

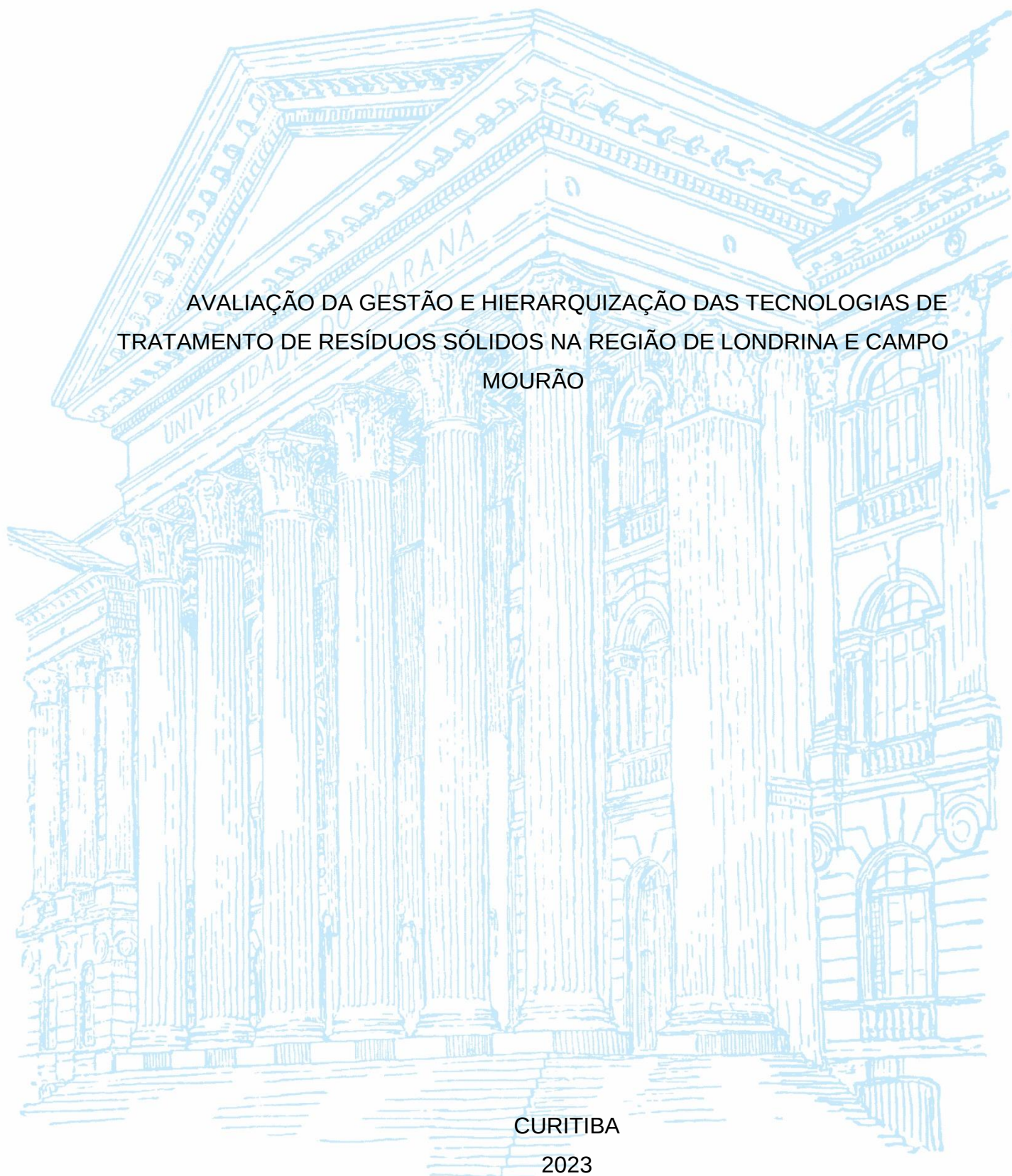
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ARIANE APARECIDA CRUZ DA SILVA

AVALIAÇÃO DA GESTÃO E HIERARQUIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE
TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA REGIÃO DE LONDRINA E CAMPO
MOURÃO

CURITIBA

2023



Ariane Aparecida Cruz da Silva

AVALIAÇÃO DA GESTÃO E HIERARQUIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE
TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA REGIÃO DE LONDRINA E CAMPO
MOURÃO

TCC apresentada ao curso de graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Ana Flávia Locateli Godoi

CURITIBA

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

ARIANE APARECIDA CRUZ DA SILVA

AVALIAÇÃO DA GESTÃO E HIERARQUIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA REGIÃO DE LONDRINA E CAMPO MOURÃO

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 87, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): Ana Flávia Locateli Godoi
Ana Flávia Locateli Godoi
Engenharia Ambiental / UFPR

Co-orientador(a): _____
Nome do(a) Professor(a) Co-orientador(a)
Departamento / Instituição do(a) Co-orientador(a)

Membro(a) 1: Cynara de L. da N. Cunha
Cynara de L. da N. Cunha
Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2: Letícia Uba da Silveira Maraschin
Letícia Uba da Silveira Maraschin
Ministério Público do Estado do Paraná / MPPR

Membro(a) 3: _____
Nome do(a) Membro(a) Examinador 3
Departamento / Instituição do(a) Membro(a) 3

Curitiba, 11 de dezembro de 2023.

“Aos meus pais, que me apoiaram desde o começo desta grande jornada”

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente pela oportunidade de estudar em uma universidade pública de renome, como a Universidade Federal do Paraná. Gostaria de expressar a minha gratidão aos meus pais, Paulo e Lilian, que desde o início me incentivaram, forneceram suporte e apoio emocional sempre que precisei. Sou grata também à minha irmã Yasmin, que durante o período remoto se dedicou a criar um ambiente semelhante a uma sala de aula em nossa casa.

Não posso deixar de agradecer à professora Ana Flávia Locateli Godoi, que além de me orientar, mudou completamente a minha perspectiva em relação aos resíduos sólidos, mostrando constantemente que o que chamamos de lixo pode ser uma oportunidade valiosa. Sou extremamente grata por seus ensinamento e inspiração.

Também gostaria de estender meu agradecimento às amigas que fiz ao longo deste curso. Graças a essas amigas tenho inúmeras histórias memoráveis dentro do Centro Politécnico. Cada momento compartilhado contribuiu para uma experiência enriquecedora.

Por fim, reconheço e aprecio a contribuição de todos os professores e orientadores que desempenharam um papel significativo em minha jornada acadêmica. Sem o apoio de cada uma de vocês, eu não teria alcançado meus objetivos. Obrigada a todos que fizeram parte da minha jornada.

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos podem gerar impactos ambientais significativos na ausência de uma gestão eficiente. Por isso, ações dos órgãos fiscalizadores, entre eles o Ministério Público, são imprescindíveis. Ao analisar os dados das Operações Percola II e III nas regiões de Londrina e Campo Mourão, no Estado do Paraná, observou-se o descarte inadequado de materiais recicláveis em aterros e a falta de tratamento da fração orgânica. Diante desse cenário, este estudo investigou os custos associados à implementação de tecnologias como Usina de Triagem, Composteira, Digestor Anaeróbio e Aterro Sanitário, visando mitigar problemas relacionados a resíduos recicláveis, orgânicos e rejeitos. Para facilitar a análise, foi realizada a regionalização agrupando municípios próximos, dado que muitos possuem população inferior a 50 mil habitantes. O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) permitiu avaliar critérios como economia, eficiência e capacidade de processamento, destacando a composteira como uma opção vantajosa em relação ao digestor anaeróbio, principalmente devido ao menor custo associado.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos; Tratamento de Resíduos; Método AHP

ABSTRACT

Urban solid waste can generate significant environmental impact in the absence of efficient management. Therefore, actions by supervisory bodies, including the Public Ministry, are essential. Analyzing data from Operação Percola II and III in the regions of Londrina and Campo Mourão, in the state of Paraná, revealed improper disposal of recyclable materials in landfills and a lack of treatment for organic fractions. In this context, this study investigated the costs associated with implementing Technologies such as Sorting Plant, Composting, Anaerobic Digester and Sanitary Landfill, aiming to mitigate issues related to recyclable, organic, and reject waste. To facilitate the analysis, regionalization was conducted by grouping nearby municipalities, given that many of them have populations below 50 thousand inhabitants. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method allowed the evaluation of criteria such as economy, efficiency, and processing capacity, highlighting composting as an advantageous option compared to the anaerobic digester, mainly due to lower associated cost.

Keywords: Solid Waste; Waste Treatment; AHP Method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REGIÕES PROPOSTAS PELO PERS/PR - 2018	20
FIGURA 2 – CONSÓRCIOS INTERMUNICIPAIS DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EXISTENTES NO ESTADO DO PARANÁ	23
FIGURA 3 - FLUXO DE TRANSPORTE DE RESÍDUOS	24
FIGURA 4 – ESTRUTURA DE CONSTRUÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO	26
FIGURA 5 - ESTRUTURA DO MÉTODO AHP	35
FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS VISTORIADOS PELA OPERAÇÃO PERCOLA II, ESTADO DO PARANÁ	40
FIGURA 7 – DESCARTE IRREGULAR NO MUNICÍPIO CENTENÁRIO DO SUL – PR	41
FIGURA 8 – ÁREA DE DESPEJO DA FRAÇÃO ORGÂNICA SEM TRATAMENTO NO MUNICÍPIO DE BOM SUCESSO - PR	41
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DA OPERAÇÃO PERCOLA III	43
FIGURA 10 - REGIONALIZAÇÃO DA REGIÃO DE LONDRINA	45
FIGURA 11 - REGIONALIZAÇÃO DA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO	45
FIGURA 12 - OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DE RSU DA REGIÃO DE LONDRINA E CAMPO MOURÃO	46

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COLETA SELETIVA NOS MUNICÍPIOS DE DESTINAÇÃO FINAL ...	43
GRÁFICO 2 – TRATAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA NOS MUNICÍPIOS DE DESTINAÇÃO FINAL	44

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - REGIÕES COM PRIORIDADES NA GESTÃO DE RESÍDUOS.....	21
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DO RSU NO ESTADO DO PARANÁ.....	25
TABELA 2 - GERAÇÃO MÉDIA DE RSU POR HABITANTES NO ESTADO DO PARANÁ	25
TABELA 3 – VALORES PARA COMPARAÇÃO NO MÉTODO AHP	34
TABELA 4 – ÍNDICE RANDÔMICO DE CONSISTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ORDEM DA MATRIZ.....	36
TABELA 5 – GERAÇÃO DE RSU POR DIA EM CADA REGIÃO POR DIA.....	47
TABELA 6 – MATRIZ DE JULGAMENTO DOS CRITÉRIOS.....	49
TABELA 7 - CUSTO DO CAPEX E OPEX ATERRO SANITÁRIO POR PORTE	49
TABELA 8 – CUSTO TOTAL DA USINA DE TRIAGEM PARA REGIÃO DE LONDRINA POR ANO	50
TABELA 9 - CUSTO TOTAL DA USINA DE TRIAGEM PARA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO.....	50
TABELA 10 - CUSTOS DA COMPOSTAGEM DA REGIÃO DE LONDRINA POR ANO	51
TABELA 11 – CUSTOS TOTAL DA COMPOSTAGEM DA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO.....	51
TABELA 12 – CUSTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO NA REGIÃO DE LONDRINA POR ANO.....	52
TABELA 13 – CUSTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO DA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO.....	52
TABELA 14 – CUSTO DO ATERRO REGIÃO DE LONDRINA POR ANO	53
TABELA 15 - CUSTO DO ATERRO NA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO	53
TABELA 16 – MATRIZ DE JULGAMENTO EM RELAÇÃO A ECONOMIA.....	54
TABELA 17 – MATRIZ DE JULGAMENTO EM RELAÇÃO A EFICIÊNCIA	55
TABELA 18 – MATRIZ DE JULGAMENTO EM RELAÇÃO A CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO	55
TABELA 19 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DOS CRITÉRIOS	56
TABELA 20 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DE ECONOMIA.....	56
TABELA 21 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DE EFICIÊNCIA	56

TABELA 22 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO	56
TABELA 23 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DOS CRITÉRIOS.....	57
TABELA 24 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DE ECONOMIA	57
TABELA 25 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DE EFICIÊNCIA.....	57
TABELA 26 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO	57
TABELA 27 – PRIORIDADE DOS CRITÉRIOS	57
TABELA 28 – PRIORIDADE PARCIAL DE ECONOMIA.....	58
TABELA 29 – PRIORIDADE PARCIAL DE EFICIÊNCIA	58
TABELA 30 – PRIORIDADE PARCIAL DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO.....	58
TABELA 31 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DOS CRITÉRIOS COM AS PRIORIDADES	58
TABELA 32 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DE ECONOMIA COM AS PRIORIDADES	58
TABELA 33 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DE EFICIÊNCIA COM AS PRIORIDADES	59
TABELA 34 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO COM AS PRIORIDADES.....	59
TABELA 35 – VALORES DE λ PARA O CÁLCULO DE COERÊNCIA DE JULGAMENTOS	59
TABELA 36 – VALORES DO R.C.	59
TABELA 37 – MULTIPLICAÇÃO DA PRIORIDADE DOS CRITÉRIOS COM AS PRIORIDADES DAS ALTERNATIVAS DE CADA COLUNA.....	60
TABELA 38 – PRIORIDADE FINAL DAS ALTERNATIVAS	60
TABELA 39 - GERAÇÃO DE RSU GERADO NA REGIÃO DE LONDRINA	67
TABELA 40 - GERAÇÃO DE RSU GERADO NA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO ..	70

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABETRE	- Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes
ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
AHP	- <i>Analytic Hierarchy Process</i>
CAOPMAHU	- Centro de Apoio Operacional às Promotorias do Meio Ambiente e de Habitação e Urbanismo
CAPEX	- Despesas de Capital
CEMPRE	- Compromisso Empresarial para Reciclagem
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
GAEMA	- Grupo de Atuação Especializada em Meio Ambiente, Habitação e Urbanismo
IAT	- Instituto Água e Terra
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA	- Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
MP	- Ministério Público
OPEX	- Despesas Operacionais
PERS	- Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSM	- Resíduos Sólidos Municipais
RSS	- Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
SEDEST	- Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável
SNIS	- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)	18
2.2 PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PERS).....	19
2.3 PANORÂMA DO ESTADO DO PARANÁ.....	22
2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO	25
2.4.1 Aterro Sanitário.....	25
2.4.2 Digestores Anaeróbios	27
2.4.3 Compostagem	29
2.4.4 Reciclagem.....	31
2.5 MÉTODO DECISÓRIO.....	33
2.5.1 Método Analytic Hierarchy Process (AHP)	33
2.5.2 Escolha de tratamento de Resíduos.....	36
3 METODOLOGIA	39
3.1 OPERAÇÃO PERCOLA	39
3.1.1 Operação Percola II (2021)	39
3.1.2 Operação Percola III (2023)	42
3.2 REGIONALIZAÇÃO.....	44
3.3 CRIAÇÃO DE CENÁRIOS	46
3.4 VALORES DE GERAÇÃO DE RSU E DOS CUSTOS DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO.....	47
3.5 USINA DE TRIAGEM	47
3.6 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS.....	48
3.7 DESTINAÇÃO DE REJEITOS.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 CUSTOS DA USINA DE TRIAGEM	50
4.2 CUSTOS DA COMPOSTAGEM	51
4.3 CUSTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO.....	52
4.4 CUSTOS DO ATERRO SANITÁRIO	53

4.5 MÉTODO AHP	54
4.5.1 Economia	54
4.5.2 Eficiência	54
4.5.3 Capacidade de Processamento	55
4.5.4 Verificação das prioridades pelo método AHP	55
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE 1 – GERAÇÃO DE RSU NA REGIÃO DE LONDRINA E CAMPO MOURÃO	67

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, associado com as mudanças no estilo de vida e nos padrões de produção e consumo, resultou no aumento significativo da quantidade de resíduos sólidos gerados (GOUVEIA, 2012). Isso fica evidente ao observarmos as estimativas da geração global de resíduos sólidos, que em 2016, foi de cerca de 2 bilhões de toneladas, e cujas projeções para 2050 indicam um aumento para 3,4 bilhões de toneladas (KAZA et al., 2018).

De acordo com os dados do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), estima-se que no Brasil, em 2021, houve uma coleta de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) corresponde a 65,6 milhões de toneladas. Em relação à destinação final, 73,3% dos resíduos são encaminhados para os aterros sanitários, 15% para lixões e 11,8% para aterros controlados (SNIS, 2021). Na América Latina, mais da metade do RSU são compostos por matérias de origem orgânica e resíduos alimentícios. Este material, sendo tratado de maneira adequada, podem trazer benefícios para a população, como fertilizantes, produção de energia e combustível. Entretanto, quando são direcionados para lixões, perde-se o potencial de geração de subprodutos e aumenta os custos para o tratamento de lixiviados e gases de efeitos estufa (ONU, 2017). Por isso, é fundamental garantir uma gestão eficiente e ambientalmente correta dos resíduos.

A implementação de um sistema eficaz de gestão de resíduos sólidos é fundamental, pois faz parte dos direitos humanos à saúde. Em países com menos recursos há um notável progresso a ser alcançado. Algumas práticas prejudiciais, como queimar lixo ao ar livre e descartar de forma inadequada, precisam ser eliminadas para proteger as pessoas e o meio ambiente. O objetivo é que, no futuro, possamos ver o lixo não apenas como um problema, mas como parte da solução (ISWA, 2021).

Nesse contexto, o trabalho é uma contribuição para a tomada de decisão em relação à aquisição de tecnologias para o tratamento de resíduos sólidos urbanos. Busca-se recomendar soluções acessíveis, viáveis e eficientes que possam ser implementadas em boa parte dos municípios do estado do Paraná. Com isso, pretende-se proporcionar uma otimização dos recursos financeiros e tecnológicos, garantindo que sejam aplicados em soluções que estejam em acordo com as demandas dos municípios, promovendo uma gestão sustentável e eficaz.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerado e identificar algumas alternativas para gestão do tratamento dos resíduos sólidos urbanos em duas regiões do estado do Paraná.

1.1.2 Objetivos específicos

- Fazer um levantamento sobre as principais tecnologias de tratamento de resíduos;
- Obter dados sobre as populações e o volume de resíduos sólidos gerados por alguns municípios do estado do Paraná;
- Fazer um cruzamento de dados para possibilitar a orientação da tecnologia mais adequada para a região para o tratamento da fração orgânica, através da matriz *Analytic Hierarchy Process* (AHP);
- Comparar as tecnologias e escolher a melhor com base em custo, eficiência e capacidade de processamento em relação a fração orgânica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário primeiramente buscar instrumentos legais relacionados aos resíduos sólidos em nível nacional e estadual, a fim de apoiar com maior precisão os objetivos da pesquisa. Através da revisão bibliográfica também foi possível identificar as tecnologias existentes, entender como funcionam e analisar suas vantagens e desvantagens. Esses aspectos são de extrema importância, pois orientarão as cidades paranaenses na escolha adequada dos métodos de tratamento.

2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

A Lei nº 12.305, de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto Federal nº 7.404, de 2010 e do Decreto Federal nº 10.936, de 2022 (BRASIL, 2010). Esta lei estabelece diretrizes para a gestão integrada dos resíduos sólidos e seu adequado gerenciamento. Um dos princípios incluídos na PNRS é a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e a sociedade. Nesse contexto, o regulamento destaca o papel do poder público na promoção da cooperação técnica e financeira entre o setor público e empresarial, visando a implementação de uma gestão integrada. O poder público é amplamente citado na PNRS, uma vez que, de acordo com o Art. 25 da lei, é um dos responsáveis pela efetividade das ações necessárias para assegurar a implementação e o cumprimento dos objetivos (BRASIL, 2010).

A PNRS possui um destaque significativo no desenvolvimento e adoção de tecnologias limpas, visando minimizar os impactos ambientais decorrentes da gestão dos resíduos. Conforme estabelecido no Art. 9, sugere-se uma ordem de prioridade no gerenciamento dos resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento adequado dos resíduos sólidos e uma disposição final adequada dos rejeitos. Além disso, o mesmo artigo ressalta uso de tecnologias que permitam o reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, como a recuperação energética, desde que haja comprovação de viabilidade técnica e ambiental. Em relação ao tratamento dos resíduos, é importante ressaltar que o Art. 17 destaca os requisitos essenciais para a elaboração dos Planos Estaduais de Resíduos Sólidos (PERS), tais como a identificação dos principais fluxos de resíduos no Estado, a identificação de

regiões propícias para a implantação de unidades de tratamento, bem como outras condições relevantes para uma gestão eficaz dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Portanto, a PNRS tem como propósito fundamental fornece uma base para a criação de um gerenciamento adequado de resíduos sólidos no Brasil, contribuindo para a preservação do meio ambiente e a melhoria da qualidade de vida da população (BRASIL, 2010).

2.2 PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PERS)

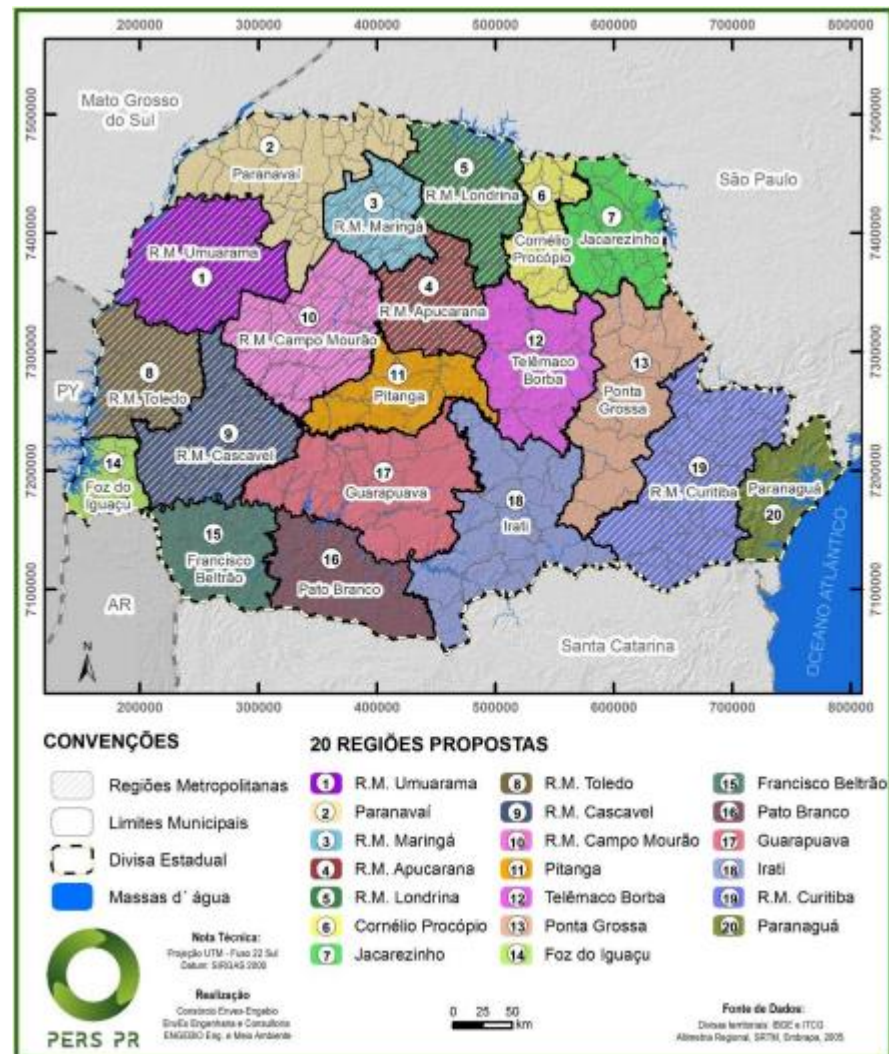
Com base nas diretrizes da PNRS, o estado do Paraná possui um PERS, sendo o último divulgado em 2018. O plano estadual paranaense é criado com base em cinco diretrizes fundamentais. Em primeiro lugar, busca-se reestruturar o sistema de gestão de resíduos sólidos no estado, com o objetivo de aprimorar sua efetividade. Em segundo, o plano pretende reduzir a geração de resíduos sólidos, através da educação ambiental e alternativas de produção sustentável. A terceira diretriz é relacionada a redução dos impactos negativos decorrentes da disposição final de resíduos sólidos no ambiente, com o propósito de promover a preservação ambiental e saúde pública. As duas últimas diretrizes têm a finalidade de apoiar financeiramente e incentivar a modernização do sistema de gestão de resíduos sólidos, incluindo a etapa de tratamento (PARANÁ, 2018).

Com fundamento nas diretrizes, o plano elaborou algumas estratégias. Uma delas é a criação de orientações para uma gestão eficiente e sustentável dentro dos municípios. Além disso, o plano traz como estratégia o incentivo da implementação de práticas de compostagem e geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos. Outra estratégia que vale destacar é a promoção de uma gestão compartilhada por meio de estabelecimento de consórcios entre municípios, visando a otimização dos recursos (PARANÁ, 2018).

No estado do Paraná foi adotada a estratégia de estabelecer 20 Regiões de Planejamento para a gestão dos resíduos sólidos, visando a implementação da PNRS (FIGURA 1). Essa divisão levou em consideração diversos critérios, como aspectos sociais, econômicos, político-institucionais e de infraestrutura. Identificou-se a necessidade de promover uma ação conjunta na definição de arranjos tecnológicos e locais para as unidades de tratamento, transbordo e disposição final dos RSU, uma vez que mais de 90% dos municípios paranaenses possuem menos de 50 mil

habitantes, o que dificulta a viabilização financeira dos serviços relacionados aos RSU. Essa abordagem busca otimizar recursos e garantir uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos no estado (PARANÁ, 2018).

FIGURA 1 – REGIÕES PROPOSTAS PELO PERS/PR - 2018



FONTE: PERS - PR (2018).

A fim de enfrentar os desafios identificados para aprimorar a gestão de resíduos no estado do Paraná, foram estabelecidas metas com um horizonte de planejamento de 20 anos, subdividido em quatro períodos de prazo. Uma das metas é a redução de 10% da taxa de geração *per capita* de resíduos, diferenciada de acordo com o porte dos municípios. Além disso, tentar reduzir 30% da quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários. Também é parte das metas ter 100% das áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos identificados no Plano de Gerenciamento de Resíduos recuperadas. Para atingir essas metas, foram

elaborados programas que estão diretamente alinhados com as diretrizes do PERS, como o Programa de Apoio e Acompanhamento de Gestão Municipal de Resíduos Sólidos que contém o subprograma de Incentivo à Gestão Regionalizada de Resíduos Sólidos. Este subprograma visa fornecer suporte para as regiões de acordo com as prioridades relacionadas a fragilidade econômica e social, como mostra o QUADRO 1 (PARANÁ, 2018).

QUADRO 1 - REGIÕES COM PRIORIDADES NA GESTÃO DE RESÍDUOS

REGIÃO	PRIORIDADE
RM UMUARAMA	1
PARANAVAÍ	2
RM APUCARANA	3
PITANGA	4
GUARAPUAVA	5
PARANAGUÁ	6
CORNÉLIO PROCÓPIO	7
RM CASCAVEL	8
JACAREZINHO	9
RM CAMPO MOURÃO	10
FRANCISCO BELTRÃO	11
RM TOLEDO	12
IRATI	13
TELÊMACO BORBA	14
PATO BRANCO	15
PONTA GROSSA	16
RM MARINGÁ	17
RM LONDRINA	18
FOZ DO IGUAÇU	19
RM CURITIBA	20

FONTE: PERS/PR (2018).

Com o objetivo de fomentar o aproveitamento energético dos resíduos, também foi publicada a Resolução Conjunta SEDEST/IAT 09, de 01 de junho de 2022. Essa resolução estabelece critérios para o estudo de novas tecnologias na gestão de resíduos, visando abranger municípios de pequeno e médio porte, e, consequentemente, encerrando a operação de aterros sanitários. Essas soluções tecnológicas serão priorizadas para aqueles municípios que adotam a gestão por meio de consórcios ou outros modelos de cooperação (SEDEST/IAT, 2022). Essas estratégias são fundamentais para a implementação do PERS do estado do Paraná, promovendo uma gestão mais sustentável, consciente e eficiente dos resíduos sólidos no estado.

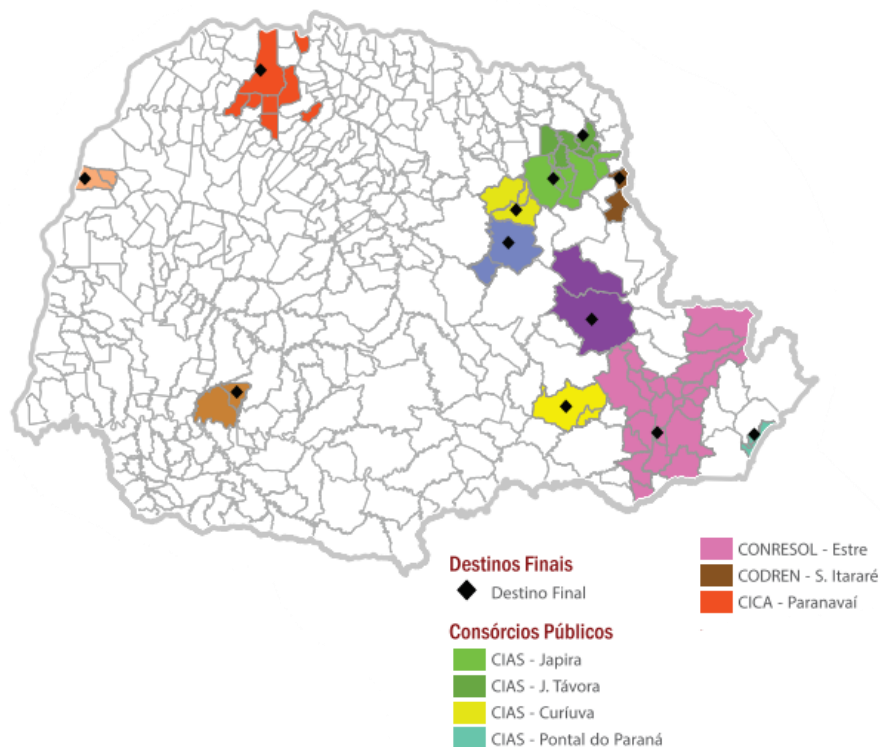
2.3 PANORÂMA DO ESTADO DO PARANÁ

Conforme o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PARANÁ, 2018), em 2017, o estado gerou 3,5 milhões de toneladas de RSU. Os serviços oferecidos pelo estado não abrangem integralmente todas as áreas municipais. Em relação à coleta regular de RSU, embora tenha alcançado 100% de cobertura nas áreas urbanas, em algumas regiões, especialmente as áreas rurais, ainda enfrentam deficiência na coleta. Quanto à reciclagem, apenas 74% dos municípios implementaram algum tipo de coleta seletiva, e 65% realizam triagem de recicláveis. Os números relacionados à compostagem são baixos em comparação a outros dados, com apenas 12% dos municípios praticando a compostagem de resíduos orgânicos (PARANÁ, 2018).

No que diz respeito à disposição final, visando evitar riscos à saúde pública e impactos ambientais, pouco mais da metade dos municípios do estado apresentam uma disposição final adequada. Há um total de 236 unidades de disposição final, distribuídas entre categorias privadas, públicas e economia mista. Das unidades pública, que somam 217, 149 são consideradas inadequadas para operação (PARANÁ, 2018).

Uma das propostas indicadas pelo PERS – PR é a implementação de Consórcios Intermunicipais. Isso se tem como base no fato de que a maioria dos municípios no estado do Paraná possui uma população inferior a 50 mil habitantes. Atualmente, o Paraná conta com sete consórcios intermunicipais (FIGURA 2) dedicados à disposição final de RSU, cobrindo aproximadamente 33% da população estadual (PARANÁ, 2018).

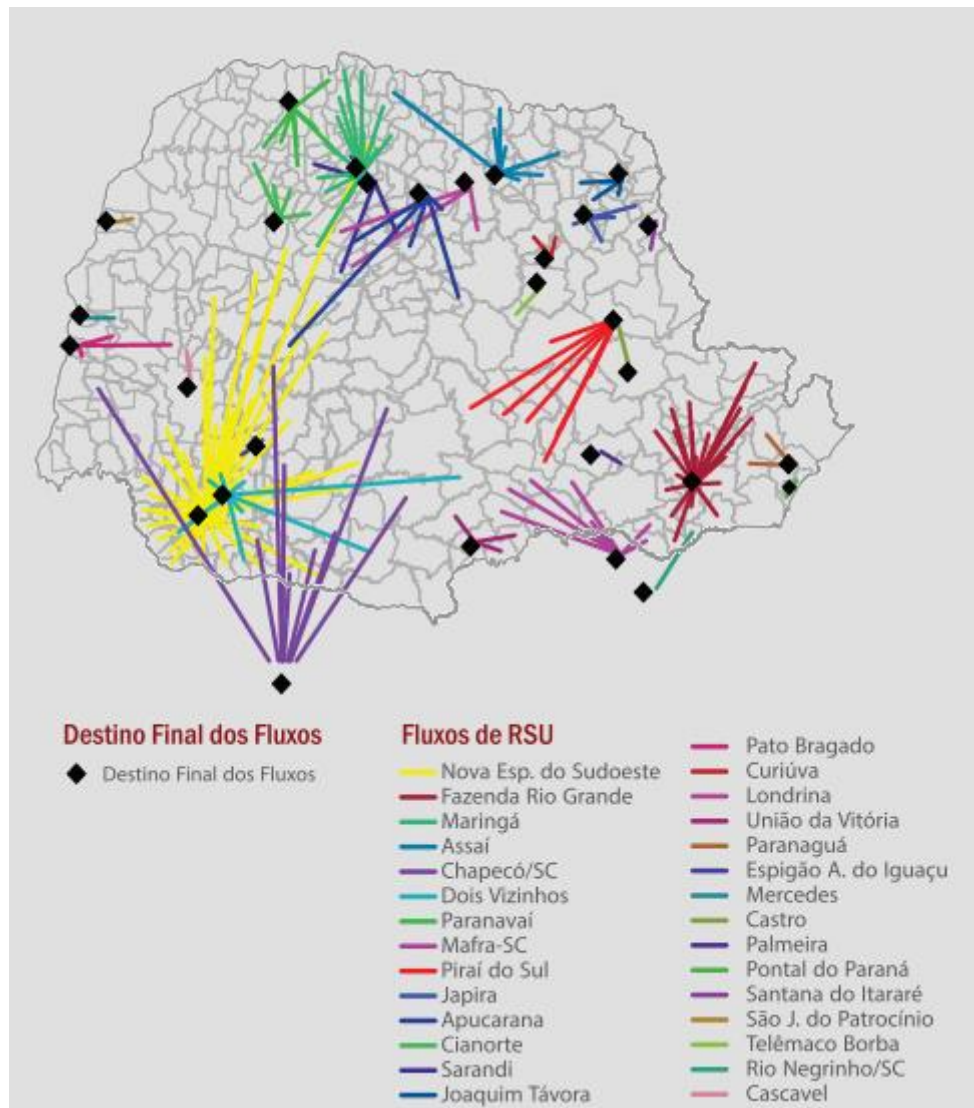
FIGURA 2 – CONSÓRCIOS INTERMUNICIPAIS DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EXISTENTES NO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: PERS, 2018

Além disso, cerca de 140 municípios optam por destinar seus resíduos a aterros sanitários contratados ou compartilhados fora dos limites municipais. Essa prática resulta em um significativo fluxo de transporte de resíduos, muitas vezes envolvendo distâncias consideráveis, conforme demonstrado na FIGURA 3 (PARANÁ, 2018).

FIGURA 3 - FLUXO DE TRANSPORTE DE RESÍDUOS



FONTE: PERS, 2018

A estimativa da quantidade de RSU gerados está diretamente vinculado à faixa populacional, destacando-se que municípios com mais de 500 mil habitantes são os principais geradores, conforme evidenciado na TABELA 2. A composição desses resíduos também varia conforma a faixa populacional. Municípios com população até 50 mil habitantes apresentam uma predominância de matéria orgânica em comparação com aqueles com a população superior a 200 mil, como ilustrado na TABELA 1 (PARANÁ, 2018).

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DO RSU NO ESTADO DO PARANÁ

Faixa populacional (hab.)	Composição de RSU (%)		
	Reciclável	Orgânico	Rejeitos
Até 50.000	27%	60%	13%
De 50.001 a 200.000	34%	49%	17%
Acima de 200.001	37%	40%	23%

FONTE: PERS (2018)

TABELA 2 - GERAÇÃO MÉDIA DE RSU POR HABITANTES NO ESTADO DO PARANÁ

Faixa Populacional (habitantes)	Geração Média <i>per capita</i> (kg/hab.dia)
Até 15.000	0,63
De 15.001 a 100.000	0,73
De 100.001 a 200.000	0,80
De 200.001 a 500.000	1,01
Acima de 500.001	1,15

FONTE: PERS (2018)

2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

2.4.1 Aterro Sanitário

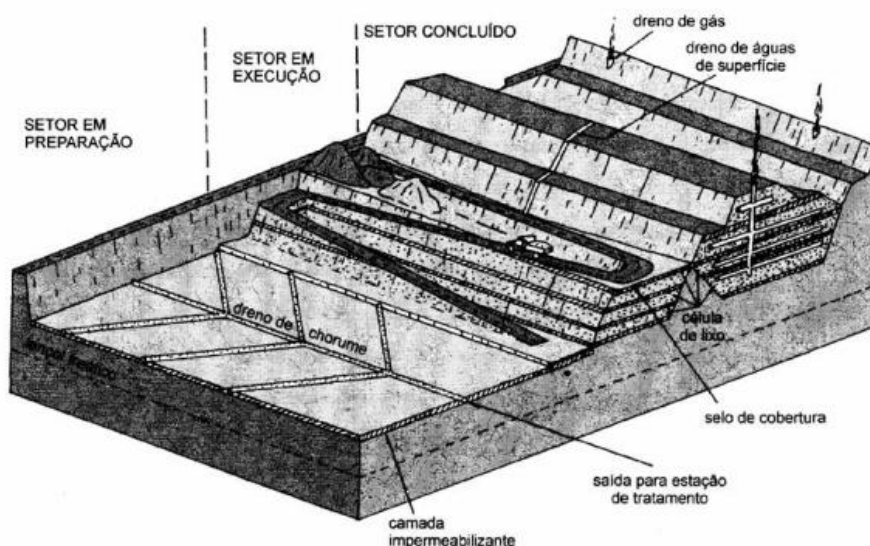
O aterro sanitário é amplamente reconhecido como uma das opções para a disposição final ambientalmente adequada dos RSU. Dentro desses aterros, os resíduos passam por um processo de biodegradação em condições de anaerobiose. A estabilização desses resíduos traz consigo a vantagem da redução de volume, mesmo que isso ocorra em um prazo mais longo (CALIJURI; CUNHA, 2019).

Para a instalação de um aterro sanitário, é fundamental seguir as diretrizes estabelecidas pela Norma Brasileira. No caso do aterro sanitário, a NBR 8419 (ABNT 1992) é a referência aplicável das normas. Essa norma determina como o Memorial Descritivo deve ser elaborado, contemplando informações essenciais. Entre elas, destaca-se a descrição detalhada das características dos resíduos a serem dispostos no aterro, incluindo a origem, quantidade e frequência de recebimento, bem como informações sobre os equipamentos de transporte. Além disso, a norma também enfatiza a importância de realizar uma análise cuidadosa da área destinada à implantação do aterro, considerando o zoneamento ambiental e urbano. É necessário descrever a caracterização geológica e geotécnica do terreno, visando evitar o risco

de contaminação dos recursos hídricos e garantir a estabilidade das estruturas sólidas (ABNT, 1992).

Entre outras diretrizes estabelecidas pela norma, destaca-se a importância de implementar um sistema de drenagem eficiente para a destinação do líquido percolado para um processo de tratamento adequado. Além disso, é essencial realizar um planejamento para a impermeabilização da área do aterro e a instalação de sistema de drenagem de gases, visando minimizar os riscos de impactos ambientais e garantir a segurança (ABNT, 1992). Uma melhor visualização da estrutura do aterro é apresentada na FIGURA 4.

FIGURA 4 – ESTRUTURA DE CONSTRUÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO



FONTE: Lixo Municipal – Cempre (2018).

Os aterros sanitários emitem biogás, que contém um alto percentual de metano, um gás que possui potencial de aquecimento global 21 vezes maior do que o dióxido de carbono (PIÑA *et al.*, 2016). Nesse contexto, Piña *et al.* (2016), analisaram a geração de energia a partir da quantidade de biogás emitido em um aterro sanitário na cidade de Três Corações, em Minas Gerais. Para o estudo, foi estimado uma população urbana inicial de 69.618 habitantes, com base nos dados dos Censos Demográficos do IBGE, e projetada para 20 anos, considerando a vida útil do aterro. Com a estimativa de geração per capita de 0,75 kg/hab./dia no município e coleta de resíduos de 100%, a pesquisa revelou, ao final do plano, a acumulação de 26.075.960 m³ de biogás no modelo LandGEM e 27.476.360m³ no modelo de Biogás, resultando em uma energia acumulada de 128,68 GWh e 141,31 GWh,

respectivamente (PIÑA *et al.*, 2016). Esses resultados destacam o potencial de produção de energia desperdiçada nos aterros sanitários que não possuem tecnologias para a transformação desses recursos, além de evidenciar a quantidade de gases emitidos que contribuem para intensificar o efeito estufa.

Outro aspecto importante a ser destacado é a integração de tecnologias adicionais, como unidades de compostagem por exemplo, na gestão de resíduos sólidos. Um estudo de caso foi realizado por Gomes *et al.* (2015) para comparar dois cenários de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. No primeiro cenário, foi implementado um sistema que incluía triagem prévia dos materiais recicláveis secos, enquanto os demais resíduos eram destinados ao aterro sanitário. A avaliação dos aspectos e impactos ambientais no cenário com apenas a usina de triagem revelou a presença de impactos ambientais significativos. Contudo, no segundo cenário, no qual a usina de triagem era precedida por uma unidade de compostagem, observou-se uma melhora em comparação com o primeiro cenário. Em ambos os cenários, um impacto ambiental relevante estava associado às emissões atmosféricas relacionadas ao transporte de resíduos (GOMES, *et al.*, 2015). Portanto, essa pesquisa conclui que a adoção de um sistema de compostagem deve ser incentivada, pois demonstrou ser eficiente na redução de emissões de gases de efeito estufa e na geração de rejeitos, resultando em um desempenho superior em relação ao primeiro cenário.

No entanto, é importante ressaltar que a instalação de um sistema de aterro sanitário enfrenta alguns desafios. Um dos principais desafios é o alto valor de investimento necessário para a construção das obras, técnicos capacitados e infraestrutura adequadas. Nem todos os municípios possuem espaços disponíveis para a instalação de aterros sanitários, o que pode dificultar ainda mais o processo. Além disso, há custos de monitoramento e operação do aterro, com o objetivo de garantir a conformidade com as normas. Também devem ser considerados os gastos relacionados à logística de transporte dos resíduos no país, pois, em alguns casos, as distâncias entre os locais de geração dos resíduos e os aterros podem ser significativas, aumentando os desafios de logísticos e dos custos envolvidos (JÚNIOR; SAIANI; DOURADO, 2014).

2.4.2 Digestores Anaeróbios

A digestão anaeróbia representa uma das estratégias na gestão de resíduos urbanos, visando diminuir a carga poluente da matéria orgânica e a presença de microrganismos patogênicos. Além disso, este processo gera biogás, que pode ser usado para produzir energia, e biofertilizantes ricos em nutrientes (SOUZA, 1984). A tecnologia que emprega a digestão anaeróbia contribui para o desenvolvimento econômico local, pois possibilita a utilização de insumos disponíveis na região (BARBOSA, 2022).

O biodigestor, que utiliza o processo de digestão anaeróbia, é uma tecnologia de tratamento biológico que faz aproveitamento da parcela orgânica do RSU na ausência de oxigênio (CALIJURI; CUNHA, 2019). A digestão anaeróbia compreende dois estágios. No primeiro estágio, a matéria orgânica complexa é degradada em compostos mais simples pelas bactérias acidogênicas e acetogênicas. No segundo estágio, os produtos gerados na etapa anterior são convertidos em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) pelas bactérias metanogênicas (SOUZA, 1984).

O volume da matéria orgânica que é submetida ao processo de digestão anaeróbia pode ser reduzido em até 60% em relação ao volume inicial (MARCHEZETT; KAVISKI; BRAGA, 2011). Além disso, a decomposição de 20 toneladas de resíduos orgânicos, compostos principalmente por frutas e verduras, pode resultar na produção diária de 650 m³ de biogás. Este biogás é predominantemente composto por 60% de gás metano. Essa quantidade de resíduos orgânicos tem a capacidade de gerar 3.750 kWh de energia elétrica e produzir 1,6 toneladas de fertilizantes orgânicos (LEITÃO; BARCELOS; 2021).

Quanto ao volume de resíduos orgânicos tratados, a implementação desses processos é teoricamente viável para populações superiores a 100 mil habitantes. O processo pode oferecer retorno financeiro, incluindo a produção de compostos e fertilizantes líquidos, a geração de energia térmica e elétrica, além de possibilitar a obtenção de créditos de carbono (BNDES, 2014).

Os processos de digestão anaeróbica são classificados com base na temperatura do digestor. A digestão psicrófila ocorre em temperaturas mais frias, variando de 10 a 20°C, com um tempo de retenção que excede 100 dias. Já a digestão mesofílica ocorre em temperaturas moderadas de 20 a 35°C, com um tempo de retenção superior a 20 dias. Por fim, a digestão termofílica ocorre em temperaturas mais elevadas, variando de 50 a 60°C, e tem um tempo de retenção superior a oito dias (SASSE, 1988).

Para a implantação do digestor anaeróbio é necessário a impermeabilização para evitar a percolação de resíduos no solo. Além disso, é essencial contar com um sistema de captação de biogás, que pode ser direcionado para a queima ou para a geração de energia. No entanto, uma das desvantagens do biogás é a presença de enxofre, sendo corrosivo para o próprio sistema. Portanto, é necessário um manejo cuidadoso e monitoramento constante dessa tecnologia. A temperatura do local de instalação deve ser levada em consideração, uma vez que em regiões de clima frio, pode haver um aumento no período de decomposição dos resíduos (JÚNIOR; SAIANI; DOURADO, 2014).

Granzotto *et al.* (2021) investigaram, em uma escala reduzida, o potencial de geração de fertilizante e biogás a partir dos resíduos de alimentos dos restaurantes da Universidade Federal de Santa Maria - RS, utilizando um biodigestor anaeróbio de 200 litros. Para um período de monitoramento de 240 dias, em temperatura mesófila ideal para o crescimento de microrganismos mesófilos (aproximadamente 30°C), os pesquisadores obtiveram um rendimento médio de 0,22 m³ de biogás por quilo de resíduos orgânicos. Os resultados desse estudo forneceram informações importantes para compreender o potencial do uso de biodigestores na gestão de resíduos orgânicos, podendo ser implementados em escalas maiores (GRANZOTTO *et al.*, 2021).

2.4.3 Compostagem

De acordo com a Resolução nº 481 de 2017 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2017), a compostagem é reconhecida como um tratamento adequado para resíduos orgânicos. Esse processo utiliza a decomposição biológica, ocorrendo em condições aeróbias e termofilias, resultando em um material estabilizado (CONAMA, 2017). Embora a compostagem tenha sido mencionada brevemente no contexto dos Aterros Sanitários, é importante avaliar melhor o uso dessa tecnologia.

Existem dois métodos distintos para realizar a compostagem: o método natural e método acelerado. No método natural, os resíduos orgânicos são dispostos em pilhas e passam por revolvimentos periódicos para promover a aeração do processo. Este método geralmente leva cerca de três a quatro meses para completar o ciclo de compostagem. Por outro lado, o método acelerado envolve a utilização de

aeração forçada, seja por meio de tubulação perfuradas ou reatores. Esse processo permite reduzir o tempo necessário para a compostagem, levando apenas de dois a três meses para sua conclusão (CEMPRE, 2018).

A maturação do composto orgânico pode ser identificada por meio de três aspectos: cor, odor e umidade. As fases principais da decomposição incluem o estágio semicurado, indicando que o composto está pronto para ser utilizado como fertilizante, e o estágio curado, demonstrando que a matéria orgânica foi totalmente degradada e estabilizada (CEMPRE, 2018).

A aeração adequada é essencial para permitir atividades biológicas que promovam a decomposição. Além disso, a umidade deve ser mantida em torno de 50%, favorecendo as atividades biológicas. A temperatura varia ao longo das fases de decomposição, atingindo valores elevados durante a fase termofílica, aproximadamente 60° C (CEMPRE, 2018).

Em relação aos nutrientes, o equilíbrio entre carbono e nitrogênio é importante, sendo recomendada uma porção de aproximadamente 30 para 1. O pH dos resíduos domésticos deve situar-se entre 4,5 e 5,5 para assegurar a produção de um composto com o pH na faixa de 7,0 a 8,0 (CEMPRE, 2018).

Quanto ao volume de processamento, existem alternativas de usinas de compostagem adaptadas aos níveis residenciais e industriais. Para operação de menor porte, em torno de 200 toneladas por dia, é aconselhável a compostagem utilizando o método natural. Por outro lado, para instalação de maior porte, que ultrapassam 300 toneladas por dia, é recomendado o emprego do processo acelerado (CEMPRE, 2018).

Em municípios que geram menos de 25 toneladas por dia, uma estratégia econômica pode ser a criação de consórcios, com o objetivo de otimizar a gestão de resíduos orgânicos. Essa abordagem colaborativa pode tornar o processo mais viável e eficiente para municípios com menor capacidade de geração de resíduos (CEMPRE, 2018).

No entanto, é importante ressaltar que independentemente do tamanho da unidade de compostagem, elas devem possuir o menor impacto ambiental possível. Retomando a Resolução nº 481 de 2017 do CONAMA, o art. 10 estabelece algumas medidas a serem adotadas para garantir o controle ambiental. Essas medidas incluem a minimização de lixiviados, diminuição de emissões de gases e odores, o controle das características dos resíduos a serem tratados, a impermeabilização da base e o

manejo adequado dos resíduos líquidos gerados. Além disso, a disposição final dos resíduos orgânicos deve estar dentro dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, os quais podem estabelecer metas progressivas para aumentar a reciclagem dessa fração por meio do uso da compostagem (CONAMA, 2017).

Ao considerar a compostagem como um sistema de tratamento de resíduos em menor escala, como em um ambiente residencial, é fundamental avaliar os impactos ambientais desse processo. Em um estudo conduzido por Yang et al. (2019), foi verificado o controle das emissões de gases, originada de uma má aeração, em uma composteira de cozinha, utilizando o composto maduro como forma de mitigar essas emissões, já que é um material de fácil acesso e que possui características porosas e microbiológicas, o que facilita a biofiltração e contribui para a redução das emissões gasosas. Cerca de 10% de composto maduro, com base no peso úmido, foi adicionado à pilha de compostagem, sendo misturado ou utilizado como cobertura. Os resultados dessa pesquisa mostraram que a adição de composto maduro reduziu aproximadamente pela metade as emissões de metano, amônia e óxido nítrico, sem influenciar no processo de compostagem. Esses resultados ressaltam a importância do uso adequado de composto maduro como uma estratégia eficaz na redução das emissões de gases durante o processo de compostagem (YANG et al, 2019).

As vantagens da adoção do método de compostagem na gestão de RSU são múltiplas. Além de reduzir os resíduos em até 40% do volume inicial da matéria orgânica (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011), o método oferece benefícios como a extensão da vida útil dos aterros, uma vez que uma parte significativa dos resíduos não é direcionada para esses locais. Ademais, a compostagem possibilita o aproveitamento agrícola da matéria orgânica, considerando que o subproduto do processo de compostagem é o fertilizante. O processo é ambientalmente seguro, contribuindo para práticas sustentáveis na gestão de resíduos (CEMPRE, 2018).

No estado do Paraná, existe incentivo para a prática da compostagem, como a Resolução CEMA nº90 de 03/12/2013, que estabelece critérios e condições para que estabelecimentos possam realizar a compostagem dos RSU, além de incentivar o uso do composto gerado (CEMA, 2013).

2.4.4 Reciclagem

A reciclagem é um processo essencial que envolve o reaproveitamento de resíduos, e suas etapas podem variar dependendo do tipo de material a ser reciclado, como plástico ou vidro. Em geral, esse processo inclui a trituração ou a moagem desses materiais, a fim de facilitar o transporte, armazenamento e processamento posterior. Essas etapas de preparação dos resíduos desempenham um papel importante na viabilidade e eficiência do processo de reciclagem, garantindo que os materiais estejam prontos para serem transformados em novos produtos de forma adequada (CALIJURI; CUNHA, 2019).

O uso do processo de reciclagem traz consigo uma série de benefícios. Primeiramente, este processo contribui para a redução da quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários, aliviando a pressão sobre essas áreas e prolongando sua vida útil. Além disso, a reciclagem promove a diminuição dos impactos ambientais, uma vez que o reaproveitamento dos materiais evita a extração desnecessárias de recursos naturais. Outra vantagem é a possibilidade de geração de empregos em diferentes etapas da cadeia de reciclagem, desde a coleta até o processamento dos materiais. Para implementar uma gestão eficiente com um programa de reciclagem, é necessário estabelecer a coleta seletiva, na qual a separação dos materiais é realizada pela própria fonte geradora, ou então investir na implantação de usinas de triagem, onde ocorre a separação dos materiais após a coleta convencional, em um ambiente especializado para essa finalidade (CEMPRE, 2018).

Para a comercialização eficiente dos materiais recicláveis, é fundamental realizar uma avaliação cuidadosa das características quantitativas e qualitativas dos resíduos. Isso envolve analisar o volume, a composição e qualidade dos materiais a serem comercializados. Além disso, é necessário conduzir pesquisas de mercado para obter estimativas de custos e identificar potenciais compradores. A gestão técnica e administrativa também desempenha um papel crucial nesse processo, garantindo a organização adequada, a logística eficiente e a conformidade com as regulamentações e normas. Para auxiliar nessa etapa, a associação CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem disponibiliza um banco de dados com informações de aproximadamente 2 mil recicladores em todo o Brasil. Essas questões sendo estruturadas viabiliza na geração de renda por meio da reciclagem (CEMPRE, 2018).

2.5 MÉTODO DECISÓRIO

Conforme abordado por Mações (2018) a tomada de decisão é um processo racional composto por diversas etapas. A primeira delas consiste na identificação do problema, onde é crucial reconhecer a sua existência e perceber a pressão que ele exerce, motivando a tomada de iniciativas.

Posteriormente, procede-se à identificação dos critérios de decisão, que servirão como base para a avaliação. Exemplificando, alguns desses critérios podem incluir fatores como preço e qualidade. Em seguida, realiza-se a definição da ponderação dos critérios de decisão, a fim de identificar qual deles possui maior relevância com comparação aos demais. Essa etapa desempenha um papel fundamental na avaliação da prioridade entre as alternativas, atingindo na seleção da melhor opção dentre aquelas consideradas (MAÇÕES, 2018).

2.5.1 Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

O Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é uma técnica usada para calcular parâmetros relevantes em diferentes áreas, como física e social, criado pelo Prof. Thomas Saaty. Essa abordagem é uma teoria geral de medição e ajuda a decidir quais elementos são mais importantes em comparação uns com os outros. O AHP funciona bem em diferentes situações, seja com comparações específicas ou usando uma escala que reflete as preferências (SAATY; VARGAS, 2006).

A análise de sensibilidade é uma abordagem utilizada para examinar os efeitos de variações nas avaliações sobre a estabilidade do resultado em um processo de tomada de decisão. Para isso, o método possui uma escala que serve para representar as intensidades das avaliações (SAATY; VARGAS, 2006), mostrado na TABELA 3:

TABELA 3 – VALORES PARA COMPARAÇÃO NO MÉTODO AHP

Valor da intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
2	Importância pequena de um critério sobre o outro	A experiência e o julgamento inclinam ligeiramente a favor de um critério sobre o outro
4	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento indicam uma clara preferência por um critério sobre o outro
6	Importância muito forte ou importância demonstrada	Um critério é muito fortemente favorecido em relação ao outro; e essa predominância de importância é evidenciada na prática
8	Importância extrema	
Recíprocos dos anteriores	Dado o valor da intensidade atribuído para o critério i quando comparada com a atividade y , então j tem o valor inverso multiplicativo dos valores associados a i .	Atribuição deve ser adequada

FONTE: adaptado Saaty; Vargas (2006)

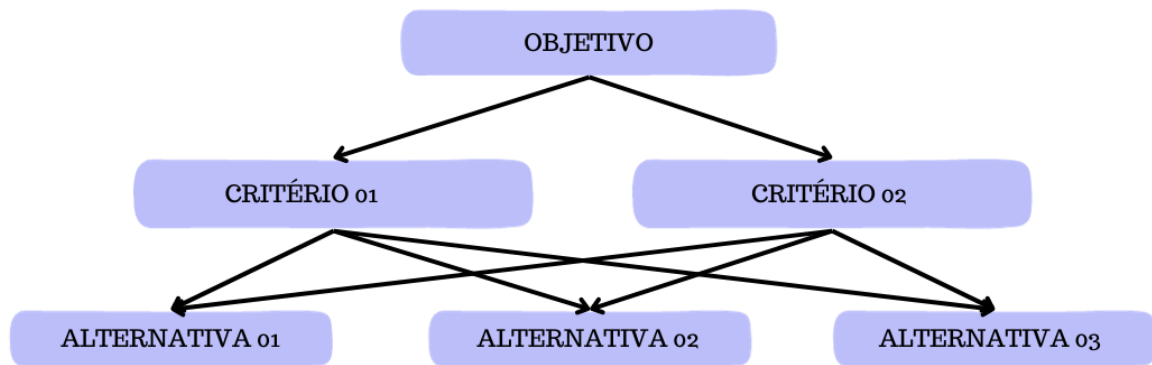
As comparações no método são realizadas em pares, e as intensidades são atribuídas com base em quantas vezes um elemento é mais importante que o outro. É fundamental considerar a propriedade recíproca nas comparações em pares. Essas propriedades destacam a relação de dominância entre elementos em termos de uma propriedade específica, permitindo a atribuição de valores recíprocos para comparações inversas (SAATY; VARGAS, 2006).

Quando há vários critérios a serem considerados na priorização e obtenção de uma síntese, é necessário comparar a importância desses critérios. A determinação das prioridades dos critérios é essencial para, posteriormente, derivar as prioridades das alternativas em relação a cada critério (SAATY; VARGAS, 2006).

A estrutura do método não segue uma forma linear, assemelha-se como uma rede composta de objetivos, critérios e alternativas (SAATY; VARGAS, 2006). Em

relação a esta estrutura, os critérios e alternativas podem ser inúmeros, como o exemplo de uma estrutura mostrado na FIGURA 5:

FIGURA 5 - ESTRUTURA DO MÉTODO AHP



FONTE: Adaptado de Saaty; Vargas (2005)

A primeira etapa do método envolve a construção da matriz de comparação, na qual os valores são inseridos conforme a tabela de intensidade. Em seguida, procede-se à soma dos valores de cada coluna. Posteriormente, os valores de intensidade são divididos pela soma de sua respectiva coluna para normalizar a matriz. Após a normalização, calcula-se a média em cada linha, representando os pesos dos critérios ou alternativas (SAATY; VARGAS, 2006).

É necessário verificar a consistência dos valores de importância atribuídos à matriz. Para garantir a consistência do julgamento, o valor do Resultado de Consistência (R.C.) deve ser inferior a 0,1. A equação aplicada para essa verificação é apresentada a seguir (SAATY; VARGAS, 2006).

$$RC = \frac{(\lambda - n)}{n - 1} / IR$$

Onde:

λ = após a obtenção da soma dos pesos, essa soma é dividida pelo vetor de valores de prioridade. O resultado dessa divisão, por sua vez, é então dividido pelo número total de elementos (n), resultando no valor λ .

n = é a ordem da matriz.

IR = é o Índice Randômico de Consistência que varia de acordo com a ordem (TABELA 4).

TABELA 4 – ÍNDICE RANDÔMICO DE CONSISTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ORDEM DA MATRIZ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

FONTE: Saaty; Vargas 2006

A última etapa da matriz envolve verificar como cada alternativa se destaca em relação a cada critério. Isso é feito multiplicando as duas matrizes. Essa multiplicação é essencial para encontrar os pesos finais, indicando o quanto são importantes as alternativas em relação aos critérios (SAATY; VARGAS, 2006).

2.5.2 Escolha de tratamento de Resíduos

A diversificação dos materiais produzidos e o aumento do consumo, e consequentemente do descarte, evidenciam a importância de implementar um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos eficiente. A gestão de resíduos sólidos engloba um conjunto de ações, como a coleta, o transporte, o transbordo, o tratamento e a destinação final, visando otimizar o aproveitamento dos recursos técnicos e econômicos disponíveis. Para garantir uma gestão adequada, é fundamental conhecer os aspectos qualitativos e quantitativos, bem como suas variações. Esta avaliação técnica é necessária para evitar contratempos, como a adoção de uma tecnologia eficaz, porém inviável devido à quantidade de resíduos que requer tratamento (CALIJURI; CUNHA, 2019).

Conforme mencionado anteriormente, uma das etapas cruciais na gestão de resíduos sólidos é o tratamento. As tecnologias de tratamento desempenham um papel fundamental ao estabilizar e reduzir o volume dos resíduos, possibilitando assim uma maior vida útil para os aterros sanitários. Além disso, determinados resíduos podem ser reaproveitados, seja através da reciclagem ou da geração de energia. As tecnologias de estabilização dos resíduos podem envolver processos biológicos, físicos ou químicos. Ao decidir qual alternativa adotar, é necessário levar em consideração o custo de implantação e operação, o cumprimento das exigências legais, bem como a quantidade e a preparação dos técnicos envolvidos (CALIJURI; CUNHA, 2019).

De acordo com Muller *et al.* 2021, a melhor alternativa de tratamento de resíduos sólidos urbanos para o município de Juazeiro do Norte, no Ceará, foi definida por meio de uma análise de multicritério utilizando o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). De acordo com o estudo, o objetivo foi decomposto em critérios ambientais, sociais, econômicos, técnicos e regulatórios, como critérios do método AHP que é utilizado para estabelecer a ordem de soluções, decompondo problemas complexos em níveis hierárquicos (YAP; NIXON, 2015). Com base em informações prévias sobre a quantidade de resíduos gerados no município, cada subcritério foi avaliado, considerando aspectos como quantidade de emprego gerado no critério social e a viabilidade no critério técnico. Com valores quantitativos e qualitativos, foi possível comparar as alternativas e determinar a melhor opção para o município. Nesse caso, duas alternativas foram selecionadas como as melhores: uma com centro de triagem manual e unidade de compostagem descentralizada, e outra com centro de triagem manual e biodigestor descentralizado. Essas alternativas apresentaram vantagens nos critérios sociais e técnicos (MULLER *et al.*, 2021).

Lima *et al.* (2014), também utilizaram o método AHP para selecionar alternativas adequadas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região sul do Brasil. Nesse caso, foi realizado uma comparação com o modelo *Promethee II* (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), que também serve para analisar e classificar as alternativas com base nos critérios estabelecidos, a fim de comparar os resultados de ambos os métodos. Os critérios utilizados neste caso foram ambientais, sociais, econômicos e políticos. As tecnologias consideradas como alternativas foram reciclagem, compostagem, tratamento mecânico-biológico, digestão anaeróbica e incineração com geração de energia elétrica. Com base nos dois métodos, foram identificados arranjos possíveis de tratamento: reciclagem combinada com aterro sanitário e geração de energia, reciclagem combinada com digestão anaeróbica e aterro sanitário sem geração de energia, reciclagem combinada com incineração e geração de energia e reciclagem combinada com aterro sanitário sem geração de energia. Na conclusão do estudo, é indicado que o aperfeiçoamento desses métodos pode levar a uma maximização dos resultados obtidos (LIMA *et al.*, 2014).

A técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) também pode ser utilizada para comparar cenários de tratamento de resíduos sólidos. A ACV permite avaliar os potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto ou serviço

(ABNT, 2009). Mersoni & Reichert (2017), elaboraram cinco cenários de tratamento de resíduos sólidos para o município de Garibaldi, no Rio Grande do Sul, utilizando diferentes tecnologias, como reciclagem, incineração, compostagem e digestão anaeróbia. A pesquisa incluiu a realização de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), utilizando o software IWM-2, para avaliar os subprodutos das tecnologias em relação ao consumo de energia, emissões atmosféricas, impactos no solo e na água. Além disso, foi realizada uma avaliação dos impactos do ciclo de vida nas categorias de mudanças climáticas, acidificação, eutrofização e toxicidade humana. Os pesquisadores concluíram que os cenários com diferentes tecnologias de tratamento apresentaram melhores resultados e que os cenários com maior índice de reciclagem resultaram em menores impactos ambientais e menor consumo de energia. No entanto, o estudo ressalta a necessidade considerar outros critérios, como aspectos sociais e econômicos, para aprimorar a avaliação, uma vez que o uso da ACV garante apenas a seleção de tecnologias de tratamento de resíduos sólidos com menor impacto ambiental (MERSONI; REICHERT, 2017).

3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido com base no levantamento de dados sobre a população, as quantidades dos RSU e as informações dos municípios pertencentes a duas regiões do estado do Paraná, especificamente Londrina e Campo Mourão. Tais dados foram obtidos a partir da campanha da fiscalização da Operação Percola realizada pelo Ministério Público do Paraná (MP-PR), por meio do seu Centro de Apoio Operacional às Promotorias do Meio Ambiente e Habitação (CAOP-MAHU) e em conjunto com GAEMA (Grupo de Atuação Especializada em Meio Ambiente, Habitação e Urbanismo), e que foram disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Adicionalmente, utilizando informações sobre tecnologias obtidas por meio de literatura especializada, foi possível criar cenários de otimização de gestão e determinar qual tecnologia de tratamento seria mais adequada para cada a região.

3.1 OPERAÇÃO PERCOLA

A Operação Percola representa uma colaboração entre o Ministério Público do Estado do Paraná (MP-PR), o Instituto Água e Terra (IAT) e a Secretária de Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo (SEDEST). Seu objetivo consiste na fiscalização do gerenciamento de resíduos sólidos em regiões específicas do estado do Paraná. Esta ação fiscalizadora compreende a aplicação de questionários e inspeções em locais dedicados ao gerenciamento de resíduos. Na identificação de não conformidades com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o município sujeita-se a sanções e multas ao término da operação (SEDEST, 2021). A Operação Percola realizou três edições. No contexto deste estudo, a análise concentrou-se nas informações provenientes das duas últimas edições.

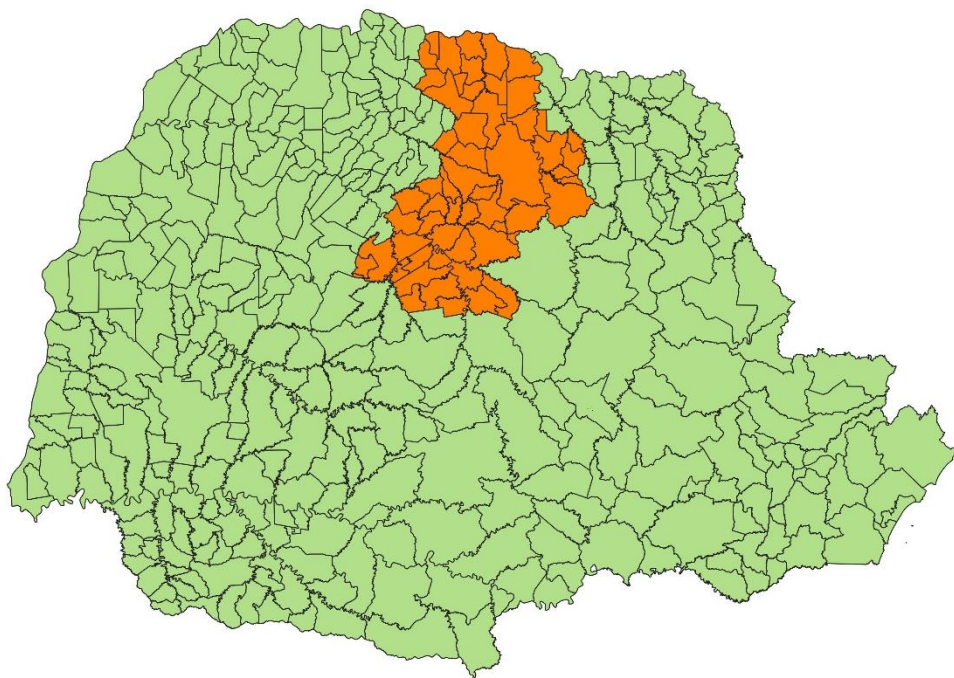
3.1.1 Operação Percola II (2021)

A segunda fase da Operação Percola foi realizada em 2021, abrangendo 55 municípios que integram o Grupo de Atuação Especializada em Meio Ambiente, Habitação e Urbanismo (GAEMA) de Londrina. Conforme as informações disponíveis na Secretária de Desenvolvimento Sustentável (2021), durante essa iniciativa, foram conduzidas vistorias em 87 áreas das quais aproximadamente um terço correspondia

a locais de disposição final de resíduos, como aterros sanitários e lixões. Para a execução dessas vistorias, foram mobilizadas cinco equipes compostas por membros do MP – PR, SEDEST e IAT. O trabalho de campo exigiu quatro dias e envolveu 21 servidores.

Os municípios fiscalizados situam-se na parte norte do estado do Paraná (FIGURA 6) e abrigam cerca de 1,5 milhão de habitantes. Dentre esses 55 municípios, 44 têm população inferior a 15 mil habitantes, destacando-se Apucarana, Arapongas e Cambé como aqueles acima de 100 mil habitantes (TABELA 39). Londrina é o município mais populoso fiscalizado, com mais de meio milhão de habitante, sendo o segundo municípios mais populoso do estado do Paraná (IBGE, 2022).

FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS VISTORIADOS PELA OPERAÇÃO PERCOLA II, ESTADO DO PARANÁ



FONTE: Elaborado pela autora (2023)

Durante a Operação Percola II, as principais irregularidades identificadas compreenderam problemas significativos na coleta seletiva, evidenciando disposições irregulares de resíduos recicláveis, bem como a presença de catadores nos lixões. Além disso, constatou-se a ausência de um tratamento adequado para a fração orgânica, conforme pode ser observado nas imagens capturadas durante o processo de fiscalização (FIGURA 7 e FIGURA 8). Esses problemas representam desafios significativos para o adequado gerenciamento de resíduos sólidos e são alvos de

medidas corretivas a serem implementadas em conformidade com as normativas ambientais vigentes.

FIGURA 7 – DESCARTE IRREGULAR NO MUNICÍPIO CENTENÁRIO DO SUL – PR



FONTE: MP-PR (2021)

FIGURA 8 – ÁREA DE DESPEJO DA FRAÇÃO ORGÂNICA SEM TRATAMENTO NO MUNICÍPIO DE BOM SUCESSO - PR



FONTE: MP-PR (2021)

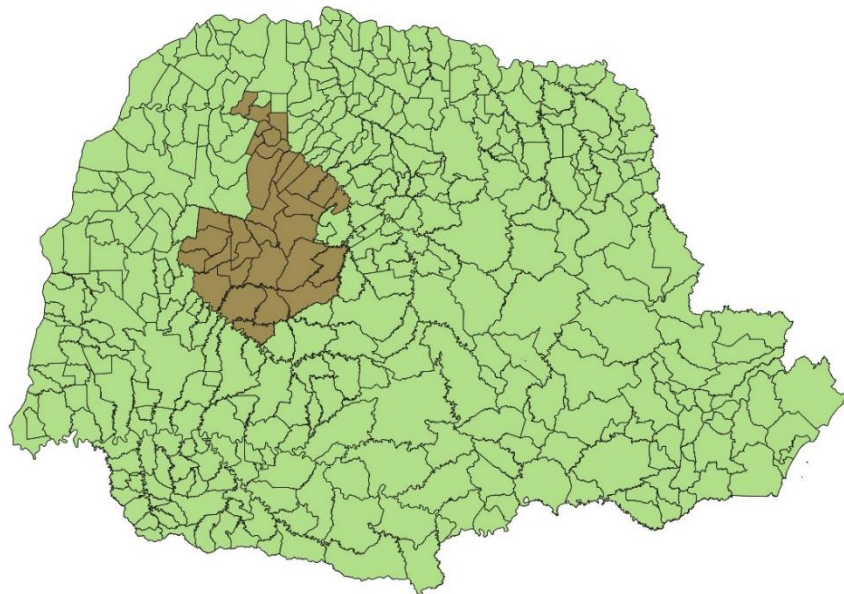
A operação resultou em lavratura de 148 autos de infrações ambientais e em aplicação de R\$ 1.426.500,00 em multas pelo Instituto Água e Terra – IAT. Em novembro de 2022, foi realizado um evento de Educação Ambiental desenvolvida pelo CAOP-MAHU e GAEMA. Essa iniciativa teve como propósito incentivar melhorias na gestão dos municípios que foram objeto de infrações durante a operação (MP-PR, 2022).

3.1.2 Operação Percola III (2023)

Em maio de 2023, a Operação Percola realizou sua terceira edição, direcionada aos municípios que compõem o GAEMA de Campo Mourão. Nesta edição, houve uma menor quantidade de municípios fiscalizados em comparação com a segunda edição. Durante três dias de vistorias, 21 servidores, distribuídos em três grupos, compuseram as equipes de trabalho de campo, representando os órgãos SEDEST, IAT E MP – PR. Ao todo, foram vistoriadas 50 áreas em 28 municípios, com mais 4 municípios que fazem parte da área de abrangência.

A região GAEMA de Campo Mourão é composta por 32 municípios (FIGURA 9). Apesar de ser uma área de estudo menor, esta região abriga aproximadamente meio milhão de pessoas, sendo que 18 desses municípios possuem uma população inferior a 10 mil habitantes (TABELA 40). O município mais populoso é Campo Mourão, com cerca de 99 mil habitantes (IBGE, 2022).

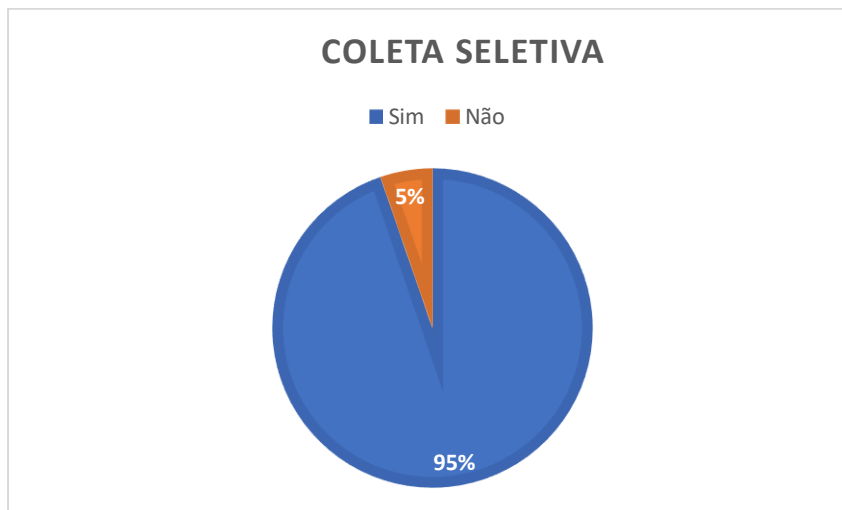
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DA OPERAÇÃO PERCOLA III



FONTE: Elaborado pela autora (2023)

Notavelmente, conforme o questionário aplicado e disponibilizado para este estudo, em todas as unidades de destinação final, foi constatada a presença de materiais recicláveis nas trincheiras, mesmo quando a maioria confirmou a existências de programas de coleta seletiva conforme mostrado no GRÁFICO 1.

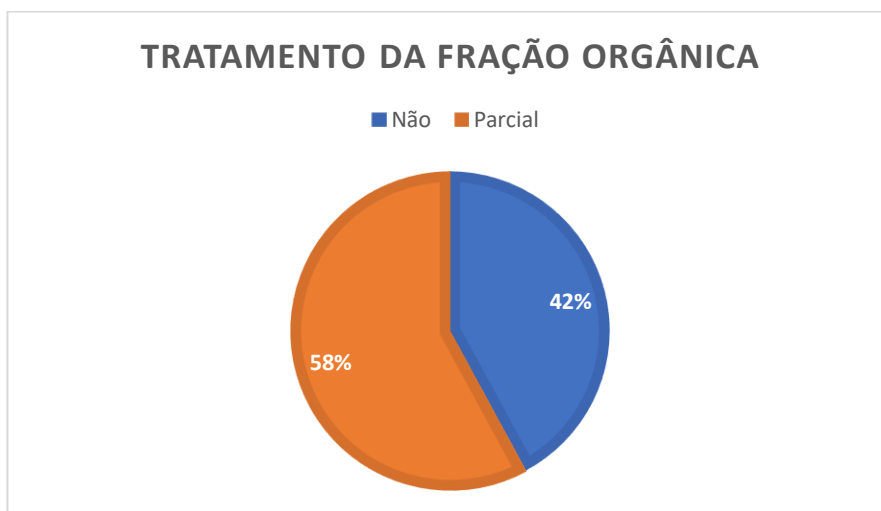
GRÁFICO 1 - COLETA SELETIVA NOS MUNICÍPIOS DE DESTINAÇÃO FINAL



FONTE: Elaborado pela autora (2023) com base na Operação Percola III (2023)

Além disso, nenhuma dos municípios de destinação final de resíduos sólidos apresentou um tratamento efetivo da fração orgânica. Os dados observados GRÁFICO 2 indicam que mais da metade dos municípios acabam realizando um tratamento parcial.

GRÁFICO 2 – TRATAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA NOS MUNICÍPIOS DE DESTINAÇÃO FINAL



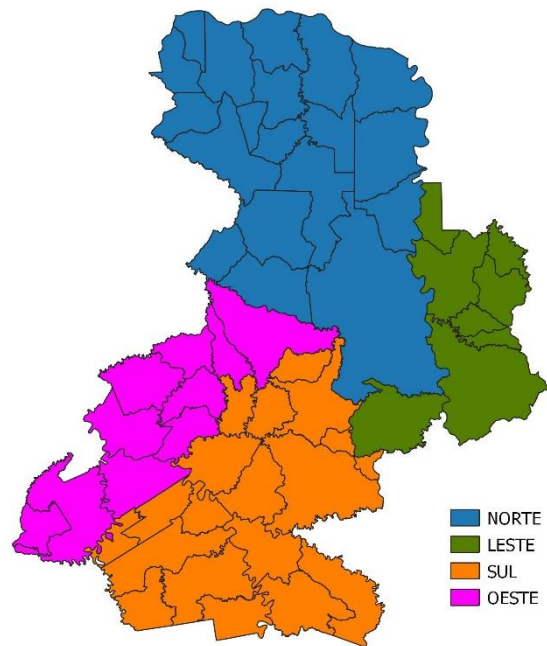
FONTE: Elaborado pela autora (2023) com base na Operação Percola III (2023)

3.2 REGIONALIZAÇÃO

Com o intuito de determinar os tratamentos mais eficazes para RSU em cada região fiscalizada durante as Operações Percola, foram estabelecidos dois cenários, cada um incorporando três processos para abordar os desafios associados aos resíduos recicláveis e orgânicos, identificando tanto no contexto estadual quanto nos diagnósticos específicos da Operação Percola. Estes cenários foram analisados individualmente considerando fatores como economia de implementação, retorno, e outras vantagens e desvantagens.

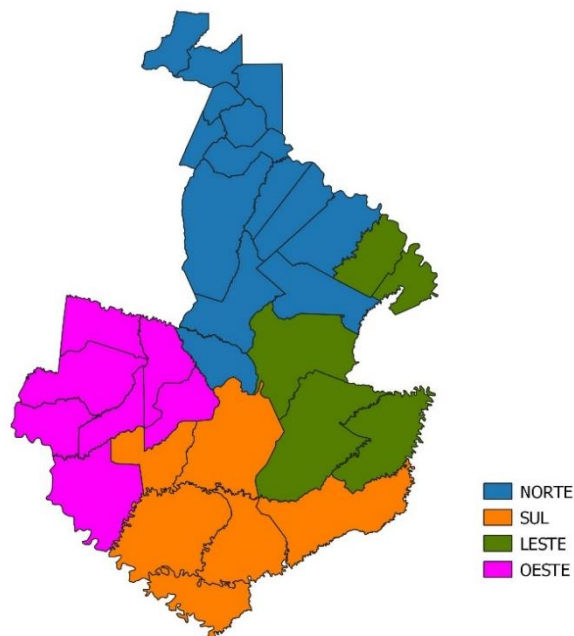
Para análise da geração de resíduos, os municípios participantes das Operações Percola II e III foram categorizados em regiões Norte, Sul, Leste e Oeste (ver FIGURA 10 e FIGURA 11). Essa regionalização facilita uma análise detalhada das características locais, contribuindo para aprimorar o planejamento administrativo e econômico (DUBEY, 1964). Além disso, visa reduzir as distâncias percorridas pelo transporte de RSU, uma vez que este processo é responsável por consumir entre 40% e 70% do orçamento no sistema de gestão de RSU (MARTINHO; GONÇALVES, 2000).

FIGURA 10 - REGIONALIZAÇÃO DA REGIÃO DE LONDRINA



FONTE: Elaborado pela autora (2023)

FIGURA 11 - REGIONALIZAÇÃO DA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO



FONTE: Elaborado pela autora (2023)

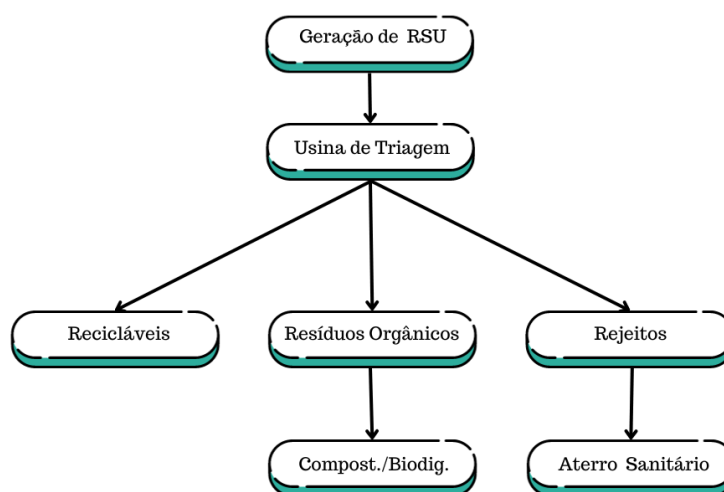
A regionalização foi desenvolvida utilizando o *software* QGis, um sistema de informação geográfica de código aberto. Para a análise, identificamos os centroides

das regiões, que foram utilizados para criar uma matriz 4 x 4, rotacionada em 45° e centralizadas nesses centroides. Em seguida, foi realizada a interseção dessas duas camadas e analisado a tabela de atributos, que continha a informação sobre em qual região cada município se encontrava. No caso de um município estar localizado em mais de uma região, o critério de desempate foi a verificação de mancha populacional.

3.3 CRIAÇÃO DE CENÁRIOS

Neste estudo, foram definidos dois cenários, ambos envolvendo etapas fundamentais (FIGURA 12). Essas etapas visam a separação de resíduos secos em usinas de triagem, já que foi observado o destino incorreto de materiais recicláveis nos aterros fiscalizados pela Operação Percola II e III. A segunda etapa, objeto de avaliação, envolveu a escolha entre duas tecnologias: Digestão Anaeróbia ou Composteira. Para essa análise, aplicou-se o método AHP com três critérios principais. O primeiro critério é a Economia, que examina os custos de implementação e operação. O segundo critério diz respeito a Eficiência, considerando a redução de volume no processo e os subprodutos gerados. O terceiro critério aborda a Capacidade de Processamento, relacionada ao volume e à eficiência temporal do processo. E para finalizar em ambos os cenários, foi avaliado os custos de implantação dos aterros sanitários, onde vão ser encaminhados os rejeitos.

FIGURA 12 - OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DE RSU DA REGIÃO DE LONDRINA E CAMPO MOURÃO



FONTE: Elaborado pela autora (2023)

3.4 VALORES DE GERAÇÃO DE RSU E DOS CUSTOS DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

Os valores utilizados nos cálculos de custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX), obtidos na literatura, foram ajustados de acordo com a inflação dos anos de 2009 e 2015 até o ano de 2023. Essa atualização foi realizada por meio da consulta à calculadora do Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), disponível no site do IBGE (IBGE, [s.d.]).

Em relação aos dados populacionais fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística referentes ao ano de 2022, foram utilizadas as informações apresentadas na TABELA 2 para avaliar a quantidade de RSU gerados em cada município. Posteriormente, aplicou-se as porcentagens apresentadas na TABELA 1 para analisar a composição dos resíduos gerados. Os resultados podem ser observados na TABELA 39 e na TABELA 40, apresentadas no Apêndice 1.

Os valores resultantes foram empregados, após a regionalização, para verificar a quantidade de resíduos recicláveis, orgânicos e rejeitos gerados em cada região (TABELA 5). Desta forma, utilizando tais dados, foi possível calcular os valores dos gastos de implantação e operação, uma vez que o valor varia com a faixa populacional e a quantidade de RSU gerado.

TABELA 5 – GERAÇÃO DE RSU POR DIA EM CADA REGIÃO POR DIA

Região	Região de Londrina			Região de Campo Mourão		
	Reciclável (ton.)	Orgânicos (ton.)	Rejeitos (ton.)	Reciclável (ton.)	Orgânicos (ton.)	Rejeitos (ton.)
Norte	351,13	438,38	203,92	37,45	71,31	19,16
Sul	26,30	58,44	12,66	10,39	23,09	5,00
Leste	11,23	24,96	5,41	29,25	45,72	14,54
Oeste	48,08	79,20	23,81	15,34	34,04	7,38

FONTE: Elaborado pela autora (2023)

3.5 USINA DE TRIAGEM

A instalação de usinas de triagem desempenha um papel fundamental na separação de materiais recicláveis a partir dos RSU. Geralmente estas usinas são integradas com o tratamento das frações orgânicas, como composteiras. Quando bem

administradas, essas usinas conseguem reduzir cerca de metade dos resíduos que são encaminhados para os aterros (CEMPRE, 2018).

Para a Usina de Triagem, realizou-se o cálculo de implantação e operação com base na tonelada diária, considerando um período de um ano. Para este estudo, a faixa populacional foi calculada por região, e em cada região foi agrupado os municípios que possuem a composição de produção de RSU semelhantes, ou seja, os municípios com os menores números de habitante não foram calculados juntamente com os municípios com maior número de habitantes.

3.6 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS

Para o tratamento do resíduo orgânico, como mencionado anteriormente, empregou-se o método AHP para avaliar as opções de Compostagem e Digestão Anaeróbia com base nos critérios de Economia, Eficiência Ambiental e Capacidade de Processamento.

Antes de iniciar a avaliação das alternativas por meio do método AHP, foi essencial realizar uma análise dos critérios envolvidos. No contexto deste estudo, o grau de importância atribuído à Eficiência em relação à Capacidade de Processamento é de intensidade 03, indicando que, nessa circunstância, a Eficiência possui uma prioridade superior à Capacidade de Processamento. Paralelamente, a Economia foi atribuída como sendo mais fundamental do que a Eficiência, resultando em uma intensidade de importância substancialmente maior da Economia em relação à Capacidade de Processamento, especificamente com uma intensidade de 05 neste estudo. A interpretação dos valores decimais reflete uma relação inversa proporcional, ou seja, a Economia foi avaliada como cinco vezes mais importante que a Capacidade de Processamento, enquanto a Capacidade de Processamento é, portanto, reconhecida como um quinto de relevância em comparação a Economia. O delineamento dessas prioridades é fundamental para uma escolha econômica e eficaz. A TABELA 6 apresenta a matriz comparação par a par dos critérios.

TABELA 6 – MATRIZ DE JULGAMENTO DOS CRITÉRIOS

	Economia	Eficiência	Capacidade de Processamento
Economia	1,00	3,00	5,00
Eficiência	0,33	1,00	3,00
Capacidade de Processamento	0,20	0,33	1,00

FONTE: Elaborado pela autora (2023)

Para a avaliação das alternativas em relação ao critério de Economia, Eficiência e Capacidade de Processamento, foi comparado par a par da Compostagem e o Digestor Anaeróbio. Vale ressaltar que os valores foram definidos de acordo com o objetivo destes estudos, podendo ser alterado para outros objetivos.

3.7 DESTINAÇÃO DE REJEITOS

O aterro sanitário é um método empregado para a disposição de RSU. Baseado em normas e legislação, esse processo possibilita um confinamento seguro em relação a saúde pública e ambiental (CEMPRE, 2018).

Os custos relacionados ao aterro foram avaliados considerando o porte, com diferentes capacidades diárias: pequeno porte (100 toneladas por dia), médio porte (800 toneladas por dia) e grande porte (2000 toneladas por dia). Os valores foram obtidos a partir do relatório apresentado pela Associação Brasileira de Tratamento de Resíduos – ABETRE (2009) (TABELA 7).

TABELA 7 - CUSTO DO CAPEX E OPEX ATERRO SANITÁRIO POR PORTE

Porte	Ton./dia	CAPEX		OPEX	
Pequeno	100	R\$	10.930.578,93	R\$	3.562.020,08
Médio	800	R\$	47.082.474,37	R\$	16.176.260,94
Grande	2000	R\$	100.746.669,92	R\$	36.153.892,51

FONTE: Adaptado ABETRE (2009)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CUSTOS DA USINA DE TRIAGEM

Os custos de implantação diferem de acordo com a faixa populacional, conforme indicados pelo documento do BNDES (2014). Esse custo engloba a aquisição de terrenos, construção de baias de armazenamento e galpões. Para a população entre 30 mil e 100 mil habitantes, o CAPEX é de R\$ 112,06 por tonelada. Em relação à operação para a mesma faixa populacional, o OPEX é de R\$ 1.245,15 por tonelada. Em áreas mais populosas, com população entre 100 mil e 2,5 milhões, o custo operacional gira em torno de R\$ 931,94 por tonelada. Essa variação nos custos ocorre devido à intensidade do uso de mão de obra em locais de menor porte populacional.

Os valores dos custos calculados para a região de Londrina e Campo Mourão estão apresentados nas TABELA 8 e TABELA 9.

TABELA 8 – CUSTO TOTAL DA USINA DE TRIAGEM PARA REGIÃO DE LONDRINA POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custos Total
Norte	33.440.623,74	411.013.343,80	R\$ 444.453.967,54
Sul	2.005.443,65	33.131.592,83	R\$ 35.137.036,48
Leste	1.701.705,96	18.908.434,57	R\$ 20.610.140,53
Oeste	4.065.325,40	68.668.554,34	R\$ 72.733.879,74

TABELA 9 - CUSTO TOTAL DA USINA DE TRIAGEM PARA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custos Total
Norte	3.813.078,10	50.150.401,77	R\$ 53.963.479,87
Sul	1.573.734,14	17.486.481,05	R\$ 19.060.215,20
Leste	3.661.193,28	40.681.195,96	R\$ 44.342.389,24
Oeste	2.321.535,81	25.795.647,97	R\$ 28.117.183,78

Na região norte de Londrina, destaca-se uma tendência de custos mais elevados, atribuída, em grande parte, à presença de municípios densamente habitados, como Londrina, Arapongas, Cambé, Ibiporã e Rolândia. A implantação nessa área acarretou um investimento significativo, totalizando R\$ 33.440.623,74. Além disso, ao longo de um ano, a operação demandou um montante de R\$

411.013.343,80. É interessante observar que, tanto em outras partes de Londrina quanto em Campo Mourão, a operação anual compreende 90% dos custos totais. Isso ressalta a importância, ao adotar a usina de triagem na gestão de RSU, de atentar para o valor de operação, considerando ser esta a parte mais onerosa do processo.

4.2 CUSTOS DA COMPOSTAGEM

Quanto aos custos de compostagem, também foram usados os valores do documento do BNDES (2014), considerando a implantação e operação ao longo de um ano. No caso da compostagem, os custos variam de acordo com a faixa populacional. Para uma população de até 250 mil habitantes, o custo de implantação é de R\$ 4,70 por tonelada, enquanto para população acima desse limite, o CAPEX é de R\$ 8,64 por tonelada. Essa diferença ocorre porque composteiras que recebem menos resíduos orgânicos não necessitam da aquisição de pás mecanizadas, e o sistema de reviramento pode ser realizado manualmente (BNDES, 2014)

No que diz respeito ao custo operacional, para população entre 30 mil e 250 mil habitantes, o valor é de R\$ 141,01 por tonelada, devido ao maior uso de mão de obra. Já para municípios maiores, com até 1 milhão de habitantes, esse custo é reduzido para R\$ 109,68 por tonelada (BNDES, 2014). Os detalhes dos valores de implantação e operação para as regiões de Londrina e Campo Mourão estão apresentados na TABELA 10 e TABELA 11.

TABELA 10 - CUSTOS DA COMPOSTAGEM DA REGIÃO DE LONDRINA POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custo total
Norte	1.013.366,13	20.474.039,98	R\$ 21.487.406,11
Sul	183.870,85	2.339.553,90	R\$ 2.523.424,75
Leste	42.823,58	1.284.798,63	R\$ 1.327.622,21
Oeste	208.862,85	4.076.512,87	R\$ 4.285.375,72

TABELA 11 – CUSTOS TOTAL DA COMPOSTAGEM DA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custo total
Norte	112.337,39	3.670.382,09	R\$ 3.792.719,48
Sul	39.603,16	1.188.179,00	R\$ 1.227.782,16
Leste	78.437,05	2.353.278,44	R\$ 2.431.715,49
Oeste	58.393,87	1.751.940,35	R\$ 1.810.334,22

A composteira, ao concentrar-se exclusivamente na matéria orgânica, apresentou um valor inferior em comparação à usina de triagem. No entanto, é notável que, durante o período de um ano, os custos de operação alcançaram parcela de 96% dos custos totais. Essa observação destaca que, embora a fase de implantação possa demandar investimentos menores, a operação das composteiras ao longo do tempo representa uma proporção elevada dos recursos alocados.

4.3 CUSTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO

Para o cálculo da tecnologia de digestão anaeróbica, considerou-se a capacidade de processamento da tecnologia. O documento BNDES (2014) apresenta orçamentos de implantação e operação para duas faixas de capacidade de processamento dos Digestores Anaeróbicos. O primeiro tem capacidade para processar até 66 toneladas de resíduos orgânicos por dia, enquanto o segundo tem a capacidade de processar até 225 toneladas por dia.

O custo de implantação para o digestor de menor capacidade é de R\$ 62,84 por tonelada, enquanto para o digestor de 225 toneladas, o custo é de R\$ 60,16 por tonelada. Quanto aos custos de operação, o digestor de menor capacidade é de R\$ 169,28 por tonelada (BNDES, 2014). Os detalhes desses valores podem ser visualizados na TABELA 12 e TABELA 13.

TABELA 12 – CUSTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO NA REGIÃO DE LONDRINA POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custo total
Norte	9.674.798,72	15.082.284,07	R\$ 24.757.082,79
Sul	1.340.422,75	3.610.865,10	R\$ 4.951.287,85
Leste	572.560,43	1.542.377,93	R\$ 2.114.938,36
Oeste	1.816.665,97	4.893.781,28	R\$ 6.710.447,25

TABELA 13 – CUSTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO DA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custo total
Norte	1.635.676,98	4.406.228,49	R\$ 6.041.905,47
Sul	529.502,65	1.426.387,79	R\$ 1.955.890,44
Leste	1.048.720,07	2.825.068,96	R\$ 3.873.789,03
Oeste	780.738,47	2.103.173,27	R\$ 2.883.911,73

Os digestores anaeróbios, embora apresentem custos de operação superiores aos de implantação, não revelam uma diferença tão acentuada quanto a

observada na composteira. Os valores relacionados à operação representam aproximadamente 70% dos custos totais e em regiões densamente povoadas, como o norte da região de Londrina a operação chega a 60%. Essa discrepância sugere que, em municípios mais populosos, a operação se beneficia de processos mais mecanizados, resultando em um custo de implantação ligeiramente mais elevado.

4.4 CUSTOS DO ATERRO SANITÁRIO

Para a categoria de pequeno porte, o CAPEX anual é de R\$10.930.578,93, com um OPEX de R\$3.562.020,08 (5% do valor do horizonte de 20 anos). No caso do porte médio, os custos de CAPEX situam-se em torno de R\$47.082.474,37, enquanto os custos de OPEX alcançam R\$16.176.260,94 (5% do valor do horizonte de 20 anos) (ABETRE, 2009). Os detalhes dos custos implantação e operação de aterros sanitários, conforme o porte, para cada região, estão apresentados na TABELA 14 e TABELA 15.

TABELA 14 – CUSTO DO ATERRO REGIÃO DE LONDRINA POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custo total
Norte	68.943.632,23	23.300.301,10	R\$ 92.243.933,33
Sul	10.930.578,93	3.562.020,08	R\$ 14.492.599,00
Leste	10.930.578,93	3.562.020,08	R\$ 14.492.599,00
Oeste	21.861.157,86	7.124.040,15	R\$ 28.985.198,00

TABELA 15 - CUSTO DO ATERRO NA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR ANO

Região	CAPEX (R\$)	OPEX (R\$)	Custo total
Norte	10.930.578,93	3.562.020,08	R\$ 14.492.599,00
Sul	10.930.578,93	3.562.020,08	R\$ 14.492.599,00
Leste	21.861.157,86	7.124.040,15	R\$ 28.985.198,00
Oeste	10.930.578,93	3.562.020,08	R\$ 14.492.599,01

Os custos do CAPEX representam a maior parte do investimento. Isso ocorre porque esse custo abrange várias etapas, como a preparação, a implantação, o fechamento e o período após o fechamento do aterro sanitário. Esses cálculos levam em consideração um período extenso de 42 anos. Por outro lado, os custos anuais de operação são significativamente menores. Isso destaca a importância de planejar a

instalação de um aterro sanitário olhando para o futuro, já que os custos associados ao encerramento e ao período seguinte também são relevantes.

4.5 MÉTODO AHP

4.5.1 Economia

A composteira se destacou como opção mais econômica na região de Londrina e de Campo Mourão, em relação ao valor total de instalação e operação. Por este motivo, a composteira, neste estudo, foi considerada três vezes mais importante em comparação ao digestor anaeróbio (TABELA 16).

TABELA 16 – MATRIZ DE JULGAMENTO EM RELAÇÃO A ECONOMIA

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	1,00	3,00
Digestor Anaeróbio	0,33	1,00

4.5.2 Eficiência

A análise da eficiência ambiental neste estudo, é focada na redução do volume do resíduo orgânico tratado e os subprodutos gerados pelos dois métodos de processamento. Os julgamentos apresentados na matriz estão com base na literatura – Barbosa (2022), Marchezetti, Kaviski e Braga (2011), CEMPRE (2018).

Os digestores anaeróbicos têm a capacidade de produzir biogás, que pode ser convertido em energia térmica e elétrica, beneficiando comunidade locais, especialmente em áreas isoladas, devido à produção local dos insumos (BARBOSA, 2022). Como subproduto, os digestores podem produzir biofertilizantes para o uso da agricultura. Além disso, em relação ao volume, o digestor anaeróbio consegue reduzir aproximadamente 60% do valor inicial, contribuindo para direcionar uma quantidade mínima de resíduos para os aterros sanitários (MARCHEZETT; KAVISK; BRAGA, 2011).

As composteiras têm uma capacidade menor de redução de volume de resíduos orgânicos em comparação com os digestores anaeróbios, alcançando uma redução de aproximadamente 40% em relação ao volume inicial (MARCHEZETT;

KAVISK; BRAGA, 2011). Como subproduto, a literatura destaca a produção de composto orgânicos rico em nutrientes que pode ser usado na agricultura (CEMPRE, 2018).

Em razão da maior porcentagem da redução de volume e subprodutos gerados, o julgamento do digestor anaeróbico, neste estudo, foi considerado quatro vezes mais importante comparação com o processo de composteira (TABELA 17).

TABELA 17 – MATRIZ DE JULGAMENTO EM RELAÇÃO A EFICIÊNCIA

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	1	0,25
Digestor Anaeróbio	4,00	1

4.5.3 Capacidade de Processamento

As composteiras têm a capacidade de realizar tratamento em escala industrial, processando aproximadamente 300 toneladas por dia (CEMPRE, 2018). De maneira semelhante, os digestores anaeróbios apresentam tecnologia com capacidade na mesma faixa de processamento (BNDES, 2014). Em relação ao tempo necessário para completar os três processos de digestão nos digestores, esse período é estimado em até 100 dias (SASSE, 1988). Já as composteiras podem demandar um pouco mais de tempo, aproximadamente quatro meses, quanto utilizando o método natural (CEMPRE, 2018).

Como os valores foram próximos, tanto na escala de processamento e no período, ambos vão receber o mesmo grau de importância (TABELA 18).

TABELA 18 – MATRIZ DE JULGAMENTO EM RELAÇÃO A CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	1,00	1,00
Digestor Anaeróbio	1,00	1,00

4.5.4 Verificação das prioridades pelo método AHP

Após a construção da matriz comparativa dos critérios e das alternativas, tornou-se necessário avaliar as prioridades. O primeiro passo para esta avaliação

consiste em realizar a soma das colunas (TABELA 19,TABELA 20,TABELA 21 e TABELA 22).

TABELA 19 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DOS CRITÉRIOS

	Economia	Eficiência	Capacidade de Processamento
Economia	1,00 +	3,00 +	5,00 +
Eficiência	0,33 +	1,00 +	3,00 +
Capacidade de Processamento	0,20 =	0,33 =	1,00 =
Soma	1,53	4,33	9,00

TABELA 20 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DE ECONOMIA

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	1,00 +	3,00 +
Digestor Anaeróbio	0,33 =	1,00 =
Soma	1,33	4,00

TABELA 21 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DE EFICIÊNCIA

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	1,00 +	0,25 +
Digestor Anaeróbio	4,00 =	1,00 =
Soma	5,00	1,25

TABELA 22 – SOMA DAS COLUNAS DA MATRIZ DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	1,00 +	1,00 +
Digestor Anaeróbio	1,00 =	1,00 =
Soma	2,00	2,00

Após essa etapa, cada valor de julgamento foi dividido pelo total da soma de coluna correspondente (TABELA 23, TABELA 24, TABELA 25 e TABELA 26).

TABELA 23 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DOS CRITÉRIOS

	Economia	Eficiência	Capacidade de Processamento
Economia	$1,00/1,53 = 0,65$	$3,00/4,33 = 0,69$	$5,00/9,00 = 0,56$
Eficiência	$0,33/1,53 = 0,22$	$1,00/4,33 = 0,23$	$3,00/9,00 = 0,33$
Capacidade de Processamento	$0,20/1,53 = 0,13$	$0,33/4,33 = 0,08$	$1,00/9,00 = 0,11$

TABELA 24 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DE ECONOMIA

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	$1,00/1,53 = 0,75$	$3,00/4,00 = 0,75$
Digestor Anaeróbio	$0,33/1,53 = 0,25$	$1,00/4,00 = 0,25$

TABELA 25 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DE EFICIÊNCIA

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	$1,00/5,00 = 0,20$	$0,25/1,25 = 0,20$
Digestor Anaeróbio	$4,00/5,00 = 0,80$	$1,00/1,25 = 0,80$

TABELA 26 – NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	$1,00/2,00 = 0,50$	$1,00/2,00 = 0,50$
Digestor Anaeróbio	$1,00/2,00 = 0,50$	$1,00/2,00 = 0,50$

Depois dessa etapa, foi calculada a média de cada linha, proporcionando os valores das prioridades dos critérios, bem como as prioridades iniciais das alternativas (TABELA 27, TABELA 28, TABELA 29 e TABELA 30).

TABELA 27 – PRIORIDADE DOS CRITÉRIOS

Critérios	Prioridade
Economia	$(0,65+0,69+0,56) / 3 = 0,63$
Eficiência	$(0,22+0,23+0,33) / 3 = 0,26$
Capacidade de Processamento	$(0,13+0,08+0,11) / 3 = 0,11$

TABELA 28 – PRIORIDADE PARCIAL DE ECONOMIA

Alternativa	Prioridade
Composteira	$(0,75+0,75) / 2 = 0,75$
Digestor Anaeróbio	$(0,25+0,25) / 2 = 0,25$

TABELA 29 – PRIORIDADE PARCIAL DE EFICIÊNCIA

Alternativa	Prioridade
Composteira	$(0,20+0,20) / 2 = 0,20$
Digestor Anaeróbio	$(0,80+0,80) / 2 = 0,80$

TABELA 30 – PRIORIDADE PARCIAL DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO

Alternativa	Prioridade
Composteira	$(0,50+0,50) / 2 = 0,50$
Digestor Anaeróbio	$(0,50+0,50) / 2 = 0,50$

No método AHP, é essencial verificar a coerência em relação aos valores fornecidos durante o julgamento. Inicialmente, na matriz não normalizada, que contém apenas os valores do julgamento, procede-se à multiplicação dos valores de prioridade em suas colunas correspondentes. Por exemplo, se a prioridade de eficiência para a composteira for de 0,20, realiza-se a multiplicação desse valor com todos os elementos da coluna da composteira na matriz de julgamento de eficiência (TABELA 31, TABELA 32, TABELA 33 e TABELA 34).

TABELA 31 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DOS CRITÉRIOS COM AS PRIORIDADES

	Economia	Eficiência	Capacidade de Processamento
Economia	$1,00 \times 0,63 = 0,63$	$3,00 \times 0,26 = 0,78$	$5,00 \times 0,11 = 0,53$
Eficiência	$0,33 \times 0,63 = 0,21$	$1,00 \times 0,26 = 0,26$	$3,00 \times 0,11 = 0,32$
Capacidade de Processamento	$0,20 \times 0,63 = 0,13$	$0,33 \times 0,26 = 0,09$	$1,00 \times 0,11 = 0,11$

TABELA 32 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DE ECONOMIA COM AS PRIORIDADES

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	$1,00 \times 0,75 = 0,75$	$3,00 \times 0,25 = 0,75$
Digestor Anaeróbio	$0,33 \times 0,75 = 0,25$	$1,00 \times 0,25 = 0,25$

TABELA 33 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DE EFICIÊNCIA COM AS PRIORIDADES

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	$1,00 \times 0,20 = 0,20$	$0,25 \times 0,80 = 0,20$
Digestor Anaeróbio	$4,00 \times 0,20 = 0,80$	$1,00 \times 0,80 = 0,80$

TABELA 34 – MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DE CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO COM AS PRIORIDADES

	Composteira	Digestor Anaeróbio
Composteira	$1,00 \times 0,50 = 0,50$	$1,00 \times 0,50 = 0,50$
Digestor Anaeróbio	$1,00 \times 0,50 = 0,50$	$1,00 \times 0,50 = 0,50$

Em seguida, foi feito à soma de cada linha. Os valores obtidos foram divididos pelas prioridades correspondentes, seguido por uma nova soma desses resultados. Este último resultado foi então dividido pela ordem da matriz, que, no contexto do estudo, é de ordem 3 para os critérios e 2 para as alternativas, resultando nos valores de λ (TABELA 35).

TABELA 35 – VALORES DE λ PARA O CÁLCULO DE COERÊNCIA DE JULGAMENTOS

Matriz	λ
Critérios	3,04
Alternativa Economia	2
Alternativa Eficiência	2
Alternativa Capacidade de Processamento	2

Em seguida, aplica-se a fórmula abaixo, utilizando os valores de I.R. conforme especificados na TABELA 4. Os resultados do R.C (TABELA 36) desse procedimento foram inferiores a 0,1 confirmando a consistência nos julgamentos.

$$RC = \frac{(\lambda - n)}{n - 1} / IR$$

TABELA 36 – VALORES DO R.C.

Matriz	R.C
Critérios	0,03
Alternativa Economia	0,00
Alternativa Eficiência	0,00
Alternativa Capacidade de Processamento	0,00

A última fase do método AHP envolver o cálculo das prioridades das alternativas com base nas prioridades dos critérios. Para isso, os valores dos critérios em cada coluna (conforme TABELA 37) foram multiplicados, seguido pela soma de cada linha para obter as prioridades finais (TABELA 38).

TABELA 37 – MULTIPLICAÇÃO DA PRIORIDADE DOS CRITÉRIOS COM AS PRIORIDADES DAS ALTERNATIVAS DE CADA COLUNA

	Economia	Eficiência	Capacidade de Processamento
Prioridade dos Critérios	0,63	0,26	0,11
Digestão Anaeróbia	0,25	0,80	0,50
Composteira	0,75	0,20	0,50

TABELA 38 – PRIORIDADE FINAL DAS ALTERNATIVAS

	Economia	Eficiência	Capacidade de Processamento	Prioridade Final
Digestão Anaeróbia	0,16 +	0,21 +	0,05 =	0,42
Composteira	0,48 +	0,05 +	0,05 =	0,58

Notavelmente, a composteira apresentou uma prioridade de 0,58 um pouco maior em comparação ao digestor anaeróbio (0,42), indicando ser uma alternativa promissora para o tratamento da fração orgânica em ambas as regiões. Essa diferença de prioridades entre a composteira e o digestor anaeróbio pode ser atribuída à ênfase dada a economia como critério principal neste estudo, no qual a composteira demonstrou um valor reduzido em comparação ao digestor anaeróbio.

Optou-se por não utilizar graus de intensidade elevados, como 6 ou 8, devido à constatação de que as duas alternativas em consideração não apresentaram grande discrepâncias nas características analisadas. Em situações em que as diferenças são mais sutis, a aplicação de valores moderados, como 2 ou 4, foi mais apropriada, pois permite uma representação mais equilibrada do julgamento de importância entre as opções (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão de RSU em alguns municípios no Estado do Paraná necessita de investimentos em soluções para o tratamento. Dessa forma, este estudo demonstrou alguns valores de implantação e operação de tecnologias que possam mitigar problemas relacionados ao descarte irregular de resíduos recicláveis, orgânicos e rejeitos nos municípios do estado do Paraná.

A regionalização mostrou-se uma abordagem eficiente para aproximar os municípios, facilitando a gestão coletiva de resíduos. Essa estratégia busca evitar grandes deslocamentos de resíduos, importante para o estudo, já que a análise é feita para uma quantidade grande de municípios, concentrando tecnologias de tratamento, como usinas de triagem e aterros sanitários, em áreas específicas. Essa concentração facilita o monitoramento e a gestão eficientes, contribuindo para uma abordagem mais organizada e sustentável no manejo de resíduos.

Com base no orçamento de instalação e operação calculada para a usina de triagem, percebe-se valores elevados, principalmente em relação a operação. Isso ocorre devido a passagem de todo os RSU gerados pelos municípios. Diante dos custos elevados para a usina de triagem, principalmente no contexto de tantos municípios e tanto de lixo gerado, uma possível alternativa seria pensar na implementação de uma coleta seletiva efetiva na região, reduzindo os números de rejeitos encaminhados para usina.

No contexto da fração orgânica, a escolha do método AHP foi fundamental para determinar a melhor tecnologia de tratamento. Este método ajudou a quantificar o objetivo considerando alguns critérios como custos, eficiência e capacidade de processamento, permitindo uma decisão equilibrada no processo de seleção de tecnologia de tratamento da fração orgânica. Os valores selecionados neste estudo não são fixos, pois estudos com diferentes objetivos podem alterar a importância atribuída a esses valores.

Neste estudo, a distinção entre os dois cenários estudados está no tratamento da fração orgânica. Após estabelecer a composteira como integrante do cenário mais adequado, o estudo apresentou valores de referência para implantação e operação de tecnologias voltados à mitigação dos desafios associados aos RSU nas regiões de Campo Mourão e Londrina. A análise dos custos proporciona uma orientação para

futurar decisões e investimento na gestão sustentável dos resíduos nessas localidades.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o horizonte temporal da análise, levando em conta projeções populacionais. Este enfoque permitiria uma visão mais abrangente das demandas e desafios relacionados ao gerenciamento de resíduos ao longo do tempo. Além disso, seria valioso incluir uma análise da logística de transporte de resíduos, uma vez que esse elemento pode impactar diretamente nos custos operacionais.

Outro ponto relevante seria a consideração de outras tecnologias que possam contribuir para a mitigação dos problemas identificados durante as Operações Percola. Explorar soluções inovadoras e sustentáveis pode enriquecer as opções disponíveis para o tratamento de resíduos.

Além disso, é recomendável analisar os rejeitos gerados no processo de tratamento da fração orgânica. Entender sua natureza e criar um plano eficiente para descartá-los, possivelmente enviando-os ao aterro sanitário, é essencial para garantir uma gestão completa e responsável dos resíduos orgânicos, melhorando a abordagem da gestão de resíduos nessas regiões.

REFERÊNCIAS

ABETRE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS & FGV – Fundação Getúlio Vargas. Estudo sobre os Aspectos Econômicos e Financeiros da Implantação e Operação de Aterros Sanitários, 2009. Disponível em: < Aterros Sanitários - Relatório final_completo_.pdf (abetre.org.br)>.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14044**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – referências – elaboração. Rio de Janeiro, 1992.

BARBOSA, F. H. M. **Construção de biodigestor e o emprego de biofertilizantes na região amazônica**. 2022. Dissertação (Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural e Gestão de Empreendimentos Agroalimentares) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Castanhal (PA), 2022. Disponível em: < http://repositorio.ifpa.edu.br/jspui/bitstream/prefix/451/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o_ConstrucaoBiodigestorEmprego.pdf >. Acesso em: 10 de nov. de 2023.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **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

BRASIL, **Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm >. Acesso em: 29 jun. 2023

CALIJURI, M.; CUNHA, D. **Engenharia Ambiental - Conceitos, Tecnologias e Gestão 2ª ed.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**/Coordenação geral André Vilhena. – 4. ed. – São Paulo: CEMPRE, 2018. 374 p.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 481, de outubro de 2017**. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Brasília, DF: CONAMA, 2017.

DUBEY, V. The definition of regional economics. **Journal of Regional Science**, v. 5, n. 2, p. 25-29, dez. 1964. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1964.tb01463.x>. Acesso em: 14 ago. 2023.

GOMES, Luciana *et al.* Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, p. 449-462, 2015.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & saúde coletiva**, v. 17, p. 1503-1510, 2012.

GRANZOTTO, F. *et al.* Use of anaerobic biodigester in the treatment of organic waste from a university restaurant. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 105795, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Inflação** (s.d.). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 30 de outubro de 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE

ISWA – INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. **O futuro do setor de gestão de resíduos: Tendências, oportunidade e desafios para a década (2021 – 2030)** / Coordenação geral, edição e revisão: Carlos RV Silva Filho, Björn Appelqvist e Anne Woolridge, 2021.

JÚNIOR, R. T.; SAIANI, C. C. S.; DOURADO, Juscelino. **Resíduos Sólidos no Brasil: Oportunidades e Desafios da Lei Federal n. 12.305 (Lei de Resíduos Sólidos)**. Editora Manole, 2014. E-book. ISBN 9788520449240. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520449240/>. Acesso em: 14 jun. 2023.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P. VAN WOERDEN, F., **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. Urban Development; © Washington, DC: World Bank. 2018.

LEITÃO, R. C.; BARCELOS, W. M. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos de centrais de abastecimento de hortifrutigranjeiros – **Embrapa Agroindústria Tropical**, Fortaleza (CE) 2021.

LIMA, J.; JUCÁ, J.; REICHERT, G.; FIRMO, A. Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 33-42, 2014.

MAÇÃES, M. **Planeamento, Estratégia e Tomada de Decisão - Vol IV** Grupo Almedina (Portugal), 2018. E-book. ISBN 9789896942274. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9789896942274/>. Acesso em: 19 nov. 2023.

MARCHEZETTI, A. L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. C. B. Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 173-187, abr./jun. 2011.

MARTINHO, M. G. M.; GONÇALVES, M. G. P. **Gestão de resíduos**. Universidade Aberta, 2000. 65 p.

MERSONI, C.; REICHERT, G.. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 863-875, 2017.

MPPR - MINISTÉRIO PÚBLICO DO PARANÁ. Desdobramento Operação Percola II – GAEMA de Londrina. Disponível em: <<https://site.mppr.mp.br/meioambiente/Noticia/Desdobramentos-Operacao-Percola-II-GAEMA-de-Londrina>>. Acesso em: 20 de out. de 2023.

MÜLLER, L.; ARRUDA, J.; ALCANTARA, R.; PEREIRA, R. Uma análise multicritério de alternativas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos do município de Juazeiro do Norte no Ceará. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 159-170, 2021.

PARANÁ. Governo do Estado do Paraná. Plano de Resíduos Sólidos do Paraná. Curitiba, 2018.

CEMA. **Resolução CEMA nº90 de 03/12/2013**. Estabelece condições, critérios e dá outras providências, para empreendimentos de compostagem de resíduos sólidos de origem urbana e de grandes geradores e para o uso do composto gerado, Paraná, 2013.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Gestión de residuos orgánicos en América Latina: desafíos y ventajas de las principales opciones y tendencias de tratamiento**/ Consultora: Gabriele G. P. Otero Sartini. ALBREPE, 2017.

PIÑAS, J.; VENTURINI, O.; LORA, E.; OLIVEIRA, M.; ROALCABA, O. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 33, p. 175-188, 2016.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. D. **Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Application with Benefits, Opportunities, Costs and Risks**. Pittsburgh, PA, EUA, 2006.

SASSE, L. Biogas plants. **Vieweg & Sohn. Wiesbaden**, Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1988.

SEDEST - SECRETÁRIO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Operação Percola 2: IAT e MP encontram irregularidades na gestão de resíduos sólidos. Política Ambientais, 2021. Disponível em: <<https://www.sedest.pr.gov.br/Noticia/Operacao-Percola-2-IAT-e-MP-encontram-Irregularidades-na-gestao-de-residuos-solidos>>. Acesso em: 20 de out. de 2023

SEDEST/IAT. **Resolução nº 09**. Dispõe sobre incentivos ao aproveitamento energético de resíduos sólidos por rotas biológicas ou térmicas, buscando priorizar a hierarquia apresentada na PNRS de não-geração, redução, reutilização e reciclagem, bem como incentivos e apoio à pesquisa, desenvolvimento e inovação realizados por órgãos públicos, pela academia e sociedade civil organizada em temas relacionados a rotas tecnológicas de tratamento. Paraná, 2022.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO - Manejo de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs>>. Acesso em: 08 de ago. de 2023

SOUZA, M.E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, v. 44, n. 137, p. 88-94, 1984.

YANG, F.; LI, Y.; HAN, Y.; QIAN, W.; LI, G.; LUO, W.. Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting. **Science of the Total Environment**, v. 657, p. 262-269, 2019.

YAP, H. ; NIXON, J. . A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste management**, v. 46, p. 265-277, 2015.

APÊNDICE 1 – GERAÇÃO DE RSU NA REGIÃO DE LONDRINA E CAMPO MOURÃO

TABELA 39 - GERAÇÃO DE RSU GERADO NA REGIÃO DE LONDRINA POR DIA

Município	Habitante (IBGE, 2022)	RSU gerados (kg)	Recicláveis (kg)	Orgânico (kg)	Rejeitos (kg)
Norte					
Londrina	555.937	639.327,55	236.551,19	255.731,02	147.045,34
Arapongas	119.138	95.310,4	32.405,54	46.702,10	16.202,77
Cambé	107.208	85.766,4	29.160,58	42.025,54	14.580,29
Ibiporã	51.603	37.670,19	12.807,86	18.458,39	6.403,93
Rolândia	71.670	52.319,10	17.788,49	25.636,36	8.894,25
Alvorada do Sul	10.326	6.505,38	1.756,45	3.903,23	845,70
Bela Vista do Paraíso	14.833	9.344,79	2.523,09	5.606,87	1.214,82
Cafeara	2.627	1.655,01	446,85	993,01	215,15
Centenário do Sul	10.832	6.824,16	1.842,52	4.094,50	887,14
Florestópolis	11.446	7.210,98	1.946,96	4.326,59	937,43
Guaraci	4.748	2.991,24	807,63	1.794,74	388,86
Jaguapitã	15.122	11.039,06	2.980,55	6.623,44	1.435,08
Lupionópolis	4.813	3.032,19	818,69	1.819,31	394,18
Miraselva	1.966	1.238,58	334,42	743,15	161,02
Porecatu	11.624	7.323,12	1.977,24	4.393,87	952,01
Prado Ferreira	3.709	2.336,67	630,90	1.402,00	303,77
Primeiro de Maio	10.082	6.351,66	1.714,95	3.811,00	825,72
Sabáudia	8.822	5.557,86	1.500,62	3.334,72	722,52

Município	Habitante (IBGE, 2022)	RSU gerados (kg)	Recicláveis (kg)	Orgânico (kg)	Rejeitos (kg)
Sertanópolis	15.930	11.628,9	3.139,80	6.977,34	1.511,76
Sul					
Arapuã	3.527	2.222,01	599,94	1.333,21	288,86
Ariranha do Ivaí	2.329	1.467,27	396,16	880,36	190,75
Borrazópolis	7.735	4.873,05	1.315,72	2.923,83	633,50
Califórnia	8.710	5.487,3	1.481,57	3.292,38	713,35
Cambira	9.460	5.959,8	1.609,15	3.575,88	774,77
Cruzmaltina	2.882	1.815,66	490,23	1.089,40	236,04
Faxinal	16.389	11.963,97	3.230,27	7.178,38	1.555,32
Godoy Moreira	2.977	1.875,51	506,39	1.125,31	243,82
Grande Rios	5.641	3.553,83	959,53	2.132,30	462,00
Ivaiporã	32.720	23.885,6	6.449,11	14.331,36	3.105,13
Jardim Alegre	12.004	7.562,52	2.041,88	4.537,51	983,13
Lidianópolis	3.938	2.480,94	669,85	1.488,56	322,52
Lunardelli	4.872	3.069,36	828,73	1.841,62	399,02
Marilândia do Sul	8.677	5.466,51	1.475,96	3.279,91	710,65
Mauá da Serra	9.383	5.911,29	1.596,05	3.546,77	768,47
Novo Itacolomi	3.125	1.968,75	531,56	1.181,25	255,94
Rio Bom	3.197	2.014,11	543,81	1.208,47	261,83
Rio Branco do Ivaí	3.808	2.399,04	647,74	1.439,42	311,88
Rosário do Ivaí	5.435	3.424,05	924,49	2.054,43	445,13

Município	Habitante (IBGE, 2022)	RSU gerados (kg)	Recicláveis (kg)	Orgânico (kg)	Rejeitos (kg)
Leste					
Assaí	13.797	8.692,11	2.346,87	5.215,27	1.129,97
Jataizinho	11.813	7.442,19	2.009,39	4.465,31	967,48
Nova América da Colina	3.280	2.066,40	557,93	1.239,84	268,63
Nova Santa Bárbara	4.184	2.635,92	711,70	1.581,55	342,67
Santa Cecília do Pavão	3.365	2.119,95	572,39	1.271,97	275,59
São Jerônimo da Serra	10.830	6.822,9	1.842,18	4.093,74	886,98
São Sebastião da Amoreira	8.063	5.079,69	1.371,52	3.047,81	660,36
Tamarana	10.707	6.745,41	1.821,26	4.047,25	876,90
Oeste					
Apucarana	130.134	104.107,2	35.396,45	51.012,53	17.698,22
Barbosa Ferraz	10.795	6.800,85	1.836,23	4.080,51	884,11
Bom Sucesso	6.581	4.146,03	1.119,43	2.487,62	538,98
Corumbataí do Sul	3.760	2.368,80	639,58	1.421,28	307,94
Jandaia do Sul	21.408	15.627,84	4.219,52	9.376,70	2.031,62
Kaloré	4.582	2.886,66	779,40	1.732,00	375,27
Marumbi	4.699	2.960,37	799,30	1.776,22	384,85
São João do Ivaí	10.667	6.720,21	1.814,46	4.032,13	873,63
São Pedro do Ivaí	8.690	5.474,7	1.478,17	3.284,82	711,71

FONTE: Elaborado com os valores do PERS – PR, 2018

TABELA 40 - GERAÇÃO DE RSU GERADO NA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO POR DIA

Município	Habitante (IBGE, 2022)	RSU gerados (kg)	Recicláveis (kg)	Orgânico (kg)	Rejeitos (kg)
Norte					
Cianorte	79.527	58.054,70	19.738,6	28.446,81	9.869,3
Araruna	14.485	9.125,60	2.463,9	5.475,33	1.186,32
Engenheiro Beltrão	12.454	7.846,0	2.118,43	4.707,61	1.019,98
Farol	3.039	1.914,6	516,93	1.148,74	248,89
Japurá	9.144	5.760,70	1.555,39	3.456,43	748,89
Jussara	6.690	4.214,70	1.137,97	2.528,82	547,91
Paraíso do Norte	13.245	8.344,40	2.252,97	5.006,61	1.084,77
Peabiru	13.346	8.408,00	2.270,15	5.044,79	1.093,04
São Manoel do Paraná	2.138	1.346,90	363,67	808,16	175,1
Mirador	2238	1409,90	380,68	845,96	183,29
Indianópolis	4.448	2.802,20	756,60	1.681,34	364,29
São Carlos do Ivaí	6.587	4.149,81	1.120,45	2.489,89	539,48
São Tomé	5.232	3.296,16	889,96	1.977,7	428,5
Terra Boa	17.568	12.824,64	3.462,65	7.694,78	1.667,2
Sul					
Altamira do Paraná	3.590	2.261,70	610,66	1.357,02	294,02
Campina da Lagoa	15.723	11.477,80	3.099,00	6.886,67	1.492,11
Juranda	7.771	4.895,73	1.321,85	2.937,44	636,44

Município	Habitante (IBGE, 2022)	RSU gerados (kg)	Recicláveis (kg)	Orgânico (kg)	Rejeitos (kg)
Mamborê	13.452	8.474,80	2.288,19	5.084,86	1.101,72
Nova Cantu	6.790	4.277,70	1.154,98	2.566,62	556,1
Roncador	11.251	7.088,10	1.913,8	4.252,88	921,46
Leste					
Campo Mourão	99.432	72.585,40	24.679,02	35.566,83	12.339,51
Fênix	4.492	2.829,90	764,09	1.697,98	367,89
Iretama	10.684	6.730,90	1.817,35	4.038,55	875,02
Luiziana	6.690	4.214,70	1.137,97	2.528,82	547,91
Quinta do Sol	5.001	3.150,60	850,67	1.890,38	409,58
Oeste					
Boa Esperança	4.558	2.871,50	775,32	1.722,92	373,3
Goioerê	28.437	20.759,00	5.604,93	12.455,41	2.698,67
Janiópolis	5.870	3.698,10	998,49	2.218,86	480,75
Moreira Sales	11.175	7.040,30	1.900,87	4.224,15	915,23
Quarto Centenário	4.201	2.646,60	741,59	1.587,98	344,06
Rancho Alegre D'Oeste	2.618	1.649,30	445,32	989,6	214,41
Ubiratã	24.749	18.066,77	4.878,03	10.840,06	2.348,68

FONTE: Elaborado com os valores do PERS – PR, 2018