responsável por mais de 25% do aquecimento global enfrentado pela humanidade (ONU, 2024).

³ Um índice que mede o *forçamento radiativo* após a emissão de uma unidade de massa de uma determinada substância, acumulada em um horizonte de tempo selecionado, em relação a substância de referência, o dióxido de carbono (CO₂). O GWP representa, portanto, o efeito combinado dos diferentes tempos em que essas substâncias permanecem na *atmosfera* e sua eficácia em causar forçamento radiativo.

Nesse aspecto, a modelagem de rotas tecnológicas para o MRJ indica as emissões líquidas de GEE de cada rota em cada cenário modelado, onde os resultados, consubstanciados em um balanço de emissões evitadas, demonstram que o aproveitamento dos materiais da massa de RSU reduz consideravelmente o volume de emissões de GEE quando comparado aos Cenários Controle. Como exemplo, a modelagem de rotas tecnológicas na AP-5 indica um volume anual de emissões evitadas (em tCO_{2eq}) equivalentes a uma frota de 409 mil veículos circulando no ano de 2032, e pouco mais de 540 mil veículos no de 2040, assim apresentado no tópico 4.2.2.2.

Considerando-se que o Brasil, a despeito de suas regulamentações, também é signatário do Acordo de Paris, encaminhar RSU sem tratamento prévio para aterros sanitários segue na contramão das metas climáticas estabelecidas pelo acordo (Cavalcanti de Carvalho; Pertel; Vasques Pacheco, 2023), em um momento em que “*É inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra.*”, criando extremos climáticos e meteorológicos em todas as regiões do mundo (IPCC, 2023 p.21).

Quanto à vida útil do aterro sanitário, um dos aspectos que interfere nessa vida útil é o peso específico do resíduo. No caso do RSU, materiais com menor peso específico, como o plástico, tendem a ocupar mais os espaços, mesmo que compactados. Associado ao fato desses materiais serem de degradação lenta, exercem impacto representativo na redução da vida útil dos aterros sanitários (Gurjão; De Araujo Neto; De Paiva, 2020). Em um cenário nacional onde os aterros controlados e lixões são proibidos e o licenciamento ambiental de novos aterros guarda complexidade legal em função da necessidade de elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) (Pinhotti Aguiar, 2019), a adoção de rotas tecnológica para o desvio de materiais para fins do seu aproveitamento torna-se quase mandatório nesse contexto.

Para fins de demonstração da modelagem de rotas tecnológicas de forma mais específica, o tópico 4.2.2 apresenta os resultados da ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b), para as APs 1 e 5 do MRJ, selecionadas segundo critérios relacionados ao porte populacional, geração de RSU e seus IDSs.

4.2.2 Aspectos específicos da modelagem (APs 1 e 5)

As APs 1 e 5 guardam diferentes características territoriais, porte, geração de RSU, dinâmicas populacionais e IDSs. Tais características direcionam essas APs para os extremos do sistema de limpeza urbana do MRJ como as APs com menor e maior geração de RSU nos

cenários futuros de modelagem. Diante desses aspectos, faz-se uma análise mais específica da modelagem das rotas tecnológicas empreendidas para essas APs.

4.2.2.1 Rotas Tecnológicas AP-1

A AP-1 se refere à área central do MRJ. É composta por 16 (~~dezesesseis~~) bairros, possui uma área territorial de 34,39 km² (2,86% do território do MRJ), uma população de 279.662 pessoas (4,5% da população do MRJ) no cenário base (2024) e densidade populacional de 8.131 hab/km². Sua dinâmica populacional segue a tendência municipal, onde estima-se decréscimo para os cenários futuros. É uma área de uso do solo consolidado, constituindo-se por zonas residenciais, eixos culturais e gastronômicos bem definidos, além de exercer o arco de centralidade empresarial do MRJ. É um polo de atração de mão de obra, do próprio MRJ e de outros municípios da RMRJ, detendo 37% dos postos de trabalho do MRJ (PCRJ, 2018b). No ano de 2024 sua geração de RSU é de 380,34 t/d, ou 5,6% do total de RSU gerado no município, com uma geração per capita de 1,36 kg/hab.dia, sendo a maior do MRJ.

Em um primeiro aspecto de modelagem, com base nas informações de população, geração estimada de RSU e composição gravimétrica, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) indica os quantitativos de materiais a serem recolhidos nas diferentes modalidades de coleta (para atendimento às metas do PLANARES (Brasil, 2022c)), especificamente coleta seletiva de recicláveis e orgânicos e coleta convencional de mistos/rejeitos, cujos resultados podem ser observados na Tabela 31.

Tabela 31 – Quantitativo de materiais a serem coletados segundo tipo de coleta para AP-1 – Cenários 1 e 2

Tipos de Coleta	Cenário 1 2032		Cenário 2 2040	
	%	t/d	%	t/d
coleta seletiva de recicláveis	18,1	66,48	40,0	141,68
coleta seletiva de orgânicos	11,0	40,40	22,0	77,75
coleta de mistos/rejeitos	70,9	260,41	38,1	134,77
Total de RSU a ser gerido	100,0	367,29	100,0	354,20

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Com base na gravimetria específica da AP-1 e nos tipos de coleta a serem executadas, a ferramenta calcula os quantitativos de materiais e demais resíduos disponíveis para

aproveitamento, organizando-os segundo seus grupos principais (orgânicos, recicláveis, e rejeitos/mistos) e direcionando-os para as seguintes rotas tecnológicas:

- Triagem manual de seletivos;
- Triagem mecanizada de seletivos;
- Triagem mecanizada de mistos;
- Compostagem; e
- Tratamento térmico por incineração.

A Tabela 32 e a Tabela 33 apresentam um resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-1 para cenários futuros, segundo o tipo de coleta.

Tabela 32 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-1, segundo o tipo de coleta – Cenário 1 (2032)

Tipo de coleta	Orgânicos (t/d)		Recicláveis (t/d)						Rejeitos/mistos (t/d)		Total (t/d)
	Alimentos	Verdes	Papel e papelão	Plástico		Vidro	Metais		Combustíveis	Não combustíveis	
				Filme	Rígido		Ferrosos	Não ferrosos			
Seletiva de recicláveis	-	-	28,78	21,22	7,84	5,56	2,07	1,00	-	-	66,48
Seletiva de orgânicos	39,76	0,65	-	-	-	-	-	-	-	-	40,40
Mistos	150,21	2,44	36,59	26,97	9,97	7,07	2,63	1,27	15,24	8,01	260,41
Total	189,96	3,09	65,38	48,19	17,81	12,63	4,70	2,28	15,24	8,01	367,29

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Tabela 33 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-1, segundo o tipo de coleta – Cenário 2 (2040)

Tipo de coleta	Orgânicos (t/d)		Recicláveis (t/d)						Rejeitos/mistos (t/d)		Total (t/d)
	Alimentos	Verdes	Papel e papelão	Plástico		Vidro	Metais		Combustíveis	Não combustíveis	
				Filme	Rígido		Ferrosos	Não ferrosos			
Seletiva de recicláveis	-	-	61,35	45,22	16,71	11,86	4,41	2,14	-	-	141,68
Seletiva de orgânicos	76,50	1,24	-	-	-	-	-	-	-	-	77,75
Mistos	106,69	1,73	1,70	1,25	0,46	0,33	0,12	0,06	14,70	7,72	134,77
Total	183,19	2,98	63,05	46,47	17,18	12,18	4,53	2,20	14,70	7,72	354,20

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Como resultado, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) apresenta uma síntese dos totais de materiais recuperados nas diferentes rotas tecnológicas de aproveitamento, indicando as parcelas encaminhadas para reciclagem, compostagem e tratamento térmico (em

conformidade com as metas de recuperação do PLANARES (Brasil, 2022c)), bem como as perdas atmosféricas por desidratação na compostagem e o total de rejeitos encaminhados para o Aterro Sanitário de Seropédica. A Tabela 34 apresenta os resultados da modelagem da AP-1 nos Cenários Base (2024), Futuros 1 e 2 (2032 e 2040) e Controle.

Tabela 34 – Resultado da modelagem de rotas tecnológicas da AP-1 – Cenários Base, 1, 2 e Controle

Cenários	Ano	Materiais Recuperados (t/d)		Evaporação (t/d)		Aterro Sanitário (t/d)	Total (t/d)
		Recicláveis	Orgânicos	Tratamento térmico (geração de e.e.)	Perdas Atmosféricas		
Base	2024	5,00	0,85	0,00	0,94	373,54	380,34
1 (Planares)	2032	59,56	39,96	44,37	44,40	179,00	367,29
<i>1 (Controle)</i>	<i>2032</i>	<i>4,83</i>	<i>0,82</i>	<i>0,00</i>	<i>0,91</i>	<i>360,73</i>	<i>367,29</i>
2 (Planares)	2040	91,38	64,13	70,78	80,16	47,75	354,20
<i>2 (Controle)</i>	<i>2040</i>	<i>4,66</i>	<i>0,70</i>	<i>0,00</i>	<i>0,88</i>	<i>354,20</i>	<i>354,20</i>

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Em relação à geração de energia elétrica por incineração, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) apresenta resultados, em kWh/dia referente à massa de RSU desviada para essa rota específica, onde predomina a incineração de rejeitos dos processos de triagem, estes com elevado poder calorífico inferior. Os resultados referentes ao quantitativo de geração de energia elétrica podem ser observado na Tabela 35.

Tabela 35 – Geração de energia elétrica equivalente na AP-1 segundos Cenários Futuros

Cenários	Ano	Tratamento térmico (geração de e.e.) (t/d)	Energia elétrica (kWh/dia)	Energia elétrica (kWh/mês)	Residências equivalentes (un/dia)*
1 (Planares)	2032	44,37	31.642,2	949.266	4.746
2 (Planares)	2040	70,78	40.783,5	1.223.505	6.118

Nota: * considera-se o consumo médio de 200 kWh/mês por residência (Abrahão; Souza, 2021)

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Quanto ao balanço de emissões de GEE, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) calcula as emissões líquidas de cada rota tecnológica modelada para os Cenários Futuros de atendimento às metas do PLANARES (Brasil, 2022c). Considerando as emissões líquidas

calculadas na modelagem dos Cenários Controle, é possível fazer um balanço de emissões de GEE evitadas, cujos resultados podem ser observados na Tabela 36.

Tabela 36 – Balanço de emissões de GEE da AP-1

Anos	Emissões Líquidas		Emissões evitadas tCO _{2eq} /ano	Comparativos	
	Cenário Controle tCO _{2eq} /ano	Cenário Futuros (Planares) tCO _{2eq} /ano		Veículos equivalentes (un/ano)*	Voltas equivalentes na circunferência da terra (un/ano)**
2032	69.704	25.015	44.689	68.647	10.278
2040	67.220	-4.851	72.070	110.707	16.575

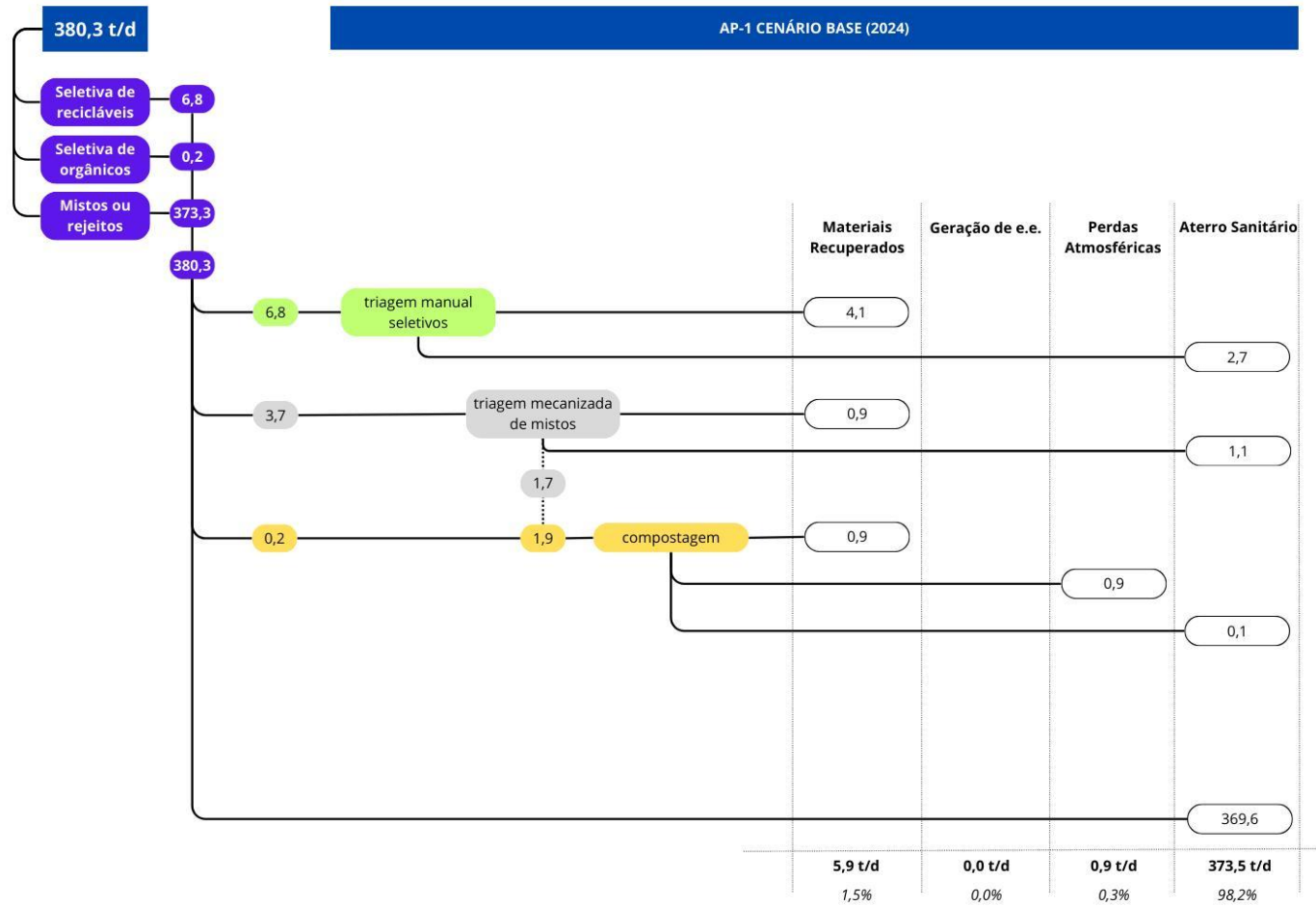
Notas: * Considerou-se um carro popular (1.0 L a 1.4 L) circulando 6.000 km/ano, com uma emissão de 0,651 tCO_{2eq}/ano (De Brito; Tavares, 2016);

** Atualmente considera-se que a circunferência maior da Terra possui 4.075 km de extensão aproximada (Bergamim *et al*, 2023)

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

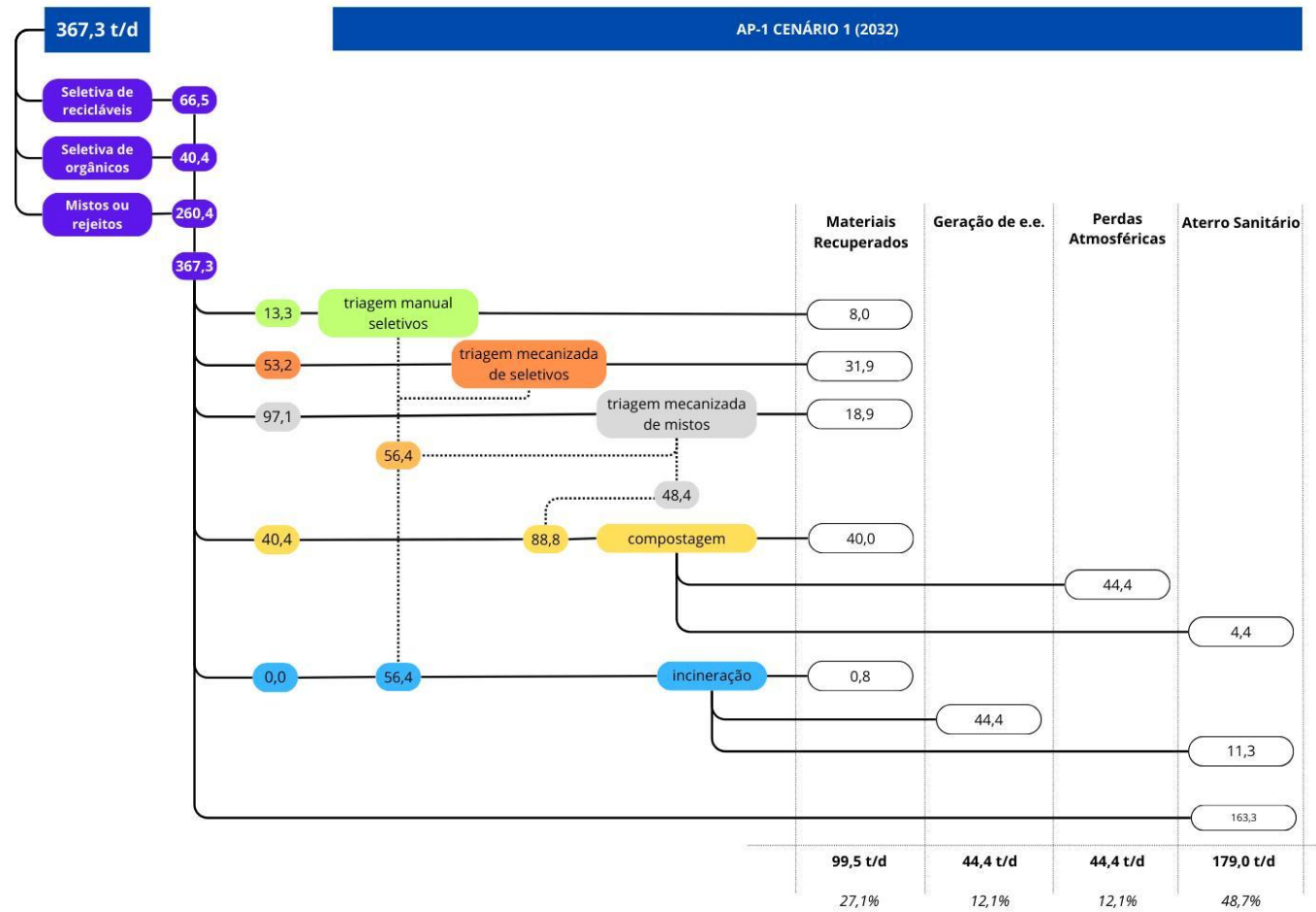
A ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) também apresenta o resultado das modelagens em forma de fluxos de massa das diferentes rotas tecnológicas, sintetizando o quantitativo de materiais em cada rota até a sua disposição final, conforme ilustrado nas figuras seguintes para as modelagens da AP-1 nos Cenários Base (2024) e Futuros 1 (2032) e 2 (2040).

Figura 17 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-1 – Cenário Base (2024)



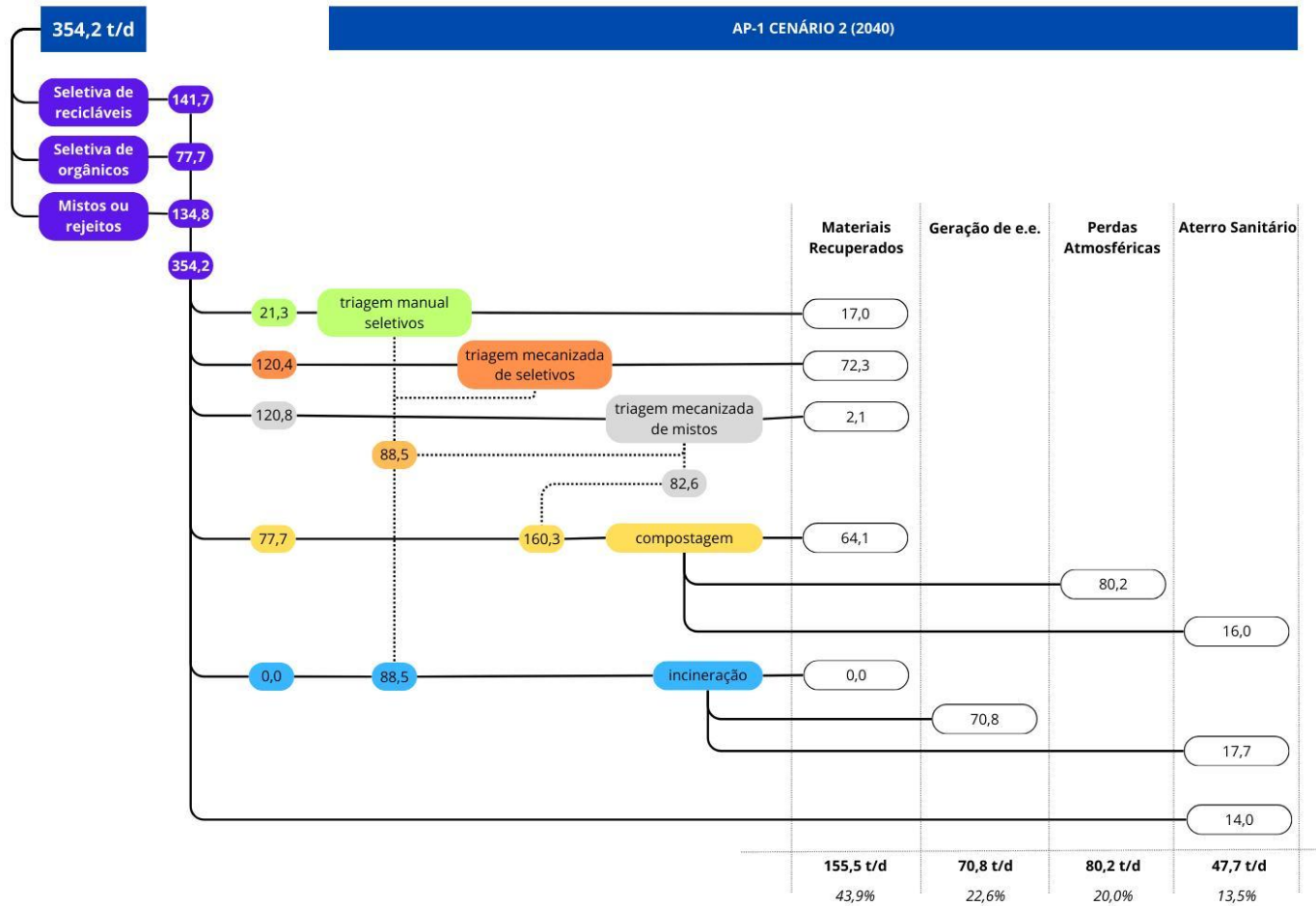
Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 18 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-1 – Cenário 1 (2032)



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 19 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-1 – Cenário 2 (2040)



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Os resultados ora apresentados indicam a necessidade de avanço do MRJ para que as metas de recuperação de materiais sejam alcançadas nos Cenários Futuros 1 e 2. Na modelagem da AP-1, as estratégias de coleta são o ponto inicial de planejamento, indicando o potencial de recuperação de materiais em cada modalidade de coleta que deseja-se implementar. Considerando que a AP-1 possui uma densidade populacional no ano base (2024) acima da média municipal⁴, é possível prever-se uma coleta seletiva mais eficiente (Souza Farias, 2018 p.57). Como a AP-1 possui uma gravimetria que indica 51,7% de concentração de orgânicos e 41,1% de concentração de materiais recicláveis em um tecido urbano já consolidado, é possível avançar em ações de coleta seletiva de recicláveis e orgânicos com maior intensidade, com maior capacidade relativa de recuperação de materiais, com resultados positivos para a etapa posterior de triagem de materiais, uma vez que processos de triagem de materiais são caros e o seu grau de sucesso se eleva consideravelmente quando os sistema de limpeza urbana adotam operações de coleta seletiva (Madeira; Botelho; Maria Vieira, 2020 p.24).

Nesse contexto, a modelagem indica que no Cenário 1 (2032) a coleta seletiva seja responsável pela recuperação de 29,1% de materiais (recicláveis e orgânicos), elevando-se esse valor para 62% no Cenário 2 (2040), onde os bolsões de gastronomia e turismo da AP-1 podem ser facilitadores da implementação de rotas diferenciadas de coleta. Tais materiais, quando colocados em rotas de aproveitamento, promovem uma redução considerável do aporte de RSU no Aterro Sanitário de Seropédica, reduzindo de 98% para 49% a massa de RSU encaminhada para o Aterro Sanitário de Seropédica no Cenário 1 (2032), e para 13% no Cenário 2 (2040), com impactos diretos nas emissões de GEE.

A despeito da retirada desses materiais do aterro sanitário promoverem impactos positivos sob o ponto de vista ambiental, social e econômico (Pimentel et al, 2020 p. 7076), a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) indica que as emissões evitadas de CO_{2eq} oriundas de um balanço que envolve menos aporte de resíduos no aterro sanitário e maior reciclagem de materiais é equivalente à remoção de milhares de veículos de passeio das ruas, demonstrando a importância que as rotas tecnológicas de aproveitamento do RSU possuem em um contexto onde as emissões globais de CH₄ em aterros sanitários representa a 3^a maior fonte de emissões (Malanconi; Cabral, 2012).

Por fim, a recuperação energética é uma das metas estabelecidas pelo Planares (Brasil, 2022c), onde a modelagem das rotas tecnológicas da AP-1 indicaram que o RSU a ser utilizado

⁴ A densidade populacional da AP-1 no ano base (2024) é de 8.131 hab/km². A densidade populacional do MRJ no mesmo ano é de 5.142 hab/km².

no tratamento térmico constitui-se de rejeitos dos processos de triagem de materiais. As características gravimétricas dos resíduos da AP-1 associados aos aspectos de eficiência nas coletas seletivas dispensam o envio de RSU sem pré-processamento para tratamento térmico. Apesar da intensa ação de triagem remover materiais com poder calorífico inferior elevado da massa de RSU, restando ao final um rejeito com poder calorífico inferior menor (Alves Souza *et al*, 2016), a geração de e.e. por meio da incineração desse material é suficiente para o abastecimento diário de mais de 4 mil residências no Cenário 1 (2032) e de mais de 6 mil no Cenário 2 (2040).

4.2.2.2 Rotas Tecnológicas AP-5

A AP-5 se refere a uma área de expansão do MRJ, localizada em sua Zona Oeste (Regiões de Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Bangu). É composta por 21 (vinte e um) bairros, possui uma área territorial de 572,20 km² (47,51% do território do MRJ), uma população de 1.862.899 pessoas (30,1% da população do MRJ) no Cenário Base (2024) e densidade populacional de 3.256 hab/km². Sua dinâmica populacional segue no sentido oposto ao do MRJ, onde prevê-se ascensão populacional nos Cenários Futuros 1 (2032) e 2 (2040), alcançando status de AP mais populosa do MRJ, lugar ocupado pela AP-3 no Cenário Base (2024).

É uma área de expansão do MRJ, com baixa densidade populacional e o menor IDS do MRJ (0,554) (PCRJ, 2010), cujo uso do solo é heterogêneo, composto por áreas residenciais, áreas de exploração mineral, áreas industriais e áreas agrícolas, além da maior concentração de áreas não urbanizadas do município (PCRJ, 2018b). É a AP com maior dinâmica de alteração do uso do solo, substituindo-se áreas não ocupadas por áreas residenciais e industriais (PCRJ, 2018b). No ano base (2024) sua geração de RSU é de 1.918,88 t/d, representando 28,4% do total de RSU gerado no MRJ, com previsão de se tornar maior gerador de RSU no Cenário Futuro 2 (2040).

Assim como na modelagem da AP-1, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) indica os quantitativos de materiais a serem recolhidos nas diferentes modalidades de coleta (para atendimento às metas do PLANARES (Brasil, 2022c)), a seguir apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Quantitativo de materiais a serem coletados segundo tipo de coleta para AP-5 – Cenários 1 e 2

Tipos de Coleta	Cenário 1 2032		Cenário 2 2040	
	%	t/d	%	t/d
coleta seletiva de recicláveis	21,7	436,68	24,1	507,55
coleta seletiva de orgânicos	10,6	213,31	40,5	852,94
coleta de mistos/rejeitos	67,7	1.362,35	35,4	745,53
Total de RSU a ser gerido	100,0	2.012,33	100,0	2.106,02

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Com base na gravimetria específica da AP-5 e nos tipos de coleta a serem executadas, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) calcula os quantitativos dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-5, a seguir apresentados na Tabela 38 e na Tabela 39.

Tabela 38 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-5 – Cenário 1 (2032)

Tipo de coleta	Orgânicos (t/d)		Recicláveis (t/d)						Rejeitos/mistos (t/d)		Total (t/d)
	Alimentos	Verdes	Papel e papelo	Plástico		Vidro	Metais		Combustíveis	Não combustíveis	
				Filme	Rígido		Ferrosos	Não ferrosos			
Seletiva de recicláveis			175,89	151,38	55,96	32,40	14,11	6,94			436,68
Seletiva de orgânicos	205,39	7,91									213,31
Mistos/rejeitos	901,79	34,75	120,12	103,38	38,22	22,13	9,64	4,74	88,94	38,64	1.362,35
Total	1.107,18	42,66	296,01	254,76	94,18	54,53	23,75	11,67	88,94	38,64	2.012,33

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Tabela 39 – Resumo dos materiais disponíveis para aproveitamento na AP-5 – Cenário 2
(2040)

Tipo de coleta	Orgânicos (t/d)		Recicláveis (t/d)						Rejeitos/mistos (t/d)		Total (t/d)
	Alimentos	Verdes	Papel e papeloão	Plástico		Vidro	Metais		Combustíveis	Não combustíveis	
				Filme	Rígido		Ferrosos	Não ferrosos			
Seletiva de recicláveis			204,44	175,95	65,04	37,66	16,40	8,06			507,55
Seletiva de orgânicos	821,29	31,65									852,94
Mistos/rejeitos	337,44	13,00	105,36	90,67	33,52	19,41	8,45	4,15	93,09	40,44	745,53
Total	1.158,73	44,65	309,80	266,62	98,56	57,07	24,85	12,21	93,09	40,44	2.106,02

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Os quantitativos de materiais apresentados, organizados segundo seus grupos principais (orgânicos, recicláveis, e rejeitos/mistos) são aqueles direcionados para as seguintes rotas tecnológicas:

- Triagem manual de seletivos;
- Triagem mecanizada de seletivos
- Triagem mecanizada de mistos
- Compostagem; e
- Incineração.

A Tabela 40 apresenta os quantitativos de materiais recuperados e encaminhados para tratamento térmico por meio das rotas tecnológicas modeladas pela ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) para o atendimento das metas do PLANARES (Brasil, 2022c) nos Cenários Base (2024), 1 e 2 (2032 e 2040) e Controle da AP-5.

Tabela 40 – Resultado da modelagem de rotas tecnológicas da AP-5 – Cenários Base, 1, 2 e Controle

Cenários	Ano	Materiais Recuperados (t/d)		Evaporação (t/d)		Aterro Sanitário (t/d)	Total (t/d)
		Recicláveis	Orgânicos	Tratamento térmico (geração de e.e.)	Perdas Atmosféricas		
Base	2024	24,72	4,62	0,00	5,14	1.884,40	1.918,88
1 (Planares)	2032	324,93	218,14	242,38	243,50	983,38	2.012,33
<i>1 (Controle)</i>	<i>2032</i>	<i>25,93</i>	<i>4,85</i>	<i>0,00</i>	<i>5,39</i>	<i>1.976,17</i>	<i>2.012,33</i>
2 (Planares)	2040	543,46	381,69	485,35	477,11	218,42	2.106,02
<i>2 (Controle)</i>	<i>2040</i>	<i>27,13</i>	<i>4,51</i>	<i>0,00</i>	<i>5,64</i>	<i>2.068,74</i>	<i>2.106,02</i>

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Em relação à geração de energia elétrica por incineração, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) apresenta resultados, em kWh/dia referente à massa de RSU desviada para essa rota específica, onde predomina a incineração de rejeitos dos processos de triagem, estes com elevado poder calorífico. Os resultados referentes ao quantitativo de geração de energia elétrica podem ser observado na Tabela 41.

Tabela 41 – Geração de energia elétrica equivalente na AP-5 segundos Cenários 1 e 2

Cenários Futuros	Ano	Tratamento térmico (geração de e.e.) (t/d)	Energia elétrica (kWh/d)	Energia elétrica (kWh/mês)	Residências equivalentes (un/d)*
1 (Planares)	2032	242,38	163.388,38	4.901.651	24.508
2 (Planares)	2040	485,35	318.114,59	9.543.438	47.717

Nota: * considera-se o consumo médio de 200 kWh/mês por residência (Abrahão; Souza, 2021)

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Da mesma forma que apresentado no tópico anterior, a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) apresenta um balanço de emissões de GEE, considerando as emissões líquidas de cada rota tecnológica modeladas à luz das metas estabelecidas pelo PLANARES (Brasil, 2022c) nos Cenários Futuros 1 (2024) e 2 (2040). Dessa forma, é possível fazer um balanço de emissões evitadas de GEE comparando-se com os Cenários Controle, cujos resultados podem ser observados na Tabela 42.

Tabela 42 – Balanço de emissões de GEE da AP-5

Anos	Emissões Líquidas		Emissões evitadas tCO _{2eq} /ano	Comparativos	
	Cenários Controle tCO _{2eq} /ano	Cenários Futuros (Planares) tCO _{2eq} /ano		Veículos equivalentes (un/ano)*	Voltas equivalentes na circunferência da terra (un/ano)**
2032	379.900	113.556	266.344	409.130	61.255
2040	397.587	44.960	352.627	541.670	81.098

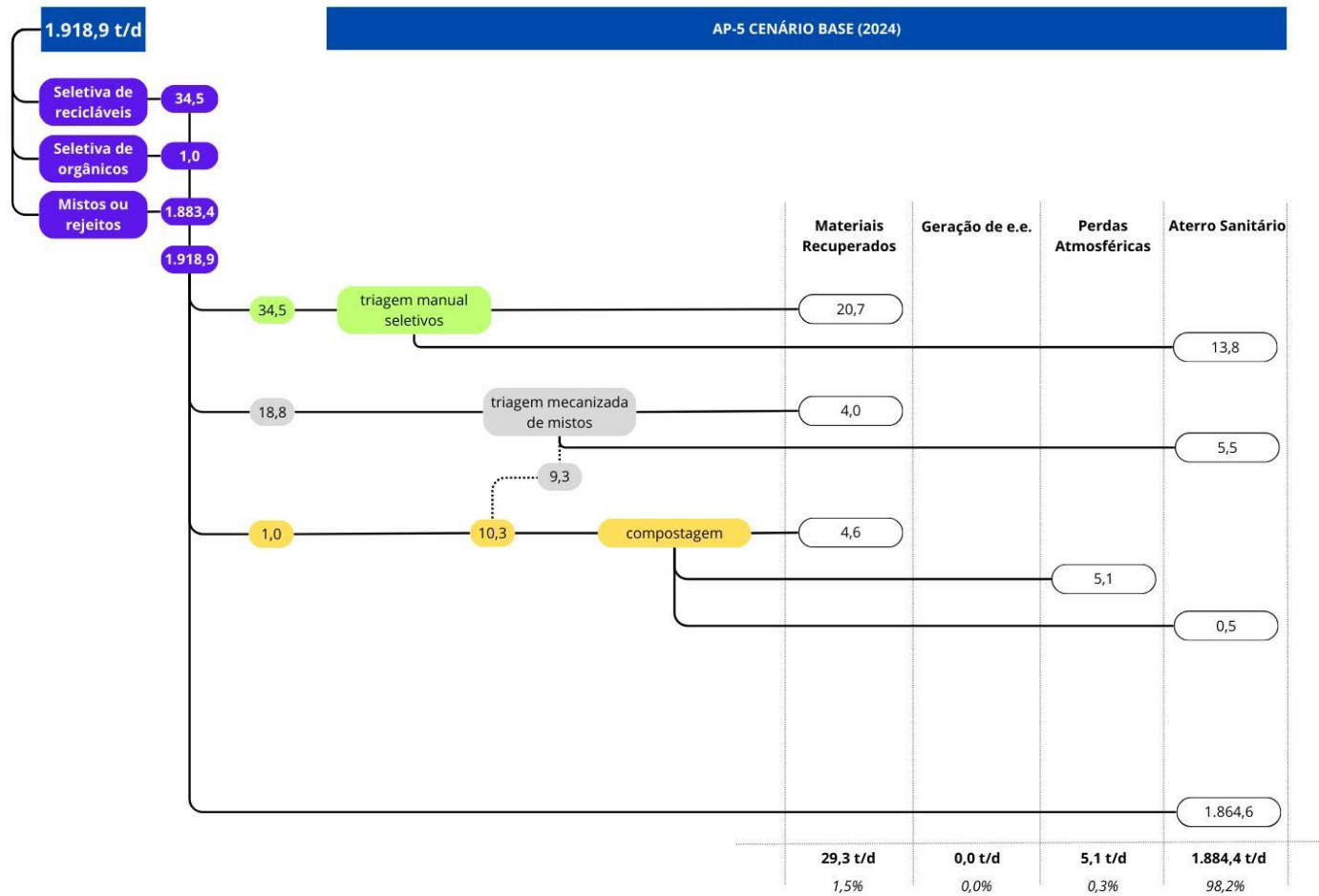
Notas: * Considerou-se um carro popular (1.0 L a 1.4 L) circulando 6.000 km/ano, com uma emissão de 0,651 tCO_{2eq}/ano (De Brito; Tavares, 2016);

** Atualmente considera-se que a maior circunferência da Terra possui 4.075 km de extensão aproximada (Bergamim *et al*, 2023)

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

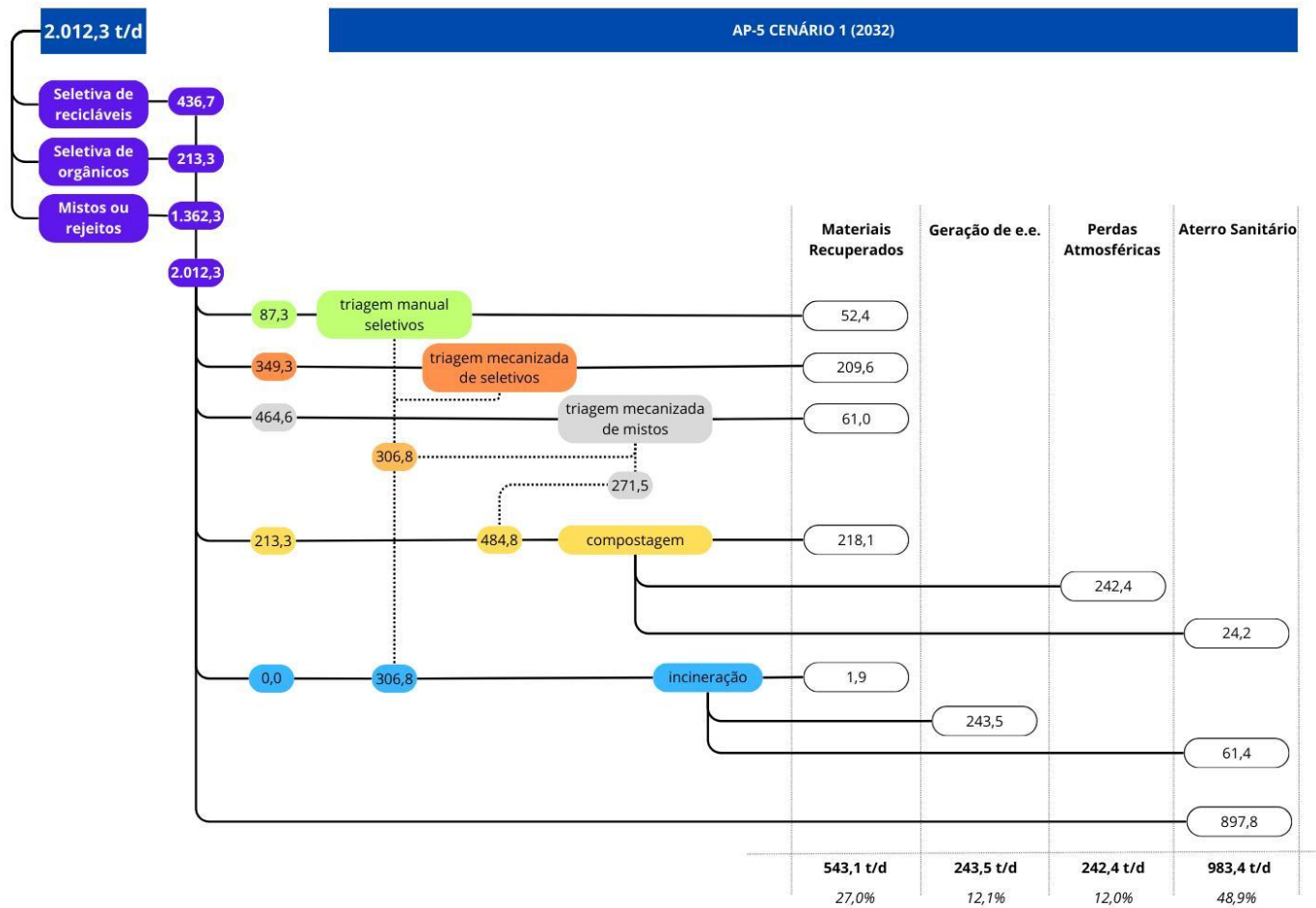
As figuras seguintes apresentam os fluxos de massa das rotas tecnológicas modeladas para a AP-5 nos Cenários Base (2024) e Futuros 1 (2032) e 2 (2040).

Figura 20 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-5 – Cenário Base (2024)



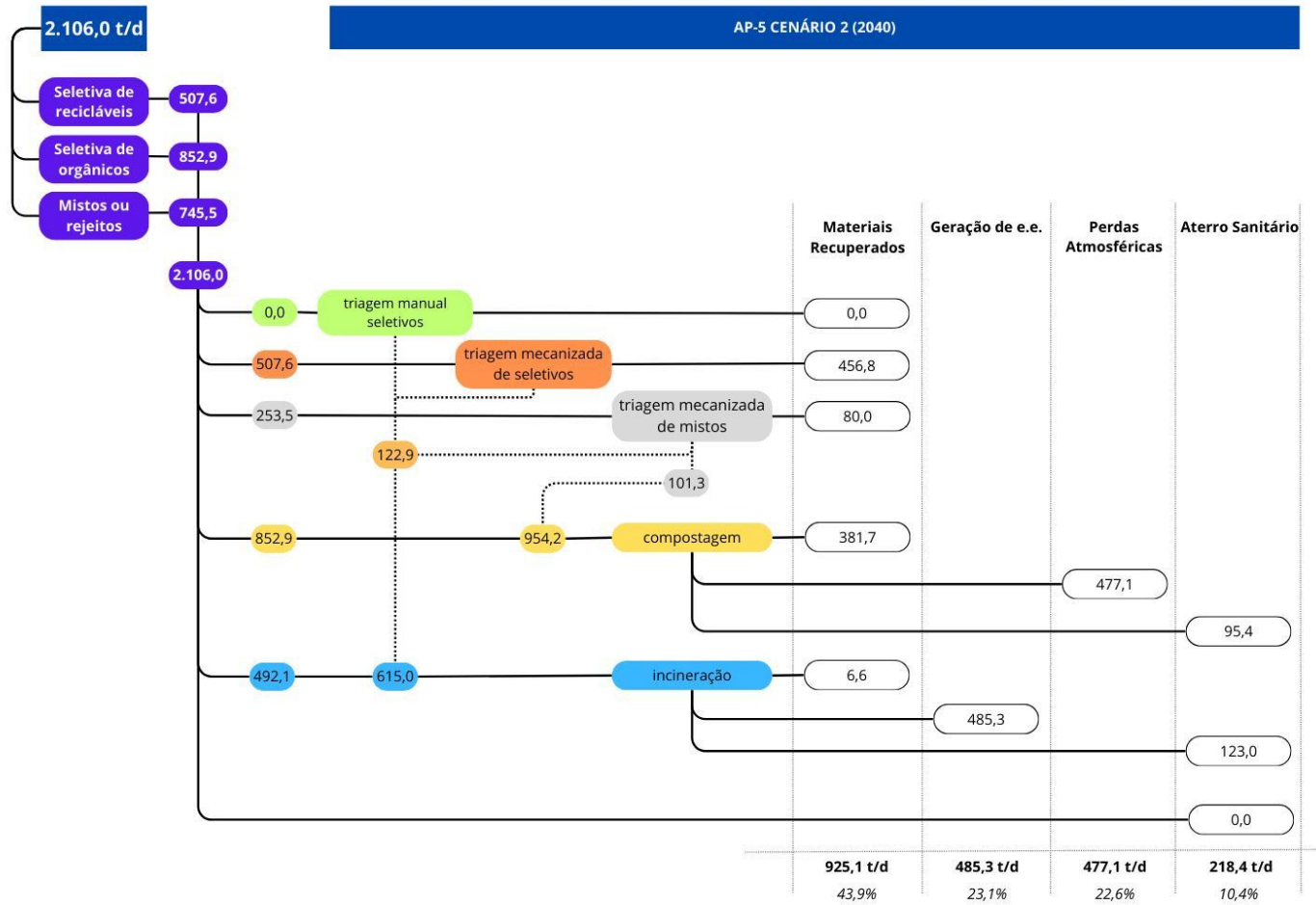
Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 21 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-5 – Cenário 1 (2032)



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

Figura 22 – Fluxo de massa das rotas tecnológicas da AP-5 – Cenário 2 (2040)



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024

A AP-5 apresenta características demográficas, territoriais e do RSU diferentes da AP-1. Sua população tende a ser a maior do MRJ no Cenário 2 (2040), porém com a menor densidade populacional do município, resultando em um sistema de coleta que demanda percorrer maiores extensões territoriais em um território ainda em expansão. Associado a essas características, a gravimetria da AP-5 apresenta a maior concentração de matéria orgânica do MRJ (55%) e a menor concentração de materiais recicláveis (36,5%) para o qual a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) direciona para um sistema com maior intensidade na coleta seletiva de orgânicos e de mistos/rejeitos, representando 75,9% da coleta da AP-5 no Cenário 2 (2040), versus 60,1% na AP-1, porém com uma coleta menos eficiente diante de uma densidade populacional inferior à AP-1 e ao MRJ (Souza Farias, 2018 p.57).

A modelagem de rotas tecnológicas da AP-5 indica que no Cenário 1 (2032) a coleta seletiva seja responsável pela recuperação de 32,3% de materiais (recicláveis e orgânicos), elevando-se esse valor para 64,6% no Cenário 2 (2040). Diferentemente da AP-1, na AP-5 a maior representatividade será da coleta seletiva de orgânicos no Cenário 2 (2040), que responderá por 40,5% da coleta de RSU, ante 24,1% da coleta seletiva de recicláveis. Nesse sentido, a AP-5 apresenta maior potencial para implantação de unidades de compostagem, em uma região com grandes áreas ainda desocupadas, cuja viabilidade pode ser ancorada na qualidade do composto final diante de um cenário com potencial para coleta diferenciada dos materiais (Siqueira; Assad, 2015).

Outro resultado verificado pela modelagem de rotas tecnológicas da AP-5 é o tratamento térmico com a utilização de materiais oriundos diretamente da coleta de mistos/rejeitos no Cenário 2 (2040), sem triagem, conforme pode ser observado na Figura 22. Em função das características gravimétricas do RSU, que indica a maior concentração de orgânicos do MRJ, e considerando que quanto maior a triagem e recuperação de materiais recicláveis da massa de RSU menor é o seu PCI (Alves Souza *et al*, 2016), a ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) equilibra a eficiência da rota tecnológica de tratamento térmico com resíduos da coleta de mistos/rejeitos no Cenário 2 (2040), como forma de se alcançar resultados positivos de geração de e.e. por meio da incineração. No Cenário 1 (2032), onde todos os resíduos encaminhados para tratamento térmico passaram por prévia triagem para recuperação de recicláveis, a geração de e.e. produzida é suficiente para se alimentar pouco mais de 24.500 residências diariamente. No Cenário 2 (2040), onde o tratamento térmico recebe resíduos com e sem triagem prévia para recuperação de recicláveis, a geração de e.e. se eleva ao patamar de possibilidade de alimentação de aproximadamente 81.100 residências diariamente, indicando que a geração de e.e, mesmo com resíduos não triados, pouco impacta essa rota, indo no sentido da

complementação da matriz energética por meio de uma geração de e.e. viável e com matriz em RSU (Caixeta, 2005 p.13).

Considerando que AP-5 possui a segunda maior população do MRJ no Cenário Base (2024) e será a mais populosa no Cenário 2 (2040), os números são elevados. Adotar rotas tecnológicas para o aproveitamento de materiais nessa AP promove o maior impacto na otimização do Aterro Sanitário de Seropédica. A ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b), indica uma redução de 98% para 49% do RSU encaminhado para o Aterro Sanitário de Seropédica no Cenário 1 (2032), e para 10% no Cenário 2 (2040). Em massa, esses valores representam uma redução de 1.884,40 t/d para 218,42 t/d no Cenário 2 (2040), o que equivale a um município de 1,6 milhão de habitantes deixando de aportar RSU no Aterro Sanitário de Seropédica diariamente. A título de comparação, é como se os municípios de São Gonçalo, Niterói e Maricá, na RMRJ, deixassem de produzir resíduos diariamente, sendo que São Gonçalo é o segundo maior município do ERJ em população, atrás apenas do MRJ.

Essa redução no aporte diário de RSU no Aterro Sanitário de Seropédica, após adotadas as rotas tecnológicas, indica que as emissões evitadas de CO₂eq na AP-5 são equivalentes a uma frota anual de mais de 409 mil veículos no Cenário 1 (2032) e mais de 541 mil veículos no Cenário 2 (2040). Em uma simples comparação, é como se um veículo fosse capaz de dar mais de 61 mil voltas ao redor da Terra no Cenário 1 (2032) e aproximadamente 81 mil voltas no Cenário 2 (2040).

4.2.3 Análise crítica das modelagens

A ferramenta ProteGEEr (Brasil, 2022b) permite a inserção de parâmetros de coleta seletiva, parâmetros populacionais e gravimétricos, com rápida resposta do quantitativo de materiais disponíveis na massa de RSU para aproveitamento diante das possibilidades de rotas tecnológicas disponibilizadas pela ferramenta, incluindo possibilidades futuras como tratamento térmico para aproveitamento energético.

Para início das modelagens, há a necessidade da definição de estratégias de coleta seletiva (recicláveis e orgânicos), onde verificou-se que as estratégias variam em função das características de cada AP (população e geração *per capita* por exemplo) e da concentração de recicláveis e orgânicos presentes na massa de RSU. Nesse sentido, para cada AP houve a necessidade de uma estratégia de coleta diferenciada, no sentido de se equilibrar os quantitativos de materiais e sua colocação em rota tecnológica, com o objetivo de se alcançar as metas do PLANARES (Brasil, 2022c) nos Cenários 1 (2032) e 2 (2040). Nesse momento já

é possível verificar se a rota tecnológica guarda os requisitos mínimos de viabilidade econômica, onde a ferramenta indica qual rota não está alcançando equilíbrio econômico, a exemplo da rota de incineração que só se viabiliza com um mínimo de 500 t/d.

Os resultados obtidos com as modelagens apresentam potencial de serem analisados no sentido do planejamento integrado do sistema, indicando quais APs podem ancorar as rotas tecnológicas modeladas em função de outros parâmetros, como densidade populacional, extensões de deslocamento e eixos viários, em uma cidade de complexidade metropolitana. Importante destacar que o MRJ, diante das suas características territoriais e de uso do solo, não possui áreas disponíveis em todas as APs para a implantação de unidades de tratamento de resíduos específicas para cada AP, onde prevê-se a agregação de APs para ancoragem das rotas tecnológicas. A esse exemplo, APs 3 e 5 possuem maior concentração de orgânicos na massa de RSU por exemplo. Considerando a análise da AP-5, cujos resultados direcionam para uma rota tecnológica de compostagem de grande relevância, essas duas APs podem ancorar os sistemas de compostagem do MRJ. Possuem características geográficas semelhantes, são conectadas por artérias viárias já consolidadas e possuem disponibilidade de grandes áreas desocupadas para a implantação de Unidades de Compostagem. Além disso, a AP-5 concentra as áreas industriais do MRJ, com distritos industriais aptos ao recebimento de plantas de Tratamento Térmico de RSU com geração de E.E.

No sentido oposto, as APs 1 e 2 são áreas centrais, com densidades demográficas altas e reduzidos territórios, onde as coletas seletivas de recicláveis tendem a ser mais eficientes, a exemplo dos resultados obtidos na modelagem da AP-1. Agregando-se essas duas APs, e considerando as estruturas de triagem já existentes na AP-1, pode-se centralizar as Unidades de Triagem de Recicláveis e Mistos nessas APs, com transferência do material orgânico para a AP-5 por meio das artérias viárias que conectam ambas. A AP-4, mesmo com uma gravimetria que a aproxima das APs 1 e 2, guarda afinidade geográfica com a AP-5 e possui conexão por meio de artérias viárias consolidadas que cruzam áreas de baixa densidade populacional, cujos resíduos podem ser encaminhados para a AP-5. Tais planejamentos também vão no sentido da viabilização econômica das rotas, à medida que agregam escala ao sistema. Áreas com geração de RSU muito baixas não se viabilizam economicamente.

Outro aspecto de análise é a resposta da ferramenta do total de resíduos desviados do Aterro Sanitário de Seropédica nos Cenários 1 (2032) e 2 (2040). Tais resultados indicam, em última análise, os desafios para se viabilizar rotas tecnológicas que removam do aterro sanitário quantitativos de RSU que chegam a uma diferença de mais de 1.600 t/dia apenas na AP-5 entre

o Cenário Base (2024)⁵ e Cenário 2 (2040)⁶, onde parte desses materiais desviados se perde em por evaporação. Na ferramenta, a evaporação é classificada como o somatório entre perdas atmosféricas por desidratação natural da rota de compostagem e o tratamento térmico do RSU. Sobre o aspecto da desidratação, a ferramenta não indica e nem permite a inserção do grau de umidade do RSU, mas gera como resposta uma perda atmosférica por desidratação que representa parcela considerável no balanço de massa final. Segundo Power Reis (2005 p.188) a redução significativa de massa devido à perda de umidade já é esperada ao final do processo de compostagem. Na modelagem da AP-1, as perdas atmosféricas por desidratação na compostagem representam 12% da massa total de RSU no Cenário 1 (2032) e 20% no Cenário 2 (2040). Na AP-5, essas perdas chegam a 12% da massa de RSU no Cenário 1 (2032) e 23% no Cenário 2 (2040), em um contexto em que a umidade média do RSU do MRJ é de aproximadamente 54% na série histórica (1995 a 2022), chegando a um máximo de 76,5% no ano de 2004 (PCRJ, 2023b).

A ferramenta também apresenta resultados numéricos sobre a geração de energia elétrica por meio do tratamento térmico do RSU, uma funcionalidade que se alinha às demandas futuras nacionais referentes ao tratamento térmico, com aproveitamento energético, previstas na PNRS (Brasil, 2010). Nas modelagem executada na AP-1, que é a menor AP do MRJ, a rota de tratamento térmico com aproveitamento energético do RSU apresentou uma produção de e.e. suficiente para o abastecimento diário de 4.746 residência no Cenário 1 (2032) e 6.118 residências no Cenário 2 (2040), a partir da recuperação e aproveitamento de, respectivamente, 40,37 e 70,78 t/d de RSU. Essa produção de e.e. na AP-1 tem como base os rejeitos dos processos de triagem de recicláveis e de mistos/rejeitos. Já na AP-5, além dos rejeitos de triagem, a ferramenta indica no Cenário 2 (2040) o aporte de RSU sem triagem para tratamento térmico, em função das características gravimétricas dos resíduos, onde tal resultado é corroborado por Palermo *et al* (2020) que indica que o PCI médio do RSU viabiliza a sua incineração mesmo sem tratamento prévio.

No mesmo sentido, as emissões evitadas de GEE na AP-1, por exemplo, em um comparativo entre os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) e os Cenários Controle, são equivalentes à retirada anual de circulação de 68.647 veículos no Cenário 1 e 110.707 veículos no Cenário 2, em um contexto em que as emissões atmosféricas derivadas da disposição final de resíduos

⁵ No Cenário Base (2024) prevê-se o encaminhamento de 1.884,4 t/dia de RSU da AP-5 para o Aterro Sanitário de Seropédica.

⁶ No Cenário 2 (2040) prevê-se o encaminhamento de 218,42 t/dia de RSU da AP-5 para o Aterro Sanitário de Seropédica.

ocupam o 5º lugar no ranking nacional de atividades emissoras de GEE (Observatório do Clima, 2024).

A modelagem esbarrou em limites impostos pela própria metodologia de construção da ferramenta, em especial referente às perdas de massa por desidratação. Tais perdas são consideráveis na modelagem, porém não havendo como inserir parâmetros de teor de umidade juntamente com os dados gravimétricos do RSU. Em uma modelagem onde a rota de compostagem é uma alternativa de grande relevância, entender como a umidade do RSU pode interferir nesse processo auxilia no planejamento dessa rota, sendo esse um dos principais parâmetros nos processos biológicos aderentes à compostagem (Power Reis, 2005 p.24).

Por fim, foi possível verificar que a ferramenta se adapta melhor para grandes municípios ou aglomerados urbanos. Os recursos da ferramenta só conseguem ser aplicados em sua máxima potencialidade à partir de 500 t/d, que é o quantitativo mínimo para viabilizar a rota de tratamento térmico por incineração, por exemplo, sendo o tratamento térmico para fins de geração de e.e. uma das metas do PLANARES (Brasil, 2022c). Apesar da maioria dos municípios brasileiros (88%) serem de pequeno porte, com população até 50 mil habitantes (IBGE, 2024b), torna-se fundamental agregar diferentes áreas e regiões para ganho de escala, a exemplo das APs do MRJ.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta os resultados referentes à modelagem de rotas tecnológicas para o manejo de RSU no MRJ por meio da ferramenta de apoio à decisão denominada “Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU”, versão 1.01, do Programa de Cooperação para a Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos – ProteGEEr, contemplando diferentes cenários de modelagem, sendo o Cenário Base (2024), Cenários Futuros 1 (2032) e 2 (2040) e Cenários Controle.

A composição dos modelos passa pela identificação das características do sistema de limpeza urbana do MRJ, em especial o seu comportamento no Cenário Base (2024) quanto à recuperação de materiais e disposição final do RSU, bem como sua composição gravimétrica. Este último parâmetro é de fundamental importância para a modelagem das rotas tecnológicas, sobretudo considerando a extensão territorial do MRJ e as características de cada AP. Foram analisados 27 anos de dados gravimétricos (de 1995 a 2022), para os quais foi necessário aplicar tratamento estatístico com o objetivo de se avaliar a sua consistência e posterior identificação da melhor medida de tendência central a ser utilizada, cujos resultados indicaram pela utilização da média da série histórica dos dados gravimétricos individualizados segundo cada AP do MRJ.

A caracterização das áreas de estudo também fornece subsídios para a compreensão do comportamento de cada AP no cenário socioeconômico municipal, sendo possível estabelecer uma correlação entre os IDSs de cada AP e a sua composição gravimétrica. As APs com menor IDS (3 e 5) apresentam massa de RSU com maior concentração de matéria orgânica, ao passo que as APs com maior IDS (2 e 4) apresentam uma menor concentração de matéria orgânica na massa de RSU, informações essas que tornam-se estratégicas no planejamento de sistemas de coleta seletiva.

O cálculo de projeção populacional, informação necessária para as estimativas de geração de RSU, foi executado por não haver projeções existentes baseadas nos recentes dados do Censo 2022. Foi aplicado o método AiBi igualmente utilizado pelo MRJ e pelo IBGE para projeções populacionais, cujos resultados indicam dinâmicas populacionais diferentes, onde as APs 4 e 5 apresentam previsão de crescimento populacional positivo, ao passo que as APs 1, 2 e 3 acompanham a previsão de decréscimo populacional do MRJ. Em complementação, foi calculado o índice de geração *per capita* para o Cenário Base (2024) usando como referência a geração de RSU para o ano de 2022, publicado pelo MRJ. Corroborando com as diferenças identificadas em cada AP, a AP-1 apresenta o maior indicador de geração do MRJ, em uma

provável relação com as suas características comerciais, turísticas e de negócios, sobretudo de polo de concentração de mão de obra no MRJ.

Os resultados da modelagem de rotas tecnológicas, com o uso da ferramenta ProteGEEr, deram origem a uma base de dados indicando os quantitativos de materiais que devem ser recuperados, em cada AP, para o atendimento às metas de recuperação e aproveitamento de materiais estabelecidas pelo PLANARES. Essa base de dados também, passou por tratamento estatístico para verificação de consistência dos dados auferidos com a modelagem, cujos resultados indicaram aderência à distribuição normal (p -valor $> 0,05$) para os todos os grupos analisados (recicláveis, orgânicos, tratamento térmico e aterro sanitário), com índice de confiança de 95%. Nesse sentido, os dados indicaram a necessidade de se avançar em sistemas de coleta seletiva (recicláveis e orgânicos) mais abrangentes e individualizados segundo AP, de forma a se alimentar as rotas de triagem (recicláveis e mistos/rejeitos), a rota de compostagem em maior escala e a rota de tratamento térmico com aproveitamento energético, ainda inexistente no MRJ. Um dos resultados da ferramenta é a apresentação de um fluxo de massa com dados quantitativos, onde é possível verificar o desvio do Aterro Sanitário de Seropédica que cada rota tecnológica impõe ao RSU.

Quanto à rota de tratamento térmico, a ferramenta apresenta resultados expressivos sobre a geração de e.e. por meio da incineração, onde AP-1, por exemplo, indica uma geração de e.e. de 31.642,2 kWh/dia, suficiente para manutenção de pouco mais de 4.700 residências apenas no Cenário 1 (2032), evoluindo para 40.783,5 kWh/dia no Cenário 2 (2040), suficiente para a manutenção de pouco mais de 6.100 residências. Nesse mesmo diapasão, houve uma resposta da ferramenta em relação às emissões de GEE, apresentando as emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para cada modelagem executada. Procedendo-se com uma análise comparativa entre os Cenários 1 (2032) e 2 (2040) e respectivos Cenários Controle, foi possível determinar as emissões evitadas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para cada cenário futuro de cada AP, onde, por exemplo, a AP-5 apresenta resultados expressivos de emissões evitadas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

No contexto do maior gerador de RSU no Cenário 2 (2040), a ferramenta indicou emissões evitadas de 352.627 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ /ano, que representam um total de 541.670 veículos populares (motores de 1.0 a 1.4 L) circulando 6.000 km/ano. Tais emissões evitadas referem-se à recuperação de materiais recicláveis, que em seus processos de transformação emitem menos GEE se comparados à transformação da matéria primária primária, e da redução do aporte de matéria orgânica no Aterro Sanitário de Seropédica, com consequente redução da produção de CH_4 . Esse GEE possui um Potencial de Aquecimento Global mais que 80 vezes superior ao dióxido de carbono (CO_2) durante os 20 anos que se seguem à sua liberação na atmosfera e

representa 25% do aquecimento global, indicando a importância da conversão da matéria orgânica em composto orgânico.

Portanto, ao final do presente trabalho, é possível afirmar que o MRJ deve assumir o desafio de fornecer um sistema eficaz e eficiente de gestão de RSU à população, sendo o ente federativo o titular dos serviços de limpeza urbana e responsável pela implementação de medidas que coloquem o município no sentido do que preconiza a PNRS. A alteração nos padrões de consumo e que culminam na constante introdução de materiais estranhos ao ambiente, porém com elevado potencial de recuperação, também alterou os padrões do RSU, tornando-o economicamente viável para o seu aproveitamento em múltiplas rotas tecnológicas, conforme os resultados aqui apresentados. Dar a devida importância ao tema e perseguir os objetivos econômicos que levem plenamente em conta o valor dos recursos naturais torna-se fundamental.

A ferramenta ProteGEEr confirma o objetivo geral, permitindo modelar todos os cenários desejados para cada AP, apontando a necessidade da associação de diversas rotas tecnológicas para que as metas nacionais de recuperação de materiais e aproveitamento energético sejam alcançadas. Da mesma forma, a ferramenta ProteGEEr mostrou-se como um importante mecanismo de suporte à decisão, indicando os caminhos para o planejamento das diversas rotas tecnológicas de aproveitamento de materiais, cujos resultados, associados a outros parâmetros locais, permitem uma leitura do caminho a ser percorrido e da dimensão do desafio.

Com isso, espera-se que o presente trabalho sirva como apoio para que gestores públicos possam desenvolver suas análises de rotas tecnológicas com o uso da ferramenta ProteGEEr, na busca pelo atendimento regulamentações e normativas ambientais que se apresentaram no Brasil desde o ano de 2007 e que vêm evoluindo no sentido da inclusão social de catadores e catadoras, na criação de mecanismos econômicos para a recuperação de materiais (recicláveis e orgânicos), na geração de e.e. proveniente do RSU e no encaminhamento apenas de rejeitos para aterros sanitários, fechando um ciclo definido pela PNRS.

6 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para contribuir na melhoria de estudos futuros aderentes aos resultados aqui apresentados, sugere-se as seguintes recomendações:

- Avaliar o resultado de perda de massa de RSU por desidratação na compostagem em comparação ao teor de umidade verificado na gravimetria do resíduo, no sentido da aferição dos resultados, considerando que as perdas verificadas na modelagem são relevantes no balanço final;
- Aprofundar os estudos de rotas tecnológicas considerando os portes populacionais e produção de RSU no sentido da análise prévia de viabilidade econômica. A ferramenta indica, de forma individualizada, o que é viável e o que não é em função do quantitativo de RSU e suas características gravimétricas. Tal entendimento auxilia na eventual definição de estratégias para agregação de diferentes áreas territoriais para ganho de escala, a exemplo das APs do MRJ. Da mesma forma, esse aprofundamento pode direcionar para uma necessidade de ajustes na ferramenta, para sua melhor adaptação a municípios de menor porte, considerando que 88% dos municípios brasileiros são classificados como de pequeno porte, com população até 50 mil habitantes;
- Atualizar a ferramenta no sentido da inserção das metas de recuperação de materiais do PLANARES, como variáveis iniciais de modelagem dos diferentes cenários, considerando que a ferramenta foi desenvolvida anteriormente à publicação das metas nacionais;
- Avançar no sentido da modelagem das rotas tecnológicas incluindo os aspectos econômicos disponibilizados pela ferramenta.

7 REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. (2021). *Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica*. Ambiente Construído, v. 21, n. 2, p. 383-408, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/MC5DNWHS46jH6hCKKtCzFCc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 ago. 2024.

AGÊNCIA BRASIL. (2018). *Brasil perde R\$ 5,7 bilhões por ano ao não reciclar resíduos plásticos*. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-06/brasil-perder-57-bilhoes-por-ano-ao-nao-reciclar-residuos-plasticos#:~:text=Se%20o%20total%20desse%20montante,o%20res%C3%ADduo%20gerado%20no%20pa%C3%ADs..> Acesso em: 01 out. 2024.

ALBANO, L. B.; SCOTON, E. J.; BATTISTELLE, R. A. G. (2018). *Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos no Brasil após a política nacional dos resíduos sólidos a partir de dados do SNIS*. In: I Congresso Sul-Americano de resíduos sólidos e sustentabilidade – CONRESOL, IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, Gramado-RS. 2018.

ALVES DE SOUZA, L. *et al.* (2020) *Análise dos principais parâmetros que influenciam a compostagem de resíduos sólidos urbanos*. Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 8, n. 3, 2020. Disponível em: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/390>. Acesso em: 04 set. 2024.

ALVES SOUZA, M.; FUSS, M., VARELLA, C. V. S.; Lima, F. D. P. A. (2016). *Lixo zero: por uma rota tecnológica alinhada às diretrizes da política nacional de resíduos sólidos*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). Catadores de materiais recicláveis: Um encontro nacional. Rio de, p. 337-406, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Maryegli-Fuss/publication/359082806_LIXO_ZERO_POR_UMA_ROTA_TECNOLOGICA_ALINHADA_AS_DIRETRIZES_DA_POLITICA_NACIONAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS/links/6227184c9f7b3246341819ed/LIXO-ZERO-POR-UMA-ROTA-TECNOLOGICA-ALINHADA-AS-DIRETRIZES-DA-POLITICA-NACIONAL-DE-RESIDUOS-SOLIDOS.pdf. Acesso em: 07 set. 2024.

ARLENE CARVALHO. (2024). *Desvendando os Segredos da Economia Circular no Japão*. Movimento Circular. Disponível em: <https://movimentocircular.io/pt/blog/desvendando-os-segredos-da-economia-circular-no-japao>. Acesso em: 17 dez. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA – ABRELPE. (2022). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2022*. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em 10 abr. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007/2004. (2004) *Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE CATADORES E CATADORAS DE MATERIAIS RECICLÁVEIS – ANCAT. (2022). *Atlas Brasileiro de Reciclagem*. 1. ed. São Paulo. 2022. Disponível em: <https://atlasbrasileirodareciclagem.ancat.org.br/>. Acesso em 01 out. 2024.

ÁUREA SOUSA (2019). *O papel da distribuição normal na Estatística*. *Correio dos Açores: Matemática*. 10 de Outubro de 2019, p. 14. Disponível em: https://repositorio.uac.pt/bitstream/10400.3/5363/1/Sousa_10%20out%202019.pdf. Acesso em: 18 jul. 2024.

BANDEIRA, Manuel. *Poesia Completa e Prosa*. Rio de Janeiro: Nova Aguilar, 1993.

BARBOSA, F. de H.. (2017). *A crise econômica de 2014/2017*. *Estudos Avançados*, v. 31, n. 89, p. 51–60, jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890006>. Acesso em 09 abr. 2024.

BERGAMIM, E. G. J. *et al.* (2023). *Medindo a circunferência da terra: uma possibilidade de articulação entre história da matemática e modelagem matemática*. XII CNMEM – Conferência Nacional sobre Modelagem na Educação Matemática. Porto Alegre – RS, 24 a 26 de agosto de 2023. ISSN 2176-0489. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Erica-Gambarotto-Jardim-Bergamim/publication/382367766_MEDINDO_A_CIRCUNFERENCIA_DA_TERRA_UM_A_POSSIBILIDADE_DE_ARTICULACAO_ENTRE_HISTORIA_DA_MATEMATICA_E_MODELAGEM_MATEMATICA/links/669a4f3a4a172d2988ad6111/MEDINDO-A-CIRCUNFERENCIA-DA-TERRA-UMA-POSSIBILIDADE-DE-ARTICULACAO-ENTRE-HISTORIA-DA-MATEMATICA-E-MODELAGEM-MATEMATICA.pdf. Acesso em 20 ago. 2024.

BORGES, G. M.; ERVATTI, L. R.; SILVA, L. G. C. e. (2011). *Desafios para o IBGE nas estimativas populacionais dos municípios brasileiros: aplicação de distintas metodologias*. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON POPULATION ESTIMATES AND PROJECTIONS: methodologies, innovations and estimation of target population applied to public policies. ALAP. 2011. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/ve2ms6slfncwhnmxlucxu2n7py/access/wayback/http://www.alapop.org/alap/Docs/ProjectionsSeminar/AbstractsOthers/TrabalhoGabrielMendes.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2024.

BRASIL. Câmara dos Deputados. (1995). *Agenda 21 - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/528199/mod_resource/content/0/Agenda%2021.pdf. Acesso em: 07 set. 2024.

_____. (2007). *Lei n. 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Seção 1, p. 3.

____ (2010). *Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Seção 1, p. 3.

____ - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2016). *Catadores de materiais recicláveis: um encontro nacional / Bruna Cristina Jaquetto Pereira, Fernanda Lira Goes (organizadoras)*. Rio de Janeiro. Ipea, 2016. https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/160331_livro_catadores.pdf. Acesso em: 02 ago. 2023.

____ - Ministério do Desenvolvimento Regional. (2019a). *ProteGEEr: cooperação para a proteção do clima na gestão dos resíduos sólidos urbanos*. Disponível em: <http://protegeer.gov.br/institucional/sobre>. Acesso em: 05 mai. 2023.

____ - Ministério do Desenvolvimento Regional. (2019b). *17º Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos*. Disponível em: <http://snis.gov.br/diagnosticos?view=article&id=558:diagnosticos-snis-2018&catid=69>. Acesso em: 05 mai. de 2023.

____ - Ministério do Meio Ambiente. (2019c). *Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional>. Acesso em: 05 mai. 2023.

____ (2020). *Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Seção 1, p. 1.

____ (2021). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Resolução ANA nº 79, de 14 de junho de 2021. *Aprova a Norma de Referência nº 1 para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico, que dispõe sobre o regime, a estrutura e parâmetros da cobrança pela prestação do serviço público de manejo de resíduos sólidos urbanos, bem como os procedimentos e prazos de fixação, reajuste e revisões tarifárias*. Disponível em: https://participacao-social.ana.gov.br/api/files/Resolucao_ANA_79-2021_-_Aprova_Norma_de_Refereencia_N_1_-_cobranca_RSU-1623872066281.pdf. Acesso em: 08 set. 2024.

____ (2022a). *Decreto n. 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 12 jan. 2022. Seção 1 – Extra A, p. 2.

____ - Ministério do Desenvolvimento Regional. (2022b). *Ferramenta de rotas e custos para manejo de RSU*. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/ferramenta-de-rotas-tecnologicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b/FerramentaRotaseCustosV.1.01_Mai.2022.xlsm/view. Acesso em: 1 ago. 2022.

____ - Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental (2022c). *Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares* [recurso eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022.

_____ - Ministério do Meio Ambiente. (2022d). *Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <https://sinir.gov.br>: Acesso em: 05 mai. 2023.

_____ - Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (2022e). *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos. Infraestrutura*. Brasília. 2022. Disponível em: https://arquivos-snis.mdr.gov.br/DIAGNOSTICO_TEMATICO_INFRAESTRURA_PARA_OS_SERVICOS_RS_SNIS_2022.pdf. Acesso em: 05 mai. 2023.

_____ - Ministério do Desenvolvimento Regional. (2022f). *Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil – versão 2021*. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/calculadora-de-200bemissoes-de-gases-de-efeito-estufa-gee-no-manejo-de-rsu>. Acesso em: 11 set. 2023.

_____ (2022g). *Decreto n. 11.044, de 13 de abril de 2022. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem - Recicla+*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 14 abr. 2022. Seção 1.

_____ (2022h). *Índice de reciclagem de latas de alumínio chega a 99% e Brasil se destaca como recordista mundial*. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2022/04/indice-de-reciclagem-de-latas-de-aluminio-chega-a-99-e-brasil-se-destaca-como-recordista-mundial>. Acesso em: 05 jun. 2024.

_____ (2023a). Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos. Gestão Técnica dos Serviços*. Brasília. 2023. Disponível em: <https://sinir.gov.br>: Acesso em: 04 set. 2023.

_____ (2023b). *Decreto n. 11.413, de 13 de fevereiro de 2023. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura, no âmbito dos sistemas de logística reversa de que trata o art. 33 da Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 13 fev. 2023. Edição 31-A. Seção 1 - Extra A.

_____ (2023c). *Instituição dos Certificados de Crédito de Reciclagem, Estruturação e Massa Futura*. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/obrasilvoltou/desenvolvimento/instituicao-dos-certificados-de-credito-de-reciclagem-estruturacao-e-massa-futura#:~:text=Os%20certificados%20de%20Cr%C3%A9dito%20de,redu%C3%A7%C3%A3o%20do%20desperd%C3%ADcio%20de%20materiais>. Acesso em: 12 ago. 2024.

_____ (2024). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Resolução ANA n° 187, de 19 de março de 2024. Aprova a Norma de Referência n° 7/2024 para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico, que dispõe sobre as condições gerais para a prestação direta ou mediante concessão dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos urbanos*. Brasília. Publicado em: 21/03/2024 | Edição: 56 | Seção: 1 | Página: 83. Disponível em: <https://boletimdosaneamento.com.br/wp-content/uploads/2024/03/RESOLUCAO-ANA-No-187-DE-19-DE-MARCO-DE-2024.pdf>. Acesso em: 08 set. 2024.

BRITO, L. P.; CAVENAGHI, S.; JANNUZZI, P. de M. (2010). *Estimativas e projeções populacionais para pequenos domínios: uma avaliação da precisão para municípios do Rio de Janeiro em 2000 e 2007*. Revista Brasileira de Estudos de População. 27. 10.1590/S0102-30982010000100004. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/250991795_Estimativas_e_projecoes_populacionais_para_pequenos_dominios_uma_avaliacao_da_precisao_para_municipios_do_Rio_de_Janeiro_em_2000_e_2007. Acesso em: 02 abr. 2024.

CAIXETA, D. M. *Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: o caso de Campo Grande/MS*. UnB-CDS, Especialização, Resíduos Sólidos, 2005. Disponível em: https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/documentos/trabalhos-cientificos/dissertacao_dalma.pdf. Acesso em 07 set. 2024.

CAMPOS, J.; RIGOTTI, J. I. R.; MONTEIRO, A. M. V.; REIS, I. A.; BAPTISTA, E. A. (2018). *Estimativas populacionais a partir de dados orbitais de média resolução espacial: aplicações em municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 21., , Poços de Caldas, MG. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/3RSKTRB>. Acesso em 02 abr. 2024.

CAMPOS, H. K. T.. *Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 17, n. 2, p. 171–180, abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522012000200006>. Acesso em: 05 abr. 2024.

CANEJO, C. (2021) *Gestão Integrada de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2021.

CARVALHO, J.T.A.; GERVÁSIO, F. dos S.; RIBEIRO, L. C. S.; MATA, H. T. da C. (2019). *Sustentabilidade e rotas tecnológicas de reciclagem para a cidade de Salvador, no âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Revista Planejamento e Políticas Públicas | ppp | n. 52 | jan./jun. 2019. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9746/1/ppp_n52_sustentabilidade.pdf. Acesso em: 05 mai. 2023.

CHAVES, C. A.; MARQUES, S. de A.; SILVA, W. da S. (2018). *Benefícios da reciclagem de materiais - o caso do alumínio*. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 3, n.3, p. 111-134, mai-jun. 2018.

CIRILLO, M. A.; FERREIRA, D. F. (2003). *Extensão do Teste para Normalidade Univariado Baseado no Coeficiente de Correlação QuantilQuantil para o Caso Multivariado*. Rev. Mat. Estat. Revista de Matemática e Estatística, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 67–84.

COLVERO, Diogo Appel. (2014). *Análise das rotas tecnológicas existentes para os resíduos sólidos urbanos no município de Cidade Ocidental/GO*. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3523>. Acesso em: 13 set. 2023.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM – CEMPRE (2023). *Taxas de Reciclagem*. São Paulo. 2023. Disponível em: <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>. Acesso em: 12 set. 2023.

CONKE, L. S.; NASCIMENTO, E. P. (2018). *A coleta seletiva nas pesquisas brasileiras: uma avaliação metodológica*. Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management), 2018 jan./abr., 10(1), 199-212. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/C5NJZ9MSPRg8tBwz8yd4KXJ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 05 set. 2023.

CORREA DA SILVA, A. A.; GALVÃO JÚNIOR, L. da C.; COSTA, S. L. da. (2023). *Cultura do consumismo e a geração de resíduos..* In: Anais XII Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento - XII CICTED 23. Anais...Taubaté(SP) Universidade de Taubaté, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/XIICICTED23/710688-CULTURA-DO-CONSUMISMO-E-A-GERACAO-DE-RESIDUOS>. Acesso em: 09 abr. 2024.

COSTA, B. S.; DIZ, J. B. M.; OLIVEIRA, M. L. de. (2018). *Cultura de Consumismo e Geração de Resíduos*. In: Revista Brasileira de Estudos Políticos. Belo Horizonte. n. 116. pp. 159-183. jan./jun. 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbep/article/view/17607>. Acesso em: 09 abr. 2024.

DE BRITO, T. M.; TAVARES, J. L. (2016). *Pegada de carbono—análise comparativa de uma geração individual de CO₂ equivalente por metodologia da ONG Iniciativa verde®*. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campina Grande/PB 2016. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/X-010.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2024.

DE CARVALHO, G. C.; PERTEL, M.; VASQUES PACHECO, E. B. A. (2023). *Avaliação do aumento da vida útil de aterros sanitários pela incorporação de reciclagem e compostagem*. In: Actas del X Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos: Hacia la circularidad y el residuo cero. Castelló de la Plana, 20, 21 y 22 de junio de 2023. Servei de Comunicació i Publicacions, 2023. p. 71. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9094807>. Acesso em: 04 set. 2024.

DE HOLANDA BARBOSA FILHO, F. (2017). *A crise econômica de 2014/2017*. Estudos Avançados, v. 31, n. 89, p. 51-60, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/132416>. Acesso em: 15 mar. 2024.

DE OLIVEIRA SILVA, C., KONRAD, O., CALLADO, N. H., FEITOSA, A. K., & DE ARAUJO, L. G. S. (2021). *Discretização da estimativa de geração per capita e análise gravimétrica de resíduos sólidos urbanos*. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, 14(3), 1-19. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Claudionor-Silva/publication/352800324_Discretizacao_da_estimativa_de_geracao_per_capita_e_analise_gravimetrica_de_residuos_solidos_urbanos_Differentiation_of_estimates_in_per_capita_generation_and_gravimetric_analysis_of_urban_solid_waste/links/60da55c492851ca94493f5c5/Discretizacao-da-estimativa-de-geracao-per-capita-e-analise-gravimetrica-de-residuos-solidos-urbanos-Differentiation-of-estimates-in-per-capita-generation-and-gravimetric-analysis-of-urban-solid-waste.pdf. Acesso em: 21 jul. 2024.

DE MELO, V. V.; DINIZ, R. G. N., DE LIMA, S. C., LEMOS, C. F. *Análise da dificuldade de reciclagem do vidro no Brasil e a logística reversa como alternativa para minimizar os impactos ambientais*. 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu (2023). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.II-005>. Acesso em 30 Jul. 2024.

DE MIRANDA ROCHA, Gilberto; AMORA, Piera Brenda Coelho. Aspectos do Crescimento e Distribuição Populacional na Amazônia Brasileira (2000-2010). Universidade e Meio Ambiente, v. 1, n. 1, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/reumam/article/download/12330/8475>. Acesso em: 13 ago. 2024

DE SOUZA, A. S. H. (2017) *A gestão compartilhada do meio ambiente pelo artigo 225 da Constituição Federal: uma abordagem sobre a logística reversa na política nacional de resíduos sólidos*. Boletim Conteúdo Jurídico. Brasília. 2017. 35-50. Disponível em: <https://conteudojuridico.com.br/open-pdf/cj588762.pdf/consult/cj588762.pdf#page=36>. Acesso em: 24 out. 2023.

DELGADO, F. C. M. BERTUCCI LIMA, P. A. (2022). *Legislação, políticas públicas e impactos sociais e humanos da economia circular*. In: JUGEND, D.; STOLTE BEZERRA, B.; GABBAY DE SOUZA, R. Economia circular: uma rota para a sustentabilidade. 2022. Ed. Almedina Brasil. São Paulo.

EIGENHEER, E. M. (2003). *Lixo, Vanitas e Morte*. Niterói: EdUFF, 2003. 196 p. ISBN 85-228-0360-9.

_____. (2009). *A limpeza urbana através dos tempos*. Porto Alegre: Gráfica Pallotti, 2009. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31446638/ahistoriadolixo-libre.pdf?1392298588=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAhistoriadolixo.pdf&Expires=1697295254&Signature=I27odKQTr0uBrWksaTo4rJDELY1~FNeKB1dN4UCuHm~jKgKxZ2gY8jDjNBNGDQJTUocEgpnkrZapA2wGk2v92-tW1cPPNepO2oaMzzhxyza2Ba5r1vQs1FJIup~n1z9GM-22bekWdSGNC2cJPtqD5FMFCgOGccqLs8lRdjkIQX1P0V2InuAteAdeN~4PdmdirCkzjR6wNj~e1S4xzXFM8woaA-qaCZ~1IL3K7XqG8m13Bg6r9K5~9Zn0no1SSZ89oIl-051SRnymXakmfTv~3vqfDjwdebHfiiA8b~LM~HhXmBTmNhL5vuS8iG6gtHsAqTS10GDiNUI5Mb62Ehp6fg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 05 mai. 2023

FARIAS, R. M. de S. (2018). *Análise de rotas tecnológicas para gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos: caso Distrito Federal*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/33020/1/TESE%20Raliny%20Mota%20de%20Souza%20Farias.pdf>, Acesso em: 13 out. 2023.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. (2015). *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*. 2015. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe#/>. Acesso em 03 out. 2024.

FERREIRA C. F. A. ; JUCÁ, J. F. T. (2017). *Metodologia para avaliação dos consórcios de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.22, n.3, p. 513-521 maio/jun 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/vZgjCDJfyLhfvZtSBgnsSbL/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 out. 2023.

FILHO, M.J, PEREIRA, C.A.G (2000). *Concessões de serviços públicos de limpeza urbana*. Revista De Direito Administrativo, 2000. 271–292.

FIRMINO, M. J. A. C. S. (2015). *Testes de hipóteses: uma abordagem não-paramétrica*. (Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/18146>. Acesso em: 10 ago. 2024.

GADELHA, H. S. .; MARQUES, A. T. .; BEZERRA NETO, F. das C.; LIMA, M. F. de A. .; ALMEIDA, R. S. de .; MARCOLINO NETO, J. .; SOARES, J. de F. .; NÓBREGA, J. C. da S.; OLIVEIRA, J. D. S. .; MARACAJÁ, P. B. (2021). Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 11, p. e569101118843, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i11.18843. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18843>. Acesso em: 4 set. 2023.

GANDRA, Alana (2022). *Índice de reciclagem no Brasil é de apenas 4%, diz Abrelpe*. Agência Brasil, Rio de Janeiro. 05 de junho de 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-06/indice-de-reciclagem-no-brasil-e-de-4-diz-abrelpe>. Acesso em: 11 set. 2023

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (2013). Secretaria Estadual do Ambiente. *Plano estadual de resíduos sólidos - PERS*. Rio de Janeiro. 2013 Disponível em: <https://observatoriopnrs.files.wordpress.com/2014/11/rio-de-janeiro-plano-estadual-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023

_____. (2018). *Lei Complementar nº 184 de 27 de dezembro de 2018. Dispõe sobre a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, sua composição, organização e gestão, define as funções públicas e serviços de interesse comum, cria a autoridade executiva da região metropolitana do rio de janeiro e dá outras providências*. Disponível em: <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/contlei.nsf/01017f90ba503d61032564fe0066ea5b/1865e2c565e1e547832583d1005da99f?OpenDocument>. Acesso em: 26 mar. 2024.

_____. Secretaria da Casa Civil. Instituto Rio Metrópole (2023). *Plano Metropolitano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://pmetgirs.com/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

GUEDES, T. A.; JANEIRO, V.; MARTINS A. B. T.; ACORSI, C. R. L. (2005) *Projeto de Ensino: aprender fazendo estatística*, 2005. Disponível em: https://www.ime.usp.br/~rvicente/Guedes_etal_Estatistica_Descritiva.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.

GUERRA, S.; VÉRAS, R. (2021) *Novo marco regulatório do saneamento*. Revista de Direito Econômico e Socioambiental, v. 12, n. 1, p. 196-215, 2021. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8147543>. Acesso em: 04 set. 2023.

GUERRERO, A. L., MAAS, G., & HOGGLAND, W. (2013). *Solid Waste Management Challenges for Cities in Developing Countries*. *Waste Management*, 33(1), 220-232. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>. Acesso em 1 ago. 2023.

GUIMARÃES SANTOS, J. (2012). *A logística reversa como ferramenta para a sustentabilidade: um estudo sobre a importância das cooperativas de reciclagem na gestão dos resíduos sólidos urbanos*. Revista Reuna, v. 17, n. 2, p. 81-96, 2012. Disponível em: <https://reuna.emnuvens.com.br/reuna/article/view/422/486>. Acesso em 31 Jul. 2024.

GURJÃO, R.; DE ARAÚJO NETO, C. L.; DE PAIVA, W. (2020). *Avaliação do tempo de vida útil do aterro sanitário em Campina Grande–PB*. Tecnologia, investigação, sustentabilidade e os desafios do século XXI... Campina Grande: Realize Editora, p. 219-233, 2020. Disponível em:

https://www.editorarealize.com.br/editora/ebooks/conapesc/2019/PROPOSTA_EV126_MD4_ID1657_06082019120109.pdf. Acesso em: 04 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL - IBAM. (2001). *Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2023

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2010). *Censo 2010*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/resultados/tabelas_pdf/total_populacao_rio_de_janeiro.pdf. Acesso em: 2 abr. 2024.

_____. (2018). *Projeções da População*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html>. Acesso em: 2 abr. 2024.

_____. (2022). *Pesquisa de Informações Básicas Municipais – Perfil dos Municípios Brasileiros – 2020*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101871.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2023.

_____. (2024a). *Produto Interno Bruto dos Municípios. Série Histórica 2002 - 2021*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=series-historicas>. Acesso em: 08 abr. 2024.

_____. (2024b). Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais – COPIS. *Estimativas de população publicadas no DOU*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>. Acesso em: 16 set. 2024.

IPCC (2023). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em 05 set. 2024.

IWASAKA, F. Y. (2018). *Políticas públicas e economia circular: levantamento internacional e avaliação da Política Nacional de Resíduos Sólidos*. 2018. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2018. doi:10.11606/D.18.2018.tde-08102018-110158. Acesso em: 2024-10-03.

JUCÁ, J. F. T., LIMA, J. D., LIMA, D. A., MARIANO, M. O., LUCENA, L. F. L., & FIRMO, A. L. B. (2014). *Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos*

sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Jaboatão dos Guararapes, PE. Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268811770_Analise_das_Diversas_Tecnologias_de_Tratamento_e_Disposicao_Final_de_Residuos_Solidos_Urbanos_no_Brasil_Europa_Estados_Unidos_e_Japao. Acesso em: 11 mai. 2023.

JUGEND, D.; STOLTE BEZERRA, B.; GABBAY DE SOUZA, R. Economia circular: uma rota para a sustentabilidade. 2022. Ed. Almedina Brasil. São Paulo.

JUSTEN FILHO, M. Concessões de serviços públicos de limpeza urbana. (2000). Revista de Direito Administrativo, [S. l.], v. 219, p. 271–292, 2000. DOI: 10.12660/rda.v219.2000.47507. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rda/article/view/47507>. Acesso em: 13 set. 2023.

KAZA, S., YAO, L., BHADA-TATA, P., & VAN WOERDEN, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications. Disponível em: https://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=bnN_DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP13&dq=what+a+waste+2.0&ots=faOaDu83L6&sig=BmDDNc7ZQ2to-Zcen3VIGJx0LdM. Acesso em: 14 ago. 2024.

KRAUCZUK, H. M. *Reciclagem*. FESPPR Publica, v. 3, n. 1, p. 18, 2019. Disponível em: <http://publica.fesppr.br/index.php/publica/article/view/88>. Acesso em: 04 set. 2024.

KUHN, N.; BOTELHO, L. L. R.; ALVES, A. A. A. (2018). *A coleta seletiva à luz da PNRS nos estados brasileiros: uma revisão sistemática integrativa*. Revista Bras. Planej. Desenv. Curitiba, v. 7, n. 5, p. 646-669, Edição Especial Desenvolvimento Sustentável Brasil/Cuba, out. 2018. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/rbpd/article/view/7628/5714>. Acesso em: 11 set. 2023.

LACERDA, L. de M.; NUNES, A. O.; PAIVA, J. M. F. de; MORIS, V. A. da S. (2019). *Avaliação dos impactos ambientais de um processo industrial utilizando como matéria-prima policarbonatos virgem e reciclado*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental v.24 n.6. nov/dez 2019. p. 1103-1113.

LEOTTI, V. B; BIRCK, A. R.; RIBOLDI, J. (2005). *Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, AndersonDarling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação*. 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). Anais. Londrina, PR, Brasil

LIMA, J. D. (2012). *Modelos de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil* (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

LIMA, J. D., REICERT, G. A., JUCÁ, J. F. T., & FIRMO, A. L. B. (2014). *Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 19(1), 33-42. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014000100004>. Acesso em: 9 ago. 2023.

LIMEIRA PIMENTEL, C. H.; NÓBREGA, C. C.; JUCÁ, J. F. T.; PIMENTEL, U. H. O.; MARTINS, W. A. *A gestão das rotas tecnológicas de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB* (2020). *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 7063–7088, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n2-126. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/6834>. Acesso em: 10 jul. 2023.

LINS, I. B.; SILVA, M. P. da; CARNEIRO DA SILVA; A. C.; FERREIRA, S. G. (2013). *Projeção Populacional 2013-2020 para a Cidade do Rio de Janeiro: uma aplicação do método AiBi*. Instituto Pereira Passos. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/254b9c6073ae47ae9a9e02419e29e308/explore>. Acesso em: 02 abr. 2024.

LOPES, M. de M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2013). *Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação*. *Transportes*, São Paulo-SP, v. 21, n. 1 p. 59–66, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58706>. Acesso em 15 mai. 2024.

LUIZ DA SILVA, C., WEINS, N., & POTINKARA, M. (2019). *Formalizing the informal? A perspective on informal waste management in the BRICS through the lens of institutional economics*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.023>. Acesso em: 2 ago. 2023.

LUÍS PEREIRA, A.; MAIA, K. M. P. (2012). *A contribuição da gestão de resíduos sólidos e educação ambiental na durabilidade de aterros sanitários*. *Sinapse Múltipla*, Betim, 1(2), 68-80. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla/article/download/4178/5011>. Acesso em: 07 set. 2024.

MACIEL, F.; GOMES, A.E. Assimetria e curtose dos dados. Disponível em: <https://blog.proffernandamaciel.com.br/assimetria-e-curtose-dos-dados/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

MADEIRA, J. L.; SIMÕES, C. C. (1972). *Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as unidades da federação, de 1960/1980 por uma nova metodologia*. *Revista Brasileira de Estatística*, v. 33, n.129, p. 3-11, 1972.

MADEIRA, G. R.; BOTELHO, A. E.; MARIA VIEIRA, E. (2020). *Avaliação do impacto da coleta seletiva na destinação final dos resíduos sólidos urbanos na Cidade de Itabira-MG*. *Gestão de Resíduos Sólidos* Volume, p. 23. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338931801_Avaliacao_do_impacto_da_coleta_seletiva_na_destinacao_final_dos_residuos_solidos_urbanos_na_cidade_de_Itabira-MG. Acesso em 07 set. 2024.

MAIELLO, A.; BRITTO, A. L. N. P.; VALLE, T. F. (2018). *Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos*. *Revista de Administração Pública*. 52(1), 24-51. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rap/a/tn3MvKggXHXHfgxw7xZD9Xy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2023.

MALANCONI, R.; CABRAL, R. C. (2012). *Impactos e benefícios da produtividade de biogás em aterro sanitário*. RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade, v. 5, n. 2, p. 135-158, 2012. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/mqheuvzldvcofmvwnn64rgdbdu/access/wayback/http://revistarevinter.com.br/autores/index.php/toxicologia/article/download/127/343>. Acesso em 07 set. 2024.

MARIANO, M. O. H., Norberto, A. S., & Melo, F. H. F. A. (2020). *Gestão e Hierarquização de Rotas Tecnológicas de Resíduos Sólidos Urbanos. Um estudo de Caso no Brasil*. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. 13(3), 851-867. 2020.

MARQUES, D. H. F.; CANÇADO, C. J.; DE CAMPOS SOUZA, P. (2021). *Reflexões sobre o novo marco regulatório do saneamento básico: possíveis impactos no planejamento de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2021. Disponível em: https://fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/11/25.1.2021_TEXTO-PARA-DISCUSSAO-N.-15-1.pdf. Acesso em 9 ago. 2023.

MARRA, E. B. (2023) *Análise temporal de projetos de esgotamento sanitário baseada na projeção populacional e no índice de qualidade de água para o município de Barra do Pirai-RJ*. 2023.147 f. Tese (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA)) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

MELLO, C. A. B. de. (2021). *Curso de Direito Administrativo*. Imprensa: Salvador, JusPODIVM, São Paulo, Malheiros, 2021. Descrição Física: 1042 p. Referência: 2021

MENDEZ, G. de P.; MAHLER, C. F. *Obstáculos da coleta seletiva de resíduos domiciliares em uma metrópole brasileira: Estudo qualitativo*. New Trends in Qualitative Research, Oliveira de Azeméis, Portugal, v. 14, p. e588, 2022. DOI: 10.36367/ntqr.14.2022.e588. Disponível em: <https://www.publi.ludomedia.org/index.php/ntqr/article/view/588>. Acesso em: 7 dez. 2023.

MENEZES, R. O.; CASTRO, S. R.; SILVA, J. B. G.; TEIXEIRA, G. P.; SILVA, M. A. M. (2019). *Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais*. Engenharia Sanitária e Ambiental, 24, 271-282. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/gvKmZhyHR9V9WKC3QyRr7FS/#>. Acesso em: 14 mai. 2024.

MIHELIC, J. R.; ZIMMERMAN, J. B. (2018). *Engenharia ambiental: fundamentos, sustentabilidade e projeto*. ISBN: 9788521634553 Edição: 2|2018 Editora: LTC. 732 p. Referência: 2018.

MORAES, L. R. S.; BORJA, P. C. (2014). *Revisitando o conceito de saneamento básico no Brasil e em Portugal*. Revista do Instituto Politécnico da Bahia, v. 20, n. 7, p. 5-11, 2014. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34309211/RevPolitecnica20-E_p.5-11_2014-libre.pdf?1406575743=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DRevisitando_o_conceito_de_saneamento_bas.pdf&Expires=1697225932&Signature=YItfyTxb8NDS4lJnJCKWaL71Dd3g04ULOReZNV63UYrYVRtJ1UklnSFMAoVzGWPPrweP8QB~xzzmMOORn2H9NAmh1L3nN4mfkg2KyrJUseEz-UbLXHNqxi3iWdf-

F7n2~PGZ4CJm3jAgv5pPxZor5P620Jr9GIWadzPJ2XjWBEJ1WpIx3Z0GdTdiwpcSYaPZH KuzM7cJEo0NvqBZVqAexP27m19~HokUH6wkDkigbJALmBX41AHYN8kgJEEi3cYsjoxT 3lNvM~tc9vi9w9r1hPifp3rKFqHs7srE7fOSZQMwBrtJCuF~HldNk1vu4H1zyBYMzB3Mbx S~S6KNlceDSzQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 25 jul. 2023.

MOURA, R. A. D. (2018). *Consumo ou consumismo: uma necessidade humana?*. Revista da Faculdade de Direito de São Bernardo do Campo, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 14, 2018. Disponível em: <https://revistas.direitosbc.br/fdsbc/article/view/931>. Acesso em: 9 abr. 2024.

MURTHA, N.A.; CASTRO, J.E. (2015). *Uma perspectiva histórica das primeiras políticas públicas de saneamento e de recursos hídricos no Brasil*. Revista Ambiente & Sociedade. São Paulo, v. XVIII, n. 3p. 193-210. jul.-set. 2015.

NASCIMENTO NETO, P.; MOREIRA, T. A. (2010). *Política nacional de resíduos sólidos - reflexões acerca do novo marco regulatório nacional*. Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB), Rio de Janeiro, n. 15, p. 10–19, 2010. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/391. Acesso em: 9 oct. 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. (2024). *Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)*. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em 20 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – Programa para o Meio Ambiente. (2024). *O mundo deve superar a era do desperdício e transformar o lixo em recurso, segundo relatório da ONU*. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/o-mundo-deve-superar-era-do-desperdicio-e-transformar>. Acesso em 17 dez. 2024.

ÖZTUNA, D.; ELHAN, A. H. e TÜCCAR, E. (2006). *Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type 1 Error Rate and Power under Different Distributions*. Journal of Medicine Cincinnati. v.36, n. 3, p. 171–176.

PAES, L. A. B.; STOLTE BEZERRA, B.; DEUS, R. M. (2022). Economia circular e a gestão de resíduos. In: JUGEND, D.; STOLTE BEZERRA, B.; GABBAY DE SOUZA, R. Economia circular: uma rota para a sustentabilidade. 2022. Ed. Almedina Brasil. São Paulo.

PALERMO, G. C.; BRANCO, D. A. C.; FREITAS, M. A. V. (2020) *Comparação entre tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e balanço de emissões de gases de efeito estufa no município do Rio de Janeiro, RJ, Brasil*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, p. 635-648, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/cYnn5QpyW8vdFdfc4THPSFp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 ago. 2024.

PARLAMENTO EUROPEU. (2024). *Como alcançar a economia circular na UE até 2050?* Direção-Geral da Comunicação. 2024. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2021/2/story/20210128STO96607/20210128STO96607_pt.pdf. Acesso em: 17 dez. 2024.

PAULA, A. S. de. REICHERT, G. A. (2021). *Ferramenta de rotas tecnológicas. Manual do usuário. Cooperação técnica Brasil. Alemanha*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/ferramenta-de-rotas->

tecnologicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b/01.ManualdaFerramentaRotaseCustos_jun.2021.pdf. Acesso em: 02 jun. 2023

PEREIRA, M. A. T.; PEREIRA, P. J. (2018). *Estatística Aplicada à Engenharia. Notas de Aula, 2018*. São Paulo. Saraiva, 2003. 526p. Disponível em: <https://pemd.univasf.edu.br/arquivos/estatistica.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2024.

PEREIRA, M.B. (2021). *Análise de modelos e práticas de gestão de resíduos sólidos: o caso do aproveitamento energético do lixo no Brasil*. São Paulo. Editora Dialética. 2021. ISBN 978-65-252-2142-7.

PEREIRA, M. de P.; SOUZA, K. S. (2017). *Política nacional de resíduos sólidos (PNRS): avanços ambientais e viés social nos municípios de pequeno porte*. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, [S. l.], v. 17, n. 32, p. 189–210, 2017. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/17509>. Acesso em: 5 set. 2023.

PESSOA, J.; SILVA, L. da C. (2013). *Estatística Básica*. 1ª Edição. João Pessoa, 2013. ISBN 978-85-915360-2-3. Edição do Kindle.

PIMENTEL, C. H. L.; NÓBREGA, C. C.; JUCÁ, J. F. T.; PIMENTEL, U. H. O.; MARTINS, W. A. A gestão das rotas tecnológicas de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB / Management of technological routes for treatment and final destination of urban solid waste in the municipality of João Pessoa / PB. Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 7063–7088, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n2-126. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/6834>. Acesso em: 19 ago. 2024.

PINHOTTI AGUIAR, M. C. (2019). *Análise dos critérios do meio físico aplicados na definição de áreas para aterros sanitários nos processos de licenciamento ambiental: realidade e perspectivas*. 2019.

POWELL, W. W.; BROMLEY, Patricia. (1987). *The nonprofit sector: a research handbook*. Ed. Yale University Press, New Haven, CI, 1987. xiv, 464 pp., illus.

PRATES, L. F. S.; PIMENTA, C. F.; RIBEIRO, H. F. *Alternativas tecnológicas para tratamento de resíduos sólidos urbanos*. APPREHENDERE – Aprendizagem & Interdisciplinaridade, V(1), n. 2 (Edição Especial), 2019. Disponível em: <https://lataci.org/journal/index.php/apprehendere/article/view/40/49>. Acesso em: 04 set. 2024

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO – PCRJ (2010). Instituto Pereira Passos. *Índice de Desenvolvimento Social (IDS) por Áreas de Planejamento (AP), Regiões de Planejamento (RP), Regiões Administrativas (RA), Bairros e Favelas do Município do Rio de Janeiro - 2010*. Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/fa85ddc76a524380ad7fc60e3006ee97/about>. Acesso em 01 abr. 2024.

_____. (2011). *Lei Complementar n. 111, de 01 de fevereiro de 2011. Plano Diretor de desenvolvimento sustentável do Município do Rio de Janeiro*. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/smu/exibeconteudo?id=2879239>. Acesso em 04 abr. 2023.

_____. (2013). Instituto Pereira Passos. *Projeção Populacional 2013-2020 para a Cidade do Rio de Janeiro: uma aplicação do método AiBi-2065*. Rio de Janeiro. 2013. Disponível em: https://subpav.org/download/Projecao_Populacional_2013_2020.pdf. Acesso em 13 ago. 2024.

_____. (2018a). Instituto Pereira Passos. *População residente estimada e projetada, por sexo e grupos etários do Brasil, Estado do RJ e Município do Rio de Janeiro entre 1980/1991/2000-2065*. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/4270f14453ed4e6ea8407b5b53f28df5/about>. Acesso em 03 abr. 2024.

_____. (2018b). Secretaria Municipal de Urbanismo do Município do Rio de Janeiro. *Diagnóstico intersetorial integrado da cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro. Gerência de macroplanejamento. Coordenadoria de geral de planejamento e projetos. 2018. Disponível em: https://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/10402268/4259609/Relatorio_CTPD_2018_Diagnostico_Intersetorial_Integrado_Completo.pdf. Acesso em 03 abr. 2024.

_____. (2020) Companhia Municipal de Limpeza Urbana. *Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares: influências do distanciamento social imposto pela pandemia de coronavírus*. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/documents/91370/1017211/Gravimetria-distanciamentoSocial.pdf>. Acesso em 9 jun. 2023.

_____. (2021). Companhia Municipal de Limpeza Urbana. *Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos da cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: https://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/13305794/4334422/PMGIRSVERSAO12_08_21.pdf. Acesso em 9 jun. 2023.

_____. (2022a). Carioca Digital. *Contas Rio*. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/contasrio/empenhos#titulo>. Acesso em 11 set. 2023.

_____. (2022b). Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Inovação e Simplificação. *Desenvolvimento Econômico: Diagnóstico e Ações*. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: https://observatorioeconomico.rio/wp-content/uploads/sites/5/2022/12/Publicacao_Desenvolvimento-Economico-do-Rio_Diagnosticos-e-Acoes-ano-I.pdf. Acesso em 10 out. 2023.

_____. (2023a). Instituto Pereira Passos. *Total do lixo domiciliar e público coletados por ano, segundo Áreas de Planejamento (AP), Regiões de Planejamento (RP) e Regiões Administrativas (RA) no Município do Rio de Janeiro entre 1990-2022*. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/0678f87213aa4c96b31c8ebe2e965a9c/about>. Acesso em 11 set. 2023.

_____. (2023b). Instituto Pereira Passos. *Total do lixo recolhido através de coleta seletiva e total recuperado por tipo de material no Município do Rio de Janeiro entre 2002-2021*. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/PCRJ::total-do-lixo-recolhido-atrav%C3%A9s-de-coleta-seletiva-e-total-recuperado-por-tipo-de-material-no-munic%C3%ADpio-do-rio-de-janeiro-entre-2002-2021/about>. Acesso em 11 set. 2023.

_____. (2023c). Instituto Pereira Passos. *Indicadores de Resíduos Sólidos Urbanos: coleta no Município do Rio de Janeiro entre 2002-2021*. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/PCRJ::indicadores-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos-urbanos-coleta-no-munic%C3%ADpio-do-rio-de-janeiro-entre-2002-2021/about>. Acesso em 11 set. 2023.

_____. (2023d). Instituto Pereira Passos. *População residente, segundo as Áreas de Planejamento (AP) e Regiões Administrativas (RA), em 1991/2000/2010*. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/6608f60b6b9741b5998fc4fd5e6a7e14/about>. Acesso em 02 abr. 2024.

_____. (2024a). Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Inovação e Simplificação. *Censo Demográfico 2022 - População e domicílios por Bairros, RAs e APs*. Rio de Janeiro. 2024. Disponível em: <https://www.data.rio/pages/rio-em-sntese>. Acesso em 01 abr. 2024.

_____. (2024b). Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Inovação e Simplificação. *Rio em Síntese*. Rio de Janeiro. 2024. Disponível em: <https://www.data.rio/pages/rio-em-sntese>. Acesso em 01 abr. 2024.

POWER REIS, M. F. (2005). *Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7653>. Acesso em: 06 set. 2024.

RIBEIRO, H.; BESEN, G. R. (2007). *Panorama da Coleta Seletiva no Brasil: Desafios e Perspectivas a partir de Três Estudos de Caso*. Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente - v.2, n.4, Artigo 1, ago 2007.

RIBEIRO DA SILVA, J. (2002). *Os esgotos do Rio de Janeiro. História do sistema de esgotos sanitários da cidade do Rio de Janeiro 1857 – 1997 Volume I*. (2002). Sociedade de Engenheiros e Arquitetos do Estado do Rio de Janeiro, 2002.

LUIZ DA SILVA, C., WEINS, N., & POTINKARA, M. (2019). *Formalizing the informal? A perspective on informal waste management in the BRICS through the lens of institutional economics*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.023>. Acesso em: 2 ago. 2023.

SILVA, W. K. A. S.; TAGLIAFERRO, E. R. (2021). *Aterro sanitário - a engenharia na disposição final de resíduos sólidos / Landfill - engineering in the final disposal of solid waste*. Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 12216–12236, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n2-037. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/24153>. Acesso em: 25 mai. 2023.

SILVA DA SILVA, C.; NASCIMENTO, L. F. (2017). *25 anos da coleta seletiva de Porto Alegre: história e perspectivas*. Revista Gestão e Desenvolvimento, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 33–50, 2017. DOI: 10.25112/rgd.v14i2.1135. Disponível em: <https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistagestaoedesenvolvimento/article/view/1135>. Acesso em: 10 out. 2023.

SIQUEIRA, T. M. O. D.; ASSAD, M. L. R. C. L. (2015). *Compostagem de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo (Brasil)*. *Ambiente & Sociedade*, 18(4), 243-264. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/SxNJJsgR58y8D4HhY3JZPNm/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 07 set. 2024.

SOUSA, R. R.; PEREIRA, R. D.; CALBINO, D. (2019). *Memórias do lixo: luta e resistência nas trajetórias de catadores de materiais recicláveis da ASMARE*. *REAd. Revista Eletrônica de Administração (Porto Alegre)*, v. 25, n. 3, p. 223–246, set. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/read/a/N6fJtHRcGgCbdrvWmSvSt3L/?lang=pt#>. Acesso em 27 mar. 2024.

SOUZA FARIAS, R. M. (2018). *Análise de rotas tecnológicas para gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos: caso Distrito Federal*. UFPE 2018. 205 folhas, Il. e Tabs. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33020>. Acesso em: 12. ago, 2024.

TAVARES, J. M. da S.; NETO, C. P. ASPECTOS DO CRESCIMENTO POPULACIONAL: ESTIMATIVAS E USO DE INDICADORES SÓCIO DEMOGRÁFICOS. *Formação (Online)*, [S. l.], v. 27, n. 50, 2020. DOI: 10.33081/formacao.v27i50.5928. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/5928>. Acesso em: 13 ago. 2024.

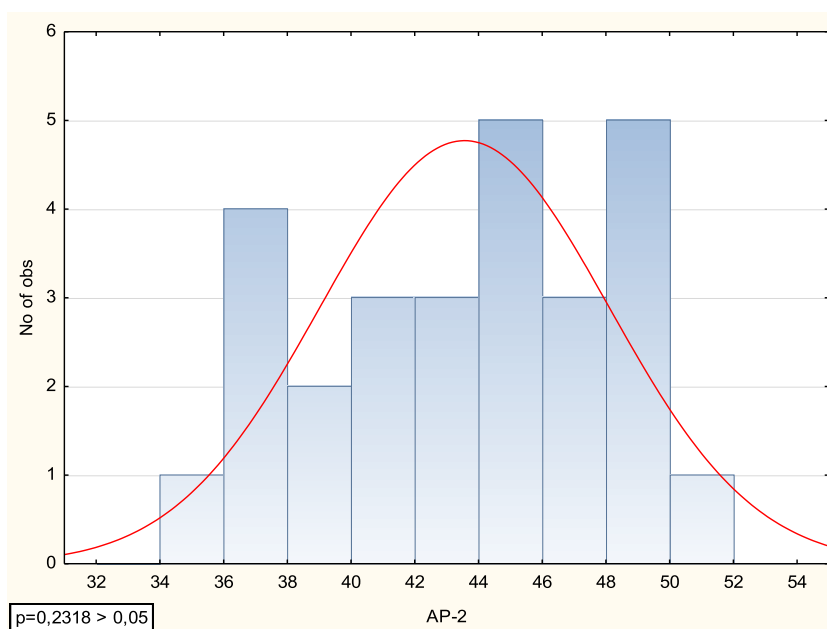
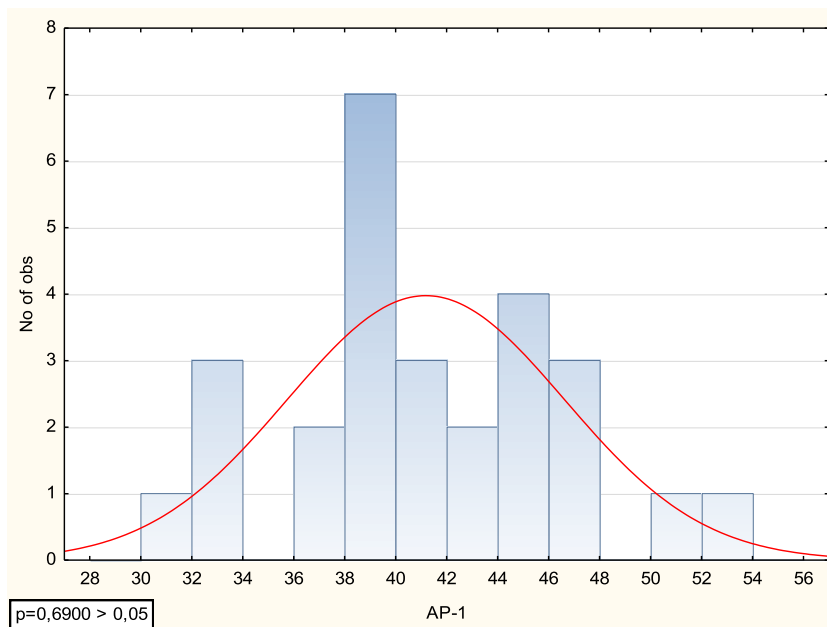
TERRANOVA, C.; BIAZINI FILHO, F.L. (2022). Planares: análise e sugestões de aperfeiçoamentos. *Rev. Tecnol. Soc., Curitiba*, v. 18, n. 53, p. 72-92, seção temática, 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/15795>. Acesso em: 09 out. 2023.

TORRES, V.A., LANGE, L. C. (2022). *Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valorização energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil*. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental* 27 (1). p.25-30. jan-feb 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210221>. Acesso em: 25 mai. 2023.

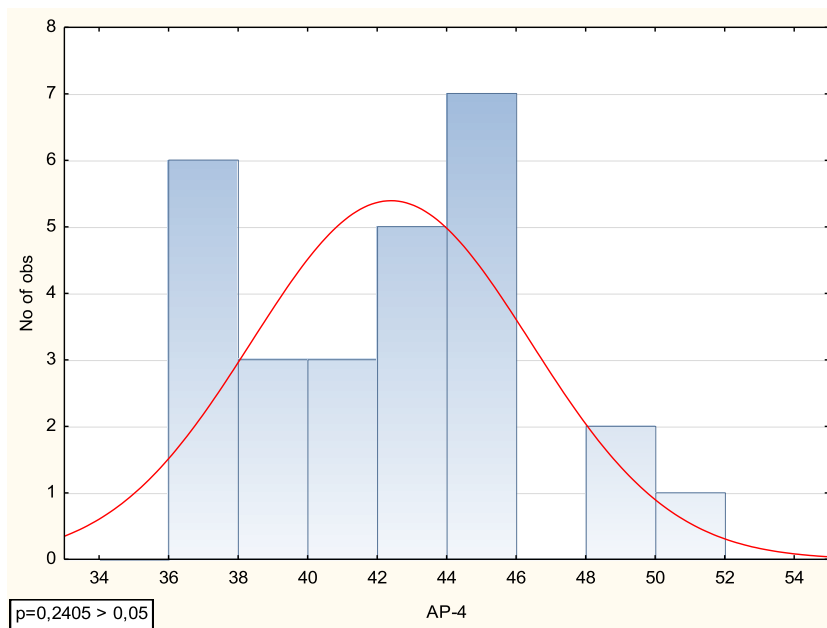
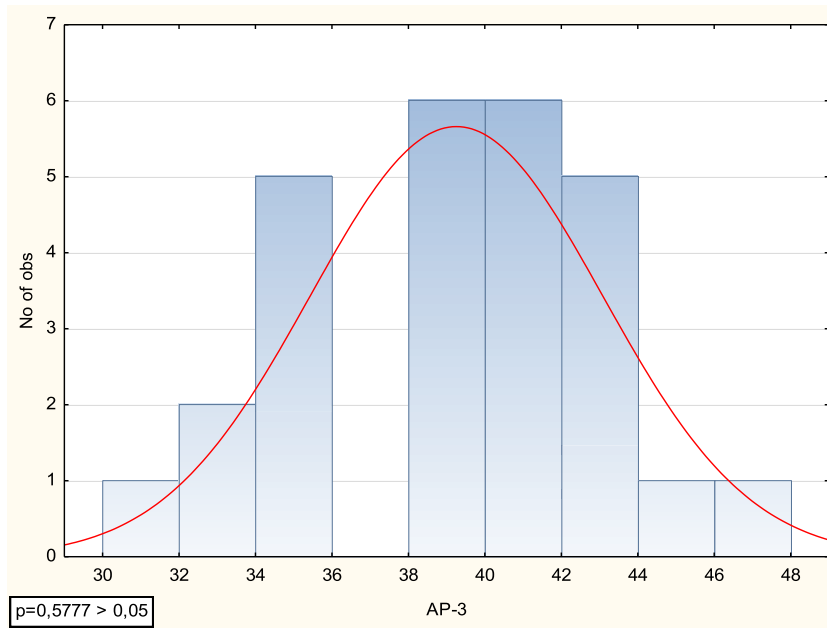
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS TESTES DE NORMALIDADE DOS DADOS DE GRAVIMETRIA

APÊNDICE A1 - Resultados do teste de normalidade segundo APs – grupo Recicláveis

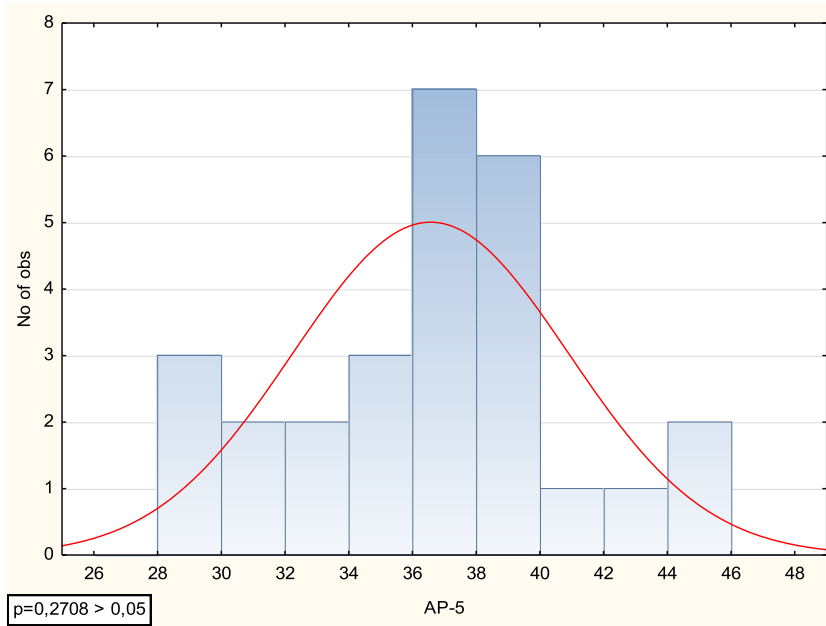
(continua)



(continuação)

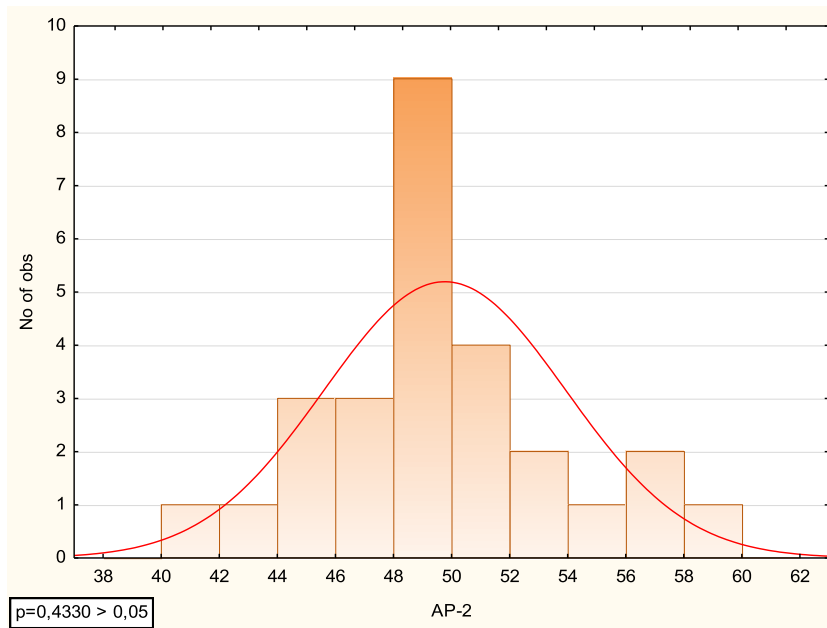
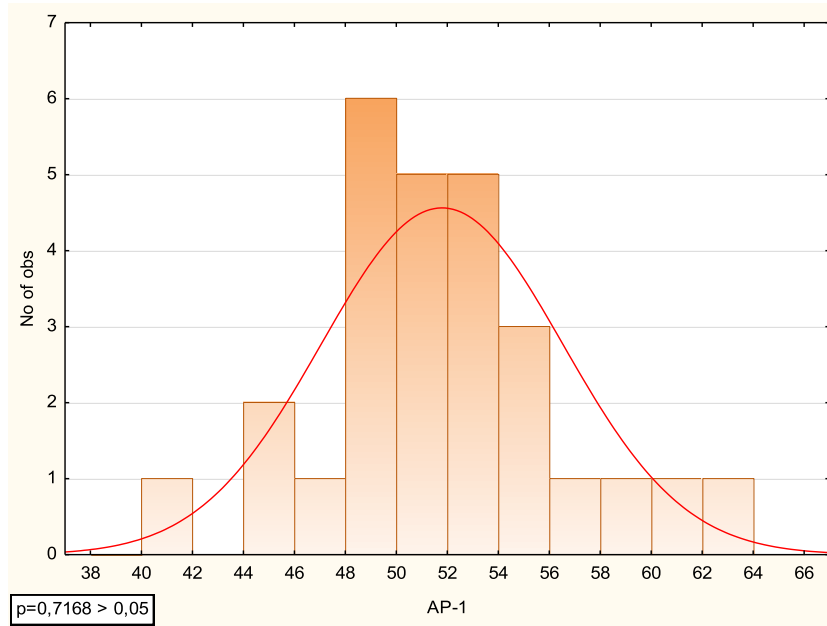


(conclusão)

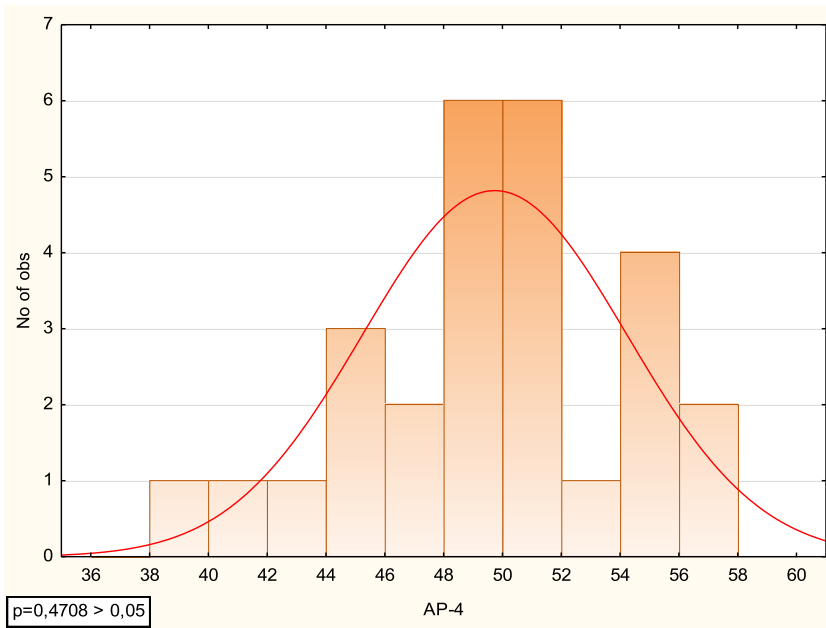
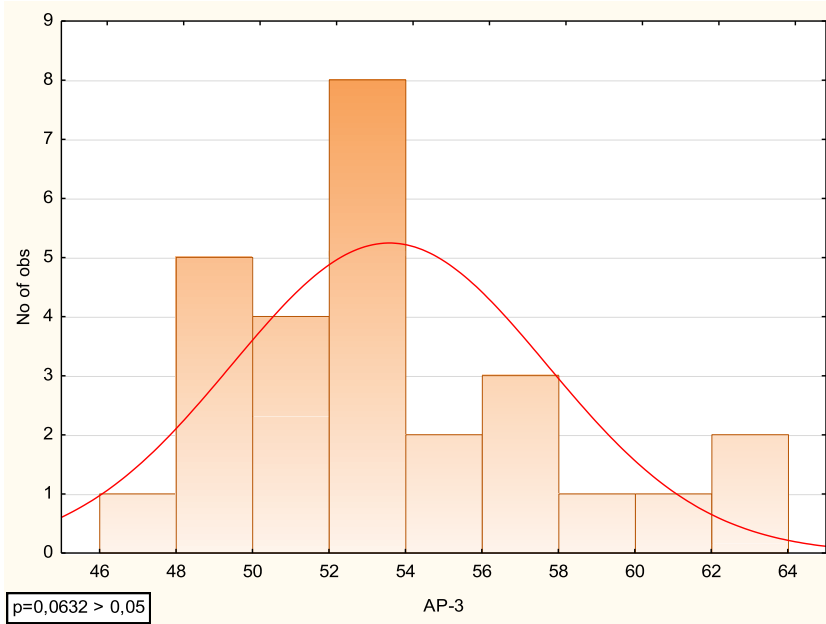


APÊNDICE A2 - Resultados do teste de normalidade segundo APs – grupo Orgânicos

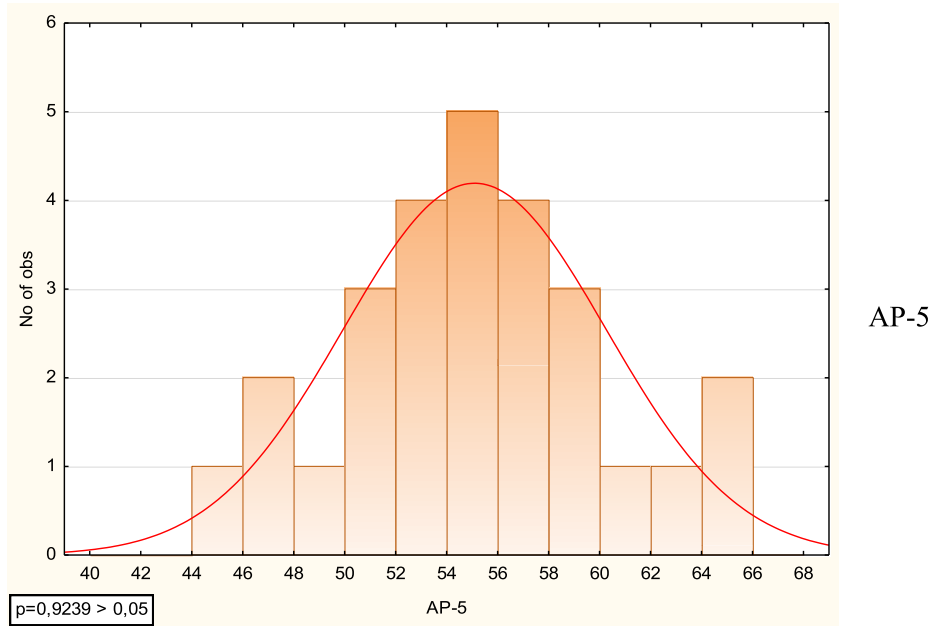
(continua)



(continuação)



(conclusão)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024