UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS

VIÉS HÍDRICO DA HOMOGENEIZAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

MARCONI VIEIRA DA SILVA

Campina Grande – PB
Agosto - 2026

MARCONI VIEIRA DA SILVA

VIÉS HÍDRICO DA HOMOGENEIZAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito legal para obtenção do título de doutor em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Naturais

Orientadora: Prof.ª. Dr.ª. Viviane Farias Silva

Coorientador: Prof. Dr. Elfany Reis do Nascimento Lopes

Campina Grande – PB
Agosto - 2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

S586v Silva, Marconi Vieira da.

Viés hídrico da homogeneização na caracterização de resíduos sólidos urbanos / Marconi Vieira da Silva. – 2026.

126 f. : il. color.

Tese (doutorado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2026.

"Orientação: Profa. Dra. Viviane Farias Silva, Prof. Dr. Elfany Reis do Nascimento Lopes".

Referências.

1. Políticas de Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Efeito Esponja. 3. Teoria da Amostragem. 4. Transferência de Umidade. 5. Dados Composicionais. 6. Fator de Correção. I. Silva, Viviane Farias. II. Lopes, Elfany Reis do Nascimento. III. Título.

UFCG/BC CDU 628.4 (043.2)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA ITAPUANA SOARES DIAS GONÇALVES CRB-15/93

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

Marconi Vieira da Silva

“ VIÉS HÍDRICO DA HOMOGENEIZAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS”.

TESE apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de Doutor Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 24/08/2026

Dr.(a.) **Viviane Farias Silva** (Orientadora PPGEGRN).

Dr.(a.) **Elfany Reis do Nascimento Lopes** (Coorientador).

Dr.(a.) **Madson Tavares Silva/PPGEGRN**(Examinador Interno).

Dr.(a.) **Vera Lúcia Antunes de Lima/PPGEGRN** (Examinador Interno).

Dr.(a.) **Abílio José Procópio Queiroz/UFSB** (Examinador Externo).

Dr.(a.) **Narcísio Cabral de Araújo/UFSB** (Examinador Externo).

Documento assinado eletronicamente por **VIVIANE FARIAS SILVA**, **COORDENADORA DE PÓS GRADUAÇÃO**, em 08/09/2026, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **MADSON TAVARES SILVA**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/09/2026, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da

Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/09/2026, às 18:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Abílio José Procópio Queiroz**, **Usuário Externo**, em 10/09/2026, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Narcísio Cabral de Araújo**, **Usuário Externo**, em 11/09/2026, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade, informando o código verificador **6761050** e o código CRC **22D8695F**.

Referência: Processo nº 23096.046851/2026-20 SEI nº 6761050

Documento assinado digitalmente
ELFANY REIS DO NASCIMENTO LOPES
Data: 22/09/2026 08:42:43-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dedico esta tese à minha família, principalmente à minha esposa, alicerce que sustentou cada etapa desta jornada, e a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

AGRADECIMENTOS

Ao meu anjo da guarda, protetor e guia.

Ao meu pai, por toda admiração, preocupação e incentivo ao longo dessa jornada.

À minha amada esposa, por todo o amor, cuidado apoio e confiança.

A minha orientadora Professora Viviane Farias, por toda sua compreensão, confiança e disponibilidade nos momentos em que precisei.

Ao meu coorientador Professor Elfany Reis, que para além de um amigo próximo, mais uma vez se empenhou mais do que devia para me auxiliar, cobrar, incentivar e ajudar nessa etapa.

Ao diretor do Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica (CIEB) de Eunápolis-BA, o professor Claudionor Pereira, por toda sua receptividade e apoio para a realização dos trabalhos de campo desta pesquisa.

À Faculdade Pitágoras de Medicina de Eunápolis-BA, nas pessoas do Prof. Mário Gontijo e da diretora Profª Tattiana Tessye, pela cessão do laboratório para a realização dos experimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

RESUMO

A caracterização gravimétrica de resíduos sólidos urbanos (RSU) subsidia o dimensionamento de sistemas de triagem, compostagem e reciclagem, e depende de protocolos de amostragem que prescrevem a homogeneização mecânica da amostra antes da redução de massa. Esta tese investigou se essa etapa, cuja neutralidade quanto às propriedades dos materiais é pressuposta pelas normas ABNT NBR 10.007:2004 e ASTM D5231 sem verificação experimental, altera a distribuição de umidade entre as frações e enviesa a composição obtida. Os resultados estão organizados em quatro capítulos articulados. A revisão integrativa reuniu 123 estudos com metadados verificados e estabeleceu que a homogeneização é aplicada de forma consistente, mas que a teoria da amostragem que legitima a amostragem de RSU não trata a umidade como propriedade redistribuível entre frações. O estudo comparativo conduzido no Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica (CIEB), em Eunápolis, Bahia, aplicou três protocolos, um por campanha, em dias distintos: o Método Geral (triagem integral, 72,65 kg), a ABNT NBR 10.007:2004 (homogeneização com quarteamento, 21,53 kg) e a ASTM D5231 (homogeneização sem quarteamento, 104,80 kg). O protocolo que triou menos massa (ABNT, 21,53 kg) registrou apenas seis das dez categorias, ante as dez detectadas sob a ASTM e as nove da triagem integral, e a agregação em macrogrupos funcionais reduziu de 1,4 a 2,6 vezes as distâncias composicionais entre protocolos, ocultando a divergência interna em vez de eliminá-la. Como, nesse delineamento, protocolo e dia de coleta permanecem confundidos, o mecanismo foi isolado por um experimento pareado, em quatro campanhas nas quais o mesmo lote de resíduos foi submetido simultaneamente aos três métodos. A homogeneização transferiu água da fração orgânica biodegradável para as frações secas de plástico e papel/papelão; como a massa hídrica total da amostra não variou, trata-se de redistribuição interna, e não de ganho de material. Essa água absorvida inflou a massa aparente dos recicláveis secos em até um quarto da massa reportada, com fatores de correção de 0,72 a 0,77 para plásticos e papel/papelão, validados por regressão. A tese consolidou esses achados em uma proposição de ajuste às normas de amostragem: reconhece os RSU como material higroscópico, recomenda a triagem sem homogeneização quando viável, exige o reporte da composição em base seca por fração e o registro das condições de umidade, e prevê o registro da massa efetivamente triada, sem instrumentação além da já prevista na rotina de caracterização. Os resultados evidenciam uma classe de erro de preparo não modelada pela teoria da amostragem clássica, com implicações para o dimensionamento de sistemas de tratamento e para políticas de resíduos sólidos.

Palavras-chave: efeito esponja; teoria da amostragem; transferência de umidade; dados composicionais; fator de correção.

ABSTRACT

Gravimetric characterization of municipal solid waste (MSW) is essential for sizing sorting, composting, and recycling systems, and depends on sampling protocols that prescribe mechanical homogenization of the sample before mass reduction. This thesis investigated whether this step, whose neutrality with respect to material properties is presumed by ABNT NBR 10.007:2004 and ASTM D5231 without experimental verification, alters the distribution of moisture among fractions and biases the composition obtained. The results are organized in four articulated chapters. An integrative review compiled 123 studies with verified metadata and established that homogenization is applied consistently, but that the sampling theory legitimizing municipal solid waste sampling does not treat moisture as a redistributable property among fractions. A comparative study conducted at the Integrated Complex of Basic, Professional and Technological Education (CIEB) in Eunápolis, Bahia, applied three protocols, one per campaign, on separate days: the General Method (integral sorting, 72.65 kg), ABNT NBR 10.007:2004 (homogenization with quartering, 21.53 kg), and ASTM D5231 (homogenization without quartering, 104.80 kg). The protocol that sorted the least mass (ABNT, 21.53 kg) registered only six of the ten categories, compared with ten detected under ASTM and nine under integral sorting, and aggregation into functional macrogroups reduced compositional distances between protocols by 1.4 to 2.6 times, concealing internal divergence rather than eliminating it. Because protocol and collection day remain confounded in that design, the mechanism was isolated through a paired experiment, over four campaigns in which the same waste lot was simultaneously subjected to the three methods. Homogenization transferred water from the biodegradable organic fraction to the dry fractions of plastic and paper/cardboard; since the total water mass of the sample did not vary, this is internal redistribution, not material gain. This absorbed water inflated the apparent mass of dry recyclables by up to one quarter of the reported mass, with correction factors of 0.72 to 0.77 for plastics and paper/cardboard, validated by regression. The thesis consolidated these findings into a proposition to adjust the sampling standards: it recognizes MSW as a hygroscopic material, recommends sorting without homogenization when feasible, requires reporting of composition on a dry basis per fraction and recording of moisture conditions, and provides for recording the mass effectively sorted, without instrumentation beyond that already specified in the characterization routine. The results evidence a class of preparation error not modeled by classical sampling theory, with implications for the sizing of treatment systems and for solid waste policies.

Keywords: sponge effect; theory of sampling; moisture transfer; compositional data; correction factor.

SUMÁRIO

RESUMO **13**

ABSTRACT **14**

LISTA DE FIGURAS **19**

LISTA DE TABELAS **20**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS **21**

1 INTRODUÇÃO GERAL **22**

2 OBJETIVOS **24**

2.1 Geral 24

2.2 Específicos 24

3 RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA **25**

3.1 Inovação e Ineditismo 25

3.2 Aspectos Socioeconômicos e Ambientais 26

3.3 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável 26

4 REFERÊNCIAS **27**

5 CAPÍTULO I – O PREPARO DA AMOSTRA COMO FONTE DE VIÉS NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA **29**

5.1 RESUMO 29

5.2 ABSTRACT 30

5.3 INTRODUÇÃO 31

5.4 MATERIAL E MÉTODOS 32

5.4.1 Bases de busca e estratégia de descritores 32

5.4.2 Critérios de elegibilidade 34

5.4.3 Processo de seleção e extração 34

5.4.4 Avaliação de qualidade e limitações da revisão 37

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 40

5.5.1 Base conceitual e normativa da caracterização de RSU 45

5.5.2 Métodos de caracterização e amostragem de RSU 45

5.5.3 Teoria da amostragem e erro em materiais heterogêneos 49
5.5.4 Umidade, segregação e redistribuição de água em resíduos 50
5.5.5 Síntese e lacuna identificada 52
5.6 CONCLUSÃO 53
5.7 REFERÊNCIAS 53
6 CAPÍTULO II - MASSA TRIADA E ESCALA DE AGREGAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ANÁLISE COMPOSICIONAL DE TRÊS PROTOCOLOS AMOSTRAIS 67
6.1 RESUMO 67
6.2 ABSTRACT 68
6.3 INTRODUÇÃO 69
6.4 MATERIAL E MÉTODOS 70
6.4.1 Área e campanhas de caracterização 70
6.4.2 Protocolos comparados 70
6.4.3 Categorização dos resíduos 71
6.4.4 Análise composicional 71
6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 73
6.5.1 Composição gravimétrica e poder de detecção 73
6.5.2 Estabilidade das razões entre frações majoritárias 75
6.5.3 Efeito da agregação em macrogrupos 76
6.5.4 Limites da atribuição das divergências à homogeneização 77
6.5.5 Limitações do delineamento 79
6.6 CONCLUSÕES 80
6.7 REFERÊNCIAS 80
7 CAPÍTULO III - TRANSFERÊNCIA HÍDRICA DIRECIONAL INDUZIDA PELA HOMOGENEIZAÇÃO NORMATIZADA NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 83
7.1 RESUMO 83
7.2 ABSTRACT 84
7.3 INTRODUÇÃO 85

7.4 MATERIAL E MÉTODOS 86
7.4.1 Área de estudo e coleta dos resíduos 86
7.4.2 Delineamento experimental e métodos comparados 87
7.4.3 Determinação do teor de umidade 89
7.4.4 Protocolo de redimensionamento gravimétrico (fator de correção) 90
7.4.5 Análise estatística 90
7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 92
7.5.1 Estrutura macroscópica da composição 92
7.5.2 Efeito do método na estrutura composicional 93
7.5.3 Variação gravimétrica por categoria 94
7.5.4 Transferência de umidade e o efeito esponja 95
7.5.5 Fatores de correção e validação por regressão 98
7.5.6 Implicações e proposta de ajuste 101
7.6 CONCLUSÕES 103
7.7 REFERÊNCIAS 104
8 CAPÍTULO IV - A HOMOGENEIZAÇÃO NÃO É NEUTRA: CONSOLIDAÇÃO DOS ACHADOS E PROPOSIÇÃO DE CORREÇÃO DO VIÉS HÍDRICO NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 105
8.1 RESUMO 108
8.2 ABSTRACT 109
8.3 INTRODUÇÃO 110
8.4 MATERIAL E MÉTODOS 110
8.4.1 Resultados, síntese e diagnóstico consolidado 111
8.5 DISCUSSÃO 111
8.5.1 O viés hídrico como erro de preparo não previsto pela teoria da amostragem 113
8.5.2 Implicações para a análise de dados composicionais 114
8.5.3 Fragilidades dos protocolos normativos vigentes 115
8.5.4 Alternativas de correção e proposição de ajuste normativo 117

8.5.5 Consequências para a gestão de resíduos 118
8.5.6 Limitações e agenda de validação 119
8.6 CONCLUSÕES 121
8.7 REFERÊNCIAS 122
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS 124
10 DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de identificação, triagem, elegibilidade e verificação bibliográfica dos estudos considerados na revisão. 37

Figura 2 - Variação multiplicativa da razão entre cada fração e a fração Orgânicos, nos protocolos normativos, em relação ao Método Geral. 75

Figura 3 - Efeito da amalgamação sobre a distância composicional entre protocolos, sob dimensão constante de três partes. 77

Figura 4 – Localização do município de Eunápolis, Bahia, e do Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica (CIEB). 87

Figura 5 - Fluxograma do delineamento experimental do estudo do efeito esponja, das campanhas pareadas de coleta à derivação dos fatores de correção. 88

Figura 6 – Perfil gravimétrico médio (%) por método de amostragem. 93

Figura 7 – Ordenação NMDS da composição gravimétrica (dissimilaridade de Bray-Curtis), com elipses de confiança de 95% por método. 94

Figura 8 – Composição gravimétrica (%) por categoria e método; letras distintas indicam diferença significativa (Tukey, $p < 0,05$). 95

Figura 9 – Teor de umidade médio (%) da massa total e das frações orgânica, plástica e de papel/papelão por método; letras distintas indicam diferença significativa (Tukey, $p < 0,001$). 96

Figura 10 – Mapa de calor dos resíduos padronizados por categoria e método. 96

Figura 11 – Salto no teor médio de umidade (pontos percentuais) da condição nativa para os protocolos ABNT e ASTM. 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Campanhas de caracterização, massa triada e poder de detecção das categorias, CIEB Eunápolis (BA), 2025. 70

Tabela 2 - Composição gravimétrica por microcategoria e protocolo de caracterização, CIEB Eunápolis (BA), 2025. 73

Tabela 3 - Matriz de variação das razões logarítmicas entre as cinco frações registradas em todos os protocolos, CIEB Eunápolis (BA), 2025. 75

Tabela 4 – Composição gravimétrica média (%) por método de amostragem. 92

Tabela 5 – Categorias com diferença significativa na ANOVA em blocos ($p < 0,05$). 94

Tabela 6 – Fatores de correção gravimétrica (Fc) por fração afetada e método. 98

Tabela 7 – Parâmetros da regressão linear para o efeito do método sobre o teor de umidade (Referência Geral como intercepto). 100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAFe – Comunidade Acadêmica Federada

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CIEB – Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica de Eunápolis

clr – Transformação de Razão Logarítmica Centrada (*centered log-ratio*)

EJA – Educação de Jovens e Adultos

Fc – Fator de Correção

MRF – Unidade de Triagem de Recicláveis (*Material Recovery Facility*)

MSW – *Municipal Solid Waste*

NBR – Norma Brasileira

NMDS – Escalonamento Multidimensional Não Métrico (*Non-metric Multidimensional Scaling*)

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PECO – População, Exposição, Comparador, Desfecho

PERMANOVA – Análise de Variância Multivariada Permutacional

PET – Politereftalato de Etileno

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*

RDF – Combustível Derivado de Resíduos (*Refuse-Derived Fuel*)

REEE – Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SRF – Combustível Sólido Recuperado (*Solid Recovered Fuel*)

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

1 INTRODUÇÃO GERAL

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) figura entre os desafios centrais das políticas ambientais contemporâneas, e a sua condução depende de uma informação básica: a composição gravimétrica. Dela dependem o dimensionamento dos sistemas de coleta, a avaliação da viabilidade de unidades de triagem e compostagem, a estimativa do potencial de recuperação de materiais recicláveis e a projeção da vida útil de aterros, decisões de infraestrutura de longo prazo e de elevado custo, tanto mais relevantes diante da projeção de que a geração mundial de resíduos alcance 3,4 bilhões de toneladas anuais até 2050 (Kaza et al., 2018). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) consolidou a caracterização gravimétrica como instrumento de planejamento, e a determinação da composição passou a orientar desde a formulação de planos municipais até o dimensionamento de arranjos de coleta seletiva e de logística reversa.

A confiabilidade dessa informação repousa sobre os protocolos de amostragem que a produzem. A caracterização de um resíduo urbano heterogêneo exige reduzir uma grande massa a uma amostra manejável que preserve as proporções do todo, e essa redução segue procedimentos normatizados. No Brasil, a ABNT NBR 10.007:2004 prescreve a homogeneização da massa coletada seguida de quarteamento sucessivo; internacionalmente, a ASTM D5231-92 estabelece procedimento análogo. Ambas incorporam uma etapa de homogeneização mecânica, revolvimento ou tombamento da massa, destinada a reduzir a heterogeneidade de distribuição antes da retirada da amostra. A representatividade da amostra assim obtida é usualmente justificada pela teoria da amostragem de Gy, arcabouço desenvolvido para materiais particulados que fundamenta boa parte da prática de amostragem ambiental (Gy; Marin, 1978; Pitard, 2019). Essa teoria descreve os erros que decorrem da redução de massa de um material heterogêneo e trata a heterogeneidade como propriedade de composição e de tamanho das partículas.

O problema que esta tese investigou nasceu de uma característica dos RSU que os protocolos normativos não incorporam. Diferentemente dos materiais inertes para os quais a teoria da amostragem foi formulada, os RSU constituem um material higroscópico, cujas frações apresentam teores de umidade muito distintos, variando de níveis relativamente baixos em plásticos e papéis a valores elevados na fração orgânica biodegradável, designada, por economia de linguagem, também pela forma abreviada fração orgânica ao longo do texto, das tabelas e das figuras. Quando frações com umidade tão distinta são postas em contato e submetidas a estresse mecânico durante a homogeneização, abre-se a possibilidade de migração

da água das frações mais úmidas para as menos úmidas ou secas, alterando, assim, a massa aparente de cada componente. A literatura de caracterização reconhece, de forma dispersa, que o manuseio e o preparo de amostras podem alterar propriedades físicas dos resíduos, incluindo a umidade (Sfeir; Reinhart; McCauley-Bell, 1999; La Cour Jansen et al., 2004; Dahlén; Lagerkvist, 2008; Edjabou et al., 2015; Boer et al., 2018; Sembiring; Ramadan; Farid, 2026; Leverenz; Souza; Christensen, 2026), e descreve a transferência de água entre componentes em nível de sistema de manejo, ao longo do tempo (Magrinho; Semião, 2008; Götze et al., 2016; Singhal et al., 2021). Não se identificou, contudo, algum estudo que isolasse e quantificasse esse fenômeno quando induzido especificamente pela etapa normatizada de homogeneização aplicada a uma amostra já coletada, nem que demonstrasse, por análise estatística direcional, a transferência de umidade entre frações com a conservação da massa hídrica total do sistema. A etapa de homogeneização permanece tratada, pela prática e pela norma, como operação neutra quanto às propriedades dos materiais que mistura. No âmbito nacional, estudos de caracterização gravimétrica em instituições de ensino (Silva et al., 2018; Nolasco et al., 2021; Pereira et al., 2025) e as obras de referência sobre o tema (Tchobanoglous; Kreith, 2002) aplicam ou descrevem os procedimentos normatizados de amostragem sem examinar seus efeitos sobre a umidade das frações, o que reforça o caráter inexplorado do fenômeno.

Dessa lacuna decorreu a hipótese central da tese: a homogeneização mecânica prescrita pelos protocolos de amostragem induz uma transferência de umidade entre frações dos resíduos, das frações orgânicas biodegradáveis úmidas, doadoras, para as frações secas de plástico e papel/papelão, receptoras, sem alterar a massa hídrica total da amostra, e essa redistribuição infla a massa aparente das frações secas, enviesando a composição gravimétrica determinada. A esse fenômeno atribui-se a designação de efeito esponja, pela analogia com a absorção diferencial de água por materiais de capacidade distinta. A hipótese implica que parte da massa contabilizada como reciclável seco em uma caracterização convencional não corresponde a material, e sim a água transferida durante o preparo, e que a magnitude desse viés é passível de medição e de correção.

A justificativa da pesquisa articulou-se em três planos. No plano científico, a confirmação da hipótese caracteriza uma classe de erro de preparo que a teoria da amostragem clássica não modela, por pressupor a invariância das partículas ao longo do manuseio. No plano metodológico, a quantificação do viés permite propor fatores de correção aplicáveis a dados obtidos sob os protocolos vigentes e alternativas de preparo que evitem o viés em sua origem, com subsídio a futuras revisões da ABNT NBR 10.007:2004 e da ASTM D5231, condicionado a validação prévia em outros contextos. No plano aplicado, a acurácia da caracterização tem

consequência direta sobre o dimensionamento de infraestrutura: a subestimação da fração orgânica biodegradável compromete o planejamento de unidades de compostagem e de biodigestão, e a superestimação dos recicláveis secos distorce as projeções de recuperação e a avaliação econômica da reciclagem, com reflexos sobre a renda de cooperativas de catadores. Onde a capacidade técnica instalada para a gestão de resíduos é limitada, um diagnóstico assentado em dados enviesados tem custo concreto.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Comparar a efetividade e a precisão dos métodos de caracterização gravimétrica em resíduos sólidos urbanos, investigando se a homogeneização por quarteamento gera um viés hídrico da homogeneização capaz de alterar a representatividade da amostra e afetar a avaliação do potencial de valorização dos resíduos.

2.2 Específicos

- Analisar e comparar os diferentes métodos de caracterização gravimétrica de resíduos sólidos, avaliando a representatividade dos resultados obtidos para as frações de resíduos sólidos urbanos;
- Quantificar a transferência de umidade (efeito esponja) entre as frações orgânica biodegradável, plástica e de papel/papelão decorrente dos processos de homogeneização e quarteamento;
- Avaliar os efeitos do processo de homogeneização na caracterização dos resíduos sólidos urbanos, visando identificar como esse procedimento interfere nos resultados dos componentes, com foco na precisão dos materiais recicláveis;
- Propor ajustes metodológicos para a NBR 10.007/2004 quanto à caracterização de resíduos sólidos urbanos, por meio da proposição de adaptações ou alternativas que possam levar a resultados mais fidedignos quanto à identificação de componentes recicláveis e reaproveitáveis.

3 RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

3.1 Inovação e ineditismo

A literatura de caracterização já reconhece, de forma dispersa, que o manuseio, o transporte e o pré-tratamento de amostras de resíduos sólidos podem alterar propriedades físicas dos materiais, incluindo o teor de umidade, e descreve a transferência de água entre componentes ao longo do sistema de manejo, que começa no descarte, na fonte geradora, e prossegue pelo acondicionamento, pela coleta e pelo transporte. O que ainda não havia sido feito, e é o que confere ineditismo a esta pesquisa, é isolar e quantificar esse fenômeno quando ele é induzido especificamente pela etapa normatizada de homogeneização mecânica prevista pelos protocolos de amostragem (ABNT NBR 10.007:2004; ASTM D5231-92), aplicada a uma amostra já coletada, e demonstrar, por meio de análise estatística direcional, a transferência de umidade das frações orgânicas biodegradáveis doadoras para as frações secas de plástico e papel/papelão receptoras, com a conservação da massa hídrica total do sistema. Soma-se a isso a aplicação, ainda pouco usual na caracterização de RSU, de técnicas de distância multivariada ao isolamento do efeito da homogeneização amostral.

Os estudos nacionais de caracterização gravimétrica de resíduos sólidos em instituições de ensino, de modo geral, aplicam metodologias de amostragem por quarteamento sem investigar os seus efeitos sobre a umidade das frações caracterizadas, tratando o processo de homogeneização como uma etapa metodológica neutra. Do mesmo modo, as obras de referência sobre caracterização de resíduos descrevem os procedimentos normatizados de amostragem sem abordar seu potencial de induzir viés hídrico nos resultados.

Assim, o ineditismo da presente pesquisa reside: (i) na identificação e na quantificação do efeito esponja, a transferência de umidade entre frações de resíduos sólidos induzida especificamente pelos protocolos normatizados de homogeneização e quarteamento (ABNT NBR 10.007:2004; ASTM D5231-92); (ii) na evidenciação estatística da direcionalidade e da conservação da massa hídrica total, por meio de delineamento experimental pareado (quatro campanhas, três métodos); (iii) na proposição de fatores de correção (Fc) potencialmente aplicáveis à correção dos resultados gravimétricos distorcidos por esse efeito; e (iv) na aplicação desse diagnóstico a um estudo de caso institucional, o Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica (CIEB), em Eunápolis, Bahia, cujo perfil de geração de resíduos, marcado pela predominância de resíduos orgânicos biodegradáveis oriundos do serviço de alimentação escolar oferecido a uma comunidade de aproximadamente

1.140 pessoas diariamente, é comparável ao de unidades de alimentação coletiva e de contextos residenciais, ampliando a relevância dos achados para além do ambiente acadêmico.

3.2 Aspectos socioeconômicos e ambientais

Do ponto de vista socioeconômico, a correção dos resultados gravimétricos distorcidos pelo efeito esponja contribui para uma quantificação mais precisa do potencial de reaproveitamento e de reciclagem dos resíduos, ordem estabelecida pelo art. 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos, e constitui informação estratégica para o dimensionamento de cooperativas e de associações de catadores de materiais recicláveis, cuja renda depende diretamente da quantidade e da qualidade dos materiais triados. Estimativas de composição gravimétrica superestimadas ou subestimadas, a exemplo da subestimação sistemática da fração orgânica biodegradável e da superestimação da fração de papel/papelão, observadas quando não se corrige o efeito esponja, podem induzir a erros no dimensionamento de plantas de triagem e de compostagem e de programas de logística reversa, com reflexos econômicos diretos sobre esses arranjos produtivos.

Do ponto de vista ambiental, a compreensão da dinâmica hídrica entre as frações dos resíduos é relevante para a gestão de lixiviados, tanto em unidades de triagem quanto em aterros sanitários, uma vez que a umidade retida ou transferida entre componentes influencia diretamente a geração e a carga orgânica do lixiviado. Um diagnóstico mais preciso da composição e da umidade dos resíduos favorece, ainda, a definição de rotas tecnológicas mais adequadas de destinação final ambientalmente adequada e de disposição final, nos termos do art. 3º da Lei nº 12.305/2010, com potencial de redução de impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos recicláveis contaminados por umidade excessiva.

3.3 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

A presente pesquisa relaciona-se diretamente a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015). Ao subsidiar a caracterização mais precisa dos resíduos sólidos urbanos e institucionais, o estudo contribui para o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), especificamente a meta 11.6, referente à redução do impacto ambiental negativo per capita das cidades, incluindo a gestão de resíduos. Contribui, também, para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), notadamente as metas 12.5 (redução da geração de resíduos por meio de prevenção, redução, reciclagem e reuso) e 12.8 (acesso à informação relevante para o desenvolvimento sustentável).

A relação entre a dinâmica hídrica dos resíduos e a geração de lixiviados aproxima o estudo do ODS 6 (Água Potável e Saneamento), em particular da meta 6.3, voltada à melhoria da qualidade da água por meio da redução da poluição. Por fim, por ser conduzida em uma instituição de ensino, com potencial de disseminação de práticas sustentáveis de gestão de resíduos junto à comunidade acadêmica, a pesquisa também dialoga com o ODS 4 (Educação de Qualidade), meta 4.7, referente à educação para o desenvolvimento sustentável.

4 REFERÊNCIAS

BOER, E. den; JEDRCZAK, A.; BOER, J. den; BUTRYMOWICZ, T. Factors affecting the reproducibility of waste sampling and composition analyses. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 17, n. 11, p. 2755-2766, 2018. https://doi.org/10.30638/eemj.2018.275

DAHLÉN, L.; LAGERKVIST, A. Methods for household waste composition studies. **Waste Management**, v. 28, n. 7, p. 1100-1112, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.014

EDJABOU, M. E.; JENSEN, M. B.; GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; PETERSEN, C.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Municipal solid waste composition: sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. **Waste Management**, v. 36, p. 12-23, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.009

GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; BOLDRIN, A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Physico-chemical characterisation of material fractions in residual and source-segregated household waste in Denmark. **Waste Management**, v. 54, p. 13-26, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.009

GY, P. M.; MARIN, L. Unbiased sampling from a falling stream of particulate material. **International Journal of Mineral Processing**, v. 5, n. 4, p. 297-315, 1978. https://doi.org/10.1016/0301-7516(78)90025-X

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a waste 2.0**: a global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

LA COUR JANSEN, J.; SPLIID, H.; HANSEN, T. L.; SVÄRD, Å.; CHRISTENSEN, T. H. Assessment of sampling and chemical analysis of source-separated organic household waste. **Waste Management**, v. 24, n. 6, p. 541-549, 2004. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.02.013

LEVERENZ, D.; SOUZA, R. G. de; CHRISTENSEN, T. H. Water losses during household waste characterization: an overlooked issue? **Waste Management**, v. 216, p. 115442, 2026. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115442

MAGRINHO, A.; SEMIÃO, V. On the effect of MSW moisture content on meeting target recycling rates. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 310-317, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.021

NOLASCO, E.; DURÃES, P. H. V.; GONÇALVES, J. P.; OLIVEIRA, M. C.; ABREU, L. M.; ALMEIDA, A. N. Characterization of solid wastes as a tool to implement waste management strategies in a university campus. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 22, n. 2, p. 217-236, 2021. https://doi.org/10.1108/IJSHE-12-2019-0358

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

PEREIRA, E. A. A.; SOARES, J. K. N. C.; PEREIRA, E. V.; GUEDES, C. S.; CANDEIA, A. L.; SILVA, J. M. D.; COSTA, J. G. N.; FERREIRA, E. S. A. Caracterização de resíduos sólidos em escola pública de Patos, PB. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 9, e14347, 2025. https://doi.org/10.54033/cadpedv22n9-347

PITARD, F. F. **Theory of sampling and sampling practice**. 3. ed. Boca Ratón: Taylor & Francis, 2019.

SEMBIRING, E.; RAMADAN, A. H.; FARID, M. Implications of shorter sampling durations on the analysis of municipal solid waste generation and composition. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 28, p. 133-140, 2026. https://doi.org/10.1007/s10163-025-02401-6

SFEIR, H.; REINHART, D. R.; MCCAULEY-BELL, P. R. An evaluation of municipal solid waste composition bias sources. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 49, n. 9, p. 1096-1102, 1999. https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463903

SILVA, E. M.; GOMES, N. A.; ALMEIDA, M. V. A.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de uma escola em Campina Grande-PB. In: CIRNE, L. E. M. R. *et al.* (org.). **Gestão integrada de resíduos: universidade & comunidade**. [S. l.: s. n.], 2018. v. 1, cap. 20.

SINGHAL, A.; GUPTA, A. K.; DUBEY, B.; GHANGREKAR, M. M. Seasonal characterization of municipal solid waste for selecting feasible waste treatment technology for Guwahati city, India. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 72, n. 2, p. 147-160, 2021. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1980450

TCHOBANOGLOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

5 CAPÍTULO I – O PREPARO DA AMOSTRA COMO FONTE DE VIÉS NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

5.1 RESUMO

A caracterização gravimétrica orienta o dimensionamento de sistemas de triagem, coleta seletiva e logística reversa de resíduos sólidos urbanos (RSU). As normas mais empregadas para essa finalidade, a ABNT NBR 10.007/2004 e a ASTM D5231, prescrevem homogeneização mecânica da amostra antes do quarteamento, etapa tratada na literatura normativa como procedimento de representatividade, sem investigação sistemática de seus efeitos sobre as propriedades dos materiais. Esta revisão integrativa teve por objetivo estabelecer o estado da arte sobre os efeitos da homogeneização e do quarteamento normatizados sobre a fidedignidade da caracterização gravimétrica, com atenção particular à distribuição de umidade entre frações. Para tanto, reuniu estudos sobre amostragem, homogeneização, quarteamento e distribuição de umidade em RSU, localizados em bases formais (Scopus, Portal de Periódicos CAPES, Web of Science e SciELO), organizados em quatro eixos temáticos: base conceitual e normativa; métodos de caracterização e amostragem; teoria da amostragem em materiais heterogêneos; e umidade e redistribuição de água entre frações. A síntese indica que a teoria da amostragem de Gy explica o erro de partição pela probabilidade de captura de partículas, sem tratar da migração de umidade, e que a transferência de água entre frações secas e úmidas está documentada na literatura em relação ao sistema de coleta ao longo de dias, não à etapa de homogeneização laboratorial isolada da redução de massa amostral. Não foram identificados, na literatura consultada dentro da estratégia adotada, estudos que isolem esse efeito. Essa lacuna fundamenta os capítulos empíricos subsequentes da tese, que investigam o fenômeno em um estudo de caso institucional.

Palavras-chave: teoria da amostragem; homogeneização mecânica; quarteamento; transferência de umidade.

Sample preparation as a source of bias in the gravimetric characterization of municipal solid waste: an integrative review

5.2 ABSTRACT

Gravimetric characterization underpins the sizing of sorting, selective collection, and reverse logistics systems for municipal solid waste (MSW). The standards most commonly applied for this purpose, ABNT NBR 10.007/2004 and ASTM D5231, prescribe mechanical homogenization of the sample before quartering, a step treated in the normative literature as a representativeness procedure, without systematic investigation of its effects on material properties. This integrative review gathered studies on sampling, homogenization, quartering, and moisture distribution in MSW, located in formal databases (Scopus, CAPES Periodicals Portal, Web of Science, and SciELO), organized into four thematic axes: conceptual and normative background; characterization and sampling methods; sampling theory in heterogeneous materials; and moisture and water redistribution among fractions. The synthesis indicates that Gy's theory of sampling explains partition error through particle-capture probability, without addressing moisture migration, and that water transfer between dry and wet fractions is documented in the literature in relation to the collection stream over days, not to the laboratory homogenization step isolated from sample-mass reduction. No study isolating this effect was identified in the literature consulted within the adopted strategy. This gap underlies the subsequent empirical chapters of the thesis, which investigate the phenomenon in an institutional case study.

Keywords: theory of sampling; mechanical homogenization; quartering; moisture transfer.

5.3 INTRODUÇÃO

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é o principal parâmetro técnico para o dimensionamento de sistemas de triagem, coleta seletiva e logística reversa, e para a avaliação do potencial de recuperação de materiais (Kaza *et al*., 2018; Alfaia *et al*., 2017). A obtenção desse parâmetro depende de um procedimento de amostragem sobre um material heterogêneo por natureza, no qual frações de densidade, granulometria e teor de umidade distintos se distribuem de forma desigual ao longo da massa coletada.

As duas normas de referência para essa amostragem, a brasileira ABNT NBR 10.007 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) e a norte-americana ASTM D5231 (ASTM International, 2016), prescrevem homogeneização mecânica da massa coletada, por revolvimento ou tombamento, seguida de quarteamento sucessivo até a obtenção de uma amostra de triagem. A literatura normativa e a maior parte dos estudos aplicados descrevem essa homogeneização como um meio de garantir representatividade estatística, sem examinar se o procedimento altera as propriedades físicas dos materiais que compõem a amostra. O quarteamento manual, nessas normas assumido como etapa neutra de redução amostral, não é recomendado no próprio referencial fundacional da Teoria da Amostragem, por introduzir viés associado à captura desigual de partículas de granulometrias distintas (Gy; Marin, 1978; Pitard, 2019).

A teoria da amostragem de Pierre Gy oferece o arcabouço conceitual mais estabelecido para tratar desse problema (Pitard, 1993). Sua aplicação a estudos ambientais indicou que operações de partição, como o quarteamento manual, introduzem erro amostral mensurável, associado à probabilidade desigual de captura de partículas de tamanhos distintos (Gerlach *et al*., 2002). Esse referencial fundamenta boa parte da literatura metodológica sobre amostragem de resíduos, mas concentra-se no erro de captura de partículas, e não em possíveis alterações no teor de umidade das frações durante o preparo da amostra.

Paralelamente, a literatura documenta que resíduos úmidos, sobretudo a fração orgânica, cedem água a materiais mais secos quando permanecem em contato físico prolongado. Esse fenômeno foi descrito em fluxos de coleta mista, ao longo de dias de armazenamento e transporte (Götze *et al*., 2016; Magrinho; Semião, 2008; Singhal *et al*., 2021), mas não em relação à etapa de homogeneização executada no momento da caracterização em laboratório ou em campo, isolada da redução do volume amostral.

Diante desse quadro, esta revisão integrativa partiu da seguinte pergunta norteadora: qual é o estado da arte sobre os efeitos da homogeneização e do quarteamento em amostras de

resíduos sólidos urbanos sobre a fidedignidade da caracterização gravimétrica, especialmente quanto à distribuição de umidade entre frações? O objetivo não foi apenas reunir referências sobre o tema, mas estabelecer, com rastreabilidade metodológica, o que a literatura já demonstrou, onde os resultados convergem ou divergem, e em que medida essas lacunas justificam a investigação empírica conduzida nos capítulos seguintes desta tese.

Essa pergunta foi formalizada segundo a estrutura População, Exposição, Comparador, Desfecho (PECO), adaptada de revisões de exposição ambiental (Morgan *et al*., 2018): População, amostras de resíduos sólidos urbanos submetidas à caracterização gravimétrica; Exposição, a homogeneização mecânica e o quarteamento normatizados pela ABNT NBR 10.007 e pela ASTM D5231; Comparador, protocolos de amostragem sem homogeneização prévia ou com desenho de redução amostral distinto; e Desfecho, a fidedignidade da composição gravimétrica resultante e a distribuição de umidade entre frações. Essa estrutura orientou tanto a construção dos descritores de busca, quanto os critérios de elegibilidade.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho seguiu o desenho de revisão integrativa (Whittemore; Knafl, 2005; Souza *et al.*, 2010), método que admite estudos de diferentes delineamentos, desde que reunidos sob coerência temática e analítica explícita. O relato do processo de busca e seleção seguiu, apenas como instrumento de transparência e rastreabilidade, as recomendações do PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021); a adoção dessas recomendações de relato não transforma este trabalho em revisão sistemática.

5.4.1 Bases de busca e estratégia de descritores

A busca foi conduzida no Scopus e no Portal de Periódicos CAPES. A estratégia de busca foi construída a partir de operadores booleanos, executados separadamente por bloco temático para evitar concatenação excessiva de termos em uma única expressão: ("municipal solid waste" OR "resíduos sólidos urbanos") AND (sampling OR amostragem OR quartering OR quarteamento OR homogenization OR homogeneização), para o núcleo metodológico; e ("municipal solid waste" OR "resíduos sólidos urbanos") AND (moisture OR umidade OR leachate OR lixiviado), para o eixo de umidade. A base SciELO foi consultada com a mesma lógica booleana, em consulta única combinando os dois blocos de descritores ("municipal solid waste" OR "resíduos sólidos urbanos") AND (sampling OR amostragem OR quarteamento OR homogeneização OR moisture OR umidade OR leachate OR lixiviado), retornando 101

registros, avaliados por título em consulta separada do funil formal Scopus/CAPES. A busca formal no Web of Science (Core Collection) foi executada em rodada posterior ao fechamento inicial do funil Scopus/CAPES, mediante acesso institucional via CAFe (UFCG), obtido pelo Portal de Periódicos CAPES. As mesmas duas cadeias booleanas retornaram 4.532 (núcleo metodológico) e 5.130 registros (eixo de umidade); dado o volume, ambas as buscas foram refinadas pelos filtros nativos da base (categorias Environmental Sciences, Engineering Environmental e Green Sustainable Science Technology; tipo de documento Article), resultando em 2.636 e 2.885 registros, respectivamente, 4.746 registros únicos após remoção de duplicatas pelo identificador único da base.

Os descritores foram organizados em quatro blocos temáticos: (i) objeto principal, incluindo os termos residuos solidos urbanos e municipal solid waste; (ii) método de amostragem, incluindo amostragem, sampling, quarteamento, quartering, homogeneização, homogenization, ABNT NBR 10.007 e ASTM D5231; (iii) variável crítica, incluindo umidade, moisture e lixiviado; e (iv) problema analítico, incluindo viés amostral, representatividade e heterogeneidade. Os blocos foram combinados em buscas curtas e sucessivas, evitando concatenar todos os termos em uma única expressão. O Quadro 1 detalha, por base de dados, a estratégia efetivamente aplicada e os registros brutos recuperados em cada uma, incluindo as variações de operacionalização entre bases.

Quadro 1 — Estratégia de busca e registros brutos por base de dados

Base de dados	Estratégia de busca (bloco temático e cadeia booleana)	Registros brutos
Scopus	Bloco 1, núcleo metodológico: ("municipal solid waste" OR "resíduos sólidos urbanos") AND (sampling OR amostragem OR quartering OR quarteamento OR homogenization OR homogeneização). Bloco 2, eixo de umidade: ("municipal solid waste" OR "resíduos sólidos urbanos") AND (moisture OR umidade OR leachate OR lixiviado).	1.629[a]
Portal de Periódicos CAPES	Cinco rodadas complementares (maio–jun. 2026) sobre os mesmos dois blocos: (i) núcleo metodológico; (ii) núcleo metodológico associado a normas técnicas; (iii) método associado à umidade; (iv) composição associada a viés amostral; (v) descritores centrais em português.	1.284; 17; 508; 12; 56 (Σ 1.877)
Web of Science (Core Collection)	As mesmas duas cadeias booleanas dos Blocos 1 e 2, refinadas pelos filtros nativos da base (categorias Environmental Sciences; Engineering Environmental; Green Sustainable Science Technology) e tipo de documento (Article).	4.532 → 2.636; 5.130 → 2.885 (4.746 únicos)[b]
SciELO	Consulta única combinando os dois blocos: ("municipal solid waste" OR "resíduos sólidos urbanos") AND (sampling OR amostragem OR quarteamento OR homogeneização OR moisture OR umidade OR leachate OR lixiviado).	101

Fonte: Autoria própria (2026). Scopus e CAPES combinados totalizaram 3.506 registros brutos, reduzidos a 2.900 únicos após remoção de duplicatas por DOI e por similaridade de título, conjunto submetido à triagem por título e resumo.

Nota: [a] Total combinado dos dois blocos após remoção de duplicatas internas; subtotais por bloco não registrados separadamente. [b] Registros brutos por cadeia → após refino por categoria e tipo de documento; total de únicos após deduplicação pelo identificador da base.

5.4.2 Critérios de elegibilidade

Foram incluídos estudos empíricos sobre caracterização gravimétrica de RSU; estudos metodológicos sobre amostragem, homogeneização ou quarteamento de resíduos; estudos que aplicassem, comparassem ou questionassem protocolos normatizados, nacionais ou internacionais; estudos teóricos sobre amostragem de materiais particulados heterogêneos, quando conectados à discussão de resíduos; e estudos sobre a influência da umidade na representatividade da amostra. A presença isolada dos termos waste ou sampling no título não foi suficiente para inclusão automática; o conteúdo precisou contribuir diretamente para a pergunta norteadora.

Foram excluídos estudos sobre resíduos industriais, perigosos ou especiais sem relação metodológica direta com RSU; estudos centrados exclusivamente em gestão, política pública ou logística, sem conexão com amostragem ou caracterização; registros duplicados; e textos sem dados ou método minimamente verificáveis.

5.4.3 Processo de seleção e extração

A busca no Scopus retornou 1.629 registros. No Portal de Periódicos CAPES, a busca foi conduzida em cinco rodadas complementares por eixo temático, executadas em maio e junho de 2026: núcleo metodológico, 1.284 registros; núcleo metodológico associado a normas técnicas, 17 registros; método associado à variável umidade, 508 registros; composição associada a viés amostral, 12 registros; e versão em português dos descritores centrais, 56 registros. As cinco rodadas totalizaram 1.877 registros brutos no CAPES, e a busca combinada Scopus e CAPES, 3.506 registros brutos. Após remoção de duplicatas por DOI e por similaridade de título, restou um conjunto de 2.900 registros únicos, submetidos a triagem por título e resumo.

A consulta à base SciELO retornou 101 registros, predominantemente sobre tratamento de lixiviado e geotecnia de aterros, temas fora do escopo desta revisão. Da avaliação por título de 100 dos 101 registros, nenhum estudo elegível adicional, ainda não presente no corpus pela via das bases formais, foi identificado; os poucos estudos pertinentes recuperados pela busca no SciELO, como Cestonaro e Barros (2019), Rezende *et al*. (2013), Durán Moreno *et al*. (2013) e Amber *et al*. (2012), já integravam o corpus por outra via. Esse resultado é reportado como verificação de cobertura, não como funil adicional de inclusão.

O funil de seleção partiu dos registros das bases formais. Da combinação de Scopus e CAPES, os 2.900 registros únicos foram triados por título e resumo, dos quais 309 avançaram para avaliação de elegibilidade segundo os critérios dos Eixos 2 a 4. Desses, 157 foram considerados elegíveis e 152 excluídos, sendo 115 classificados como tangenciais ao escopo e 37 como fora do escopo temático.

Os 157 registros elegíveis foram submetidos a verificação bibliográfica na base Crossref, com validação manual de cada correspondência para eliminar falsos positivos de similaridade de título e publicações redundantes do mesmo estudo. Dessa verificação resultaram os registros com metadados confirmados que compõem o corpus; 32 registros elegíveis não tiveram correspondência bibliográfica confiável recuperada e permanecem como pendência, não sustentando afirmações de achado nesta síntese.

O corpus foi complementado pela busca formal no Web of Science, cruzada com os registros já verificados, e por uma atualização direcionada a partir de revisão de escopo internacional publicada em 2026 (Spies *et al*., 2026) e de sua lista de referências. Após a verificação de rastreabilidade, dois registros sem indexação em base formal foram retirados do corpus analisado, que passou a reunir 123 estudos com metadados verificados nos Eixos 2 a 4. Somados a 23 referências de sustentação teórica e metodológica, esses estudos totalizam 146 obras citadas neste capítulo.

A verificação bibliográfica dos estudos incorporados aos Eixos 2, 3 e 4 desta síntese foi conduzida em duas etapas. Primeiro, os registros foram triados e classificados por eixo temático segundo os critérios de elegibilidade. Em seguida, os metadados bibliográficos completos, autoria, ano, periódico, volume, página e DOI, foram verificados de forma automatizada junto à base Crossref, por busca direta quando o DOI já era conhecido e por busca de título nos demais casos, com validação manual de cada correspondência recuperada por similaridade de título para eliminar falsos positivos e registros duplicados publicados em mais de um veículo. Esse processo, incluindo uma segunda rodada de verificação manual sobre os registros sem correspondência automática, uma terceira atualização direcionada a partir de revisão de escopo internacional publicada em 2026, e uma quarta atualização a partir da busca formal no Web of Science, resultou em 123 estudos com metadados bibliográficos verificados nos Eixos 2 a 4, após a retirada de dois registros sem indexação em base formal, aos quais se somam as 23 referências de sustentação teórica e metodológica já empregadas nos capítulos empíricos desta tese, totalizando 146 obras citadas nesta revisão.

A extração de dados, quando o texto completo ou o resumo estava disponível, registrou o autor e ano, país ou contexto do estudo, objetivo, método, principal achado, e relação explícita

com homogeneização, quarteamento ou umidade. Essa extração foi possível de forma completa para o subconjunto de estudos com resumo verificado; para o subconjunto identificado apenas por título e contexto de publicação, a síntese que segue registra a existência e o enquadramento temático do estudo dentro do eixo correspondente, sem atribuir a ele achados específicos não verificados diretamente. A organização dos registros, a padronização dos metadados e a formatação das referências segundo a ABNT NBR 6023 foram apoiadas pelo gerenciador Zotero (Corporation for Digital Scholarship, 2026), no qual cada referência foi capturada preferencialmente a partir do identificador DOI, de modo a preservar a integridade dos metadados obtidos junto às bases de origem.

A Figura 1 sintetiza o funil de identificação, triagem, elegibilidade e verificação bibliográfica percorrido, cujos números são apresentados e discutidos na seção seguinte.

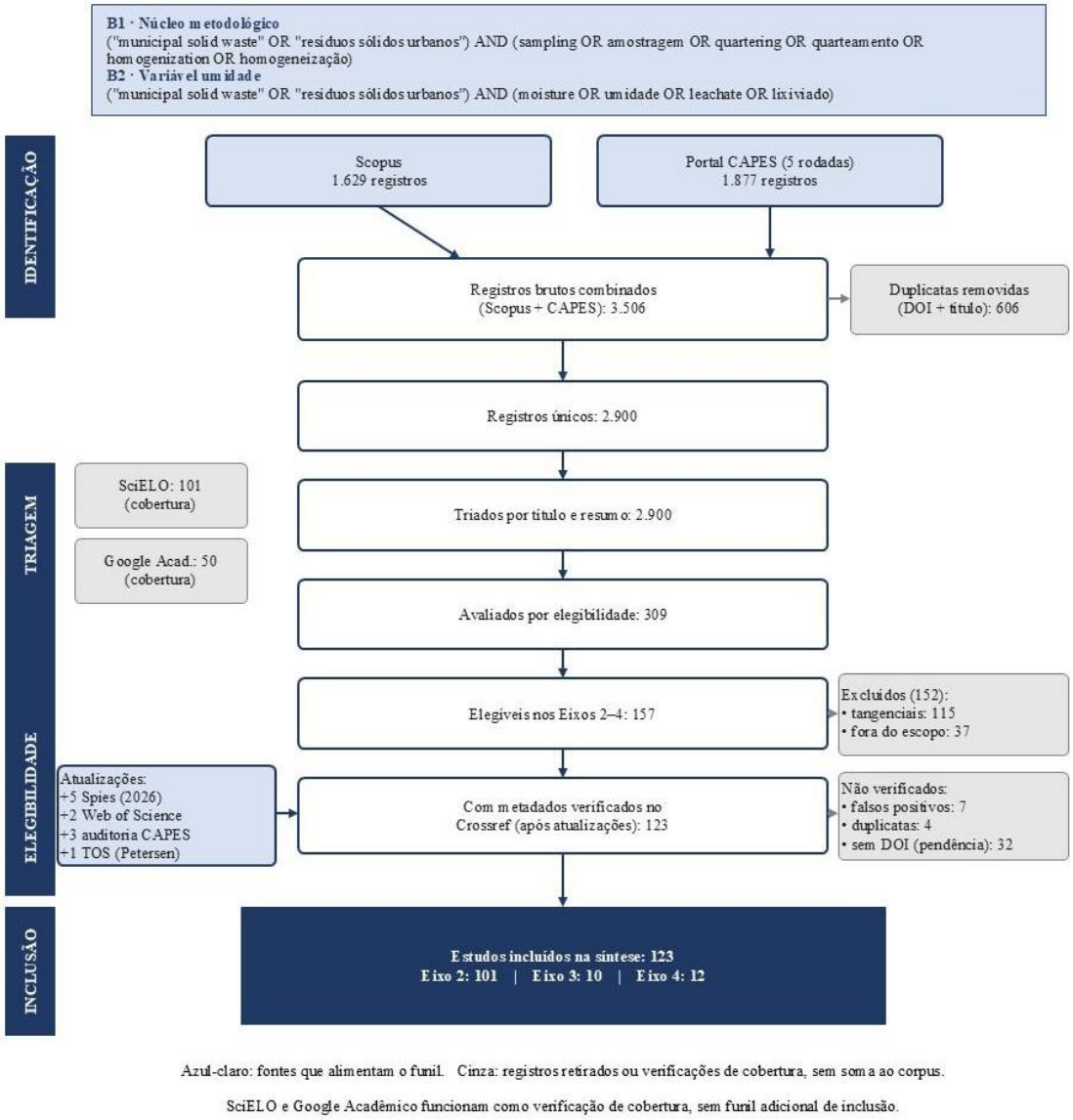


Figura 1 - Fluxograma de identificação, triagem, elegibilidade e verificação bibliográfica dos estudos considerados na revisão.

Fonte: Autoria própria (2026).

5.4.4 Avaliação de qualidade e limitações da revisão

Seguindo o quarto estágio do método de Whittemore e Knafl (2005), a avaliação de qualidade dos estudos incluídos não empregou instrumento formal de risco de viés, prática pouco padronizada para o conjunto heterogêneo de delineamentos admitido por uma revisão integrativa. Em seu lugar, cada registro foi classificado por nível de evidência disponível para extração: resumo ou texto completo e verificado, ou apenas título e contexto de publicação recuperados por metadados bibliográficos. Essa distinção condiciona o que pode ser afirmado sobre cada estudo: achados específicos só são atribuídos a registros do primeiro grupo; registros do segundo grupo sustentam apenas a existência e o enquadramento temático do estudo dentro

do eixo correspondente. A ausência de instrumento formal de avaliação de qualidade, como a Mixed Methods Appraisal Tool, é reconhecida como limitação.

Complementarmente, aplicou-se uma rubrica leve de três critérios, verificáveis a partir dos metadados já confirmados, sem substituir instrumentos formais de avaliação de qualidade: veículo de publicação, indexação bibliográfica e atualidade. Quanto ao veículo, 122 dos 123 registros dos Eixos 2 a 4 foram publicados em periódico identificado; o registro restante é uma dissertação de mestrado (Kim, 2019). Quanto à indexação, a totalidade dos 123 registros tem DOI confirmado junto à base Crossref, critério mínimo de rastreabilidade bibliográfica adotado nesta revisão. Quanto à atualidade, 101 dos 123 registros, aproximadamente quatro quintos do corpus, foram publicados entre 2010 e 2026, e apenas 5 são anteriores a 1990, o que situa a síntese predominantemente sobre literatura corrente, com preservação deliberada dos marcos históricos do campo. Essa rubrica não avalia desenho metodológico, tamanho amostral ou tratamento estatístico estudo a estudo, e não deve ser lida como equivalente a um instrumento validado de avaliação de qualidade.

Esta revisão apresenta outras limitações que devem ser declaradas explicitamente. A triagem e a classificação temática foram conduzidas por um único revisor, sem checagem independente por segundo avaliador nem cálculo de concordância entre revisores, prática desejável mesmo em revisões integrativas e não realizada aqui por restrição de recursos. O viés potencialmente associado a essa condição foi mitigado por dois procedimentos: a adoção de critérios de elegibilidade explícitos e aplicados de modo uniforme, e a verificação bibliográfica objetiva de cada estudo incluído junto à base Crossref, que ancora a decisão de inclusão em metadados confirmáveis, e não apenas no julgamento do revisor. Ainda assim, a ausência de dupla triagem é reconhecida como limitação, e a replicação da seleção por avaliação independente é recomendável em desdobramentos deste trabalho. Essa mesma limitação é declarada de forma equivalente por Spies *et al*. (2026), o que situa a restrição como prática corrente do campo, e não como fragilidade específica deste trabalho.

A busca formal no Web of Science foi executada em rodada posterior mediante acesso via CAFe/UFCG. Dado o volume retornado (4.746 registros únicos após refino por categoria e tipo de documento, ante 2.900 registros únicos de Scopus e CAPES combinados), a triagem título a título nos mesmos moldes aplicados a Scopus e CAPES não foi viável dentro do escopo desta revisão; em seu lugar, aplicou-se um filtro de elegibilidade por palavras-chave compostas, que reduziu o conjunto a 304 candidatos, efetivamente triados por título e resumo. Esse filtro automatizado é uma etapa adicional e distinta da triagem manual completa: por depender de termos específicos em título e resumo, pode não capturar registros elegíveis que descrevam o

mesmo fenômeno com vocabulário diferente do previsto nos critérios, risco que a triagem manual de Scopus e CAPES, por cobrir a totalidade dos registros, não compartilha na mesma extensão.

O Google Acadêmico não foi adotado como base de busca principal em razão de limitações amplamente documentadas quanto à reprodutibilidade e à transparência de indexação, decorrentes da ausência de vocabulário controlado e da variação de resultados conforme usuário, localização e data de busca (Gusenbauer; Haddaway, 2020), sendo empregado exclusivamente como verificação suplementar de cobertura. As mesmas cadeias booleanas foram aplicadas ao Google Acadêmico, com triagem por título dos 50 resultados mais relevantes (ordenados por relevância); nenhum estudo elegível adicional, além dos já identificados via Web of Science, foi encontrado por essa via. Esse recorte é inferior ao intervalo de 200 a 300 resultados recomendado por Haddaway *et al*. (2015) para buscas de literatura cinza; como o propósito aqui foi verificar cobertura de literatura já indexada e revisada por pares, e não descobrir literatura cinza, adotou-se um corte reduzido, o que constitui limitação adicional desta checagem pontual. Precedente próximo, ainda que com corte maior, aparece em Spies *et al*. (2026), que limitaram a triagem do Google Acadêmico aos 300 primeiros resultados por relevância a partir do ponto em que nenhuma literatura adicional relevante havia aparecido em várias publicações consecutivas, mesma lógica de saturação aqui adotada em escala reduzida. Assim como a consulta à base SciELO, essa checagem funciona como verificação pontual de cobertura adicional, por avaliação de título em amostra limitada dos resultados.

A ferramenta Crossref foi empregada exclusivamente para verificação e completude de metadados bibliográficos de registros já identificados por outras vias, nunca como mecanismo de descoberta ou busca sistemática de novos estudos. Trinta e dois registros classificados como elegíveis não tiveram metadados bibliográficos confirmados em base indexadora; a verificação manual de uma amostra desse subconjunto indica que a maior parte corresponde a dissertações, trabalhos de conclusão de curso e relatórios técnicos institucionais sem DOI atribuído, e não a lacunas de busca, mas essa amostragem não cobriu a totalidade dos 32 registros, que por isso não sustentam afirmações de achado nesta síntese e apenas indicam a extensão aproximada do campo.

Como verificação complementar da cobertura da triagem, entendida aqui como a proporção de registros brutos efetivamente examinados sob os critérios de elegibilidade, e restrita à base CAPES, foi conduzida auditoria de triagem exaustiva, título a título, dos 1.877 registros brutos das cinco rodadas de busca ainda não cobertos pela triagem relatada acima, sob

os mesmos critérios de elegibilidade. Essa auditoria identificou 118 registros potencialmente elegíveis; o cruzamento com o corpus já verificado mostrou que 35 já integravam esta síntese por outra via, seja pela busca formal no Web of Science, seja pela atualização direcionada a partir de Spies *et al*. (2026), o que corrobora a cobertura já obtida pelo desenho amostral adotado. Os 82 registros remanescentes constituem candidatos potencialmente elegíveis sem verificação bibliográfica completa; não foram incorporados a esta síntese e ficam declarados como pendência explícita para atualização futura desta revisão.

Instrumento de inteligência artificial (Claude, Anthropic) foi utilizado como apoio à triagem preliminar dos registros bibliográficos recuperados nas buscas formais, com base em critérios de elegibilidade previamente definidos pelo autor, e à revisão textual deste capítulo. Todas as classificações sugeridas pela ferramenta foram conferidas e validadas pelo autor, que assume integral responsabilidade pelo conteúdo final, nos termos da Declaração de Uso de Inteligência Artificial apresentada ao final desta tese.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os números do funil de seleção sintetizado na Figura 1 sustentam a discussão que segue. O Quadro 2 apresenta, por eixo temático, o número de estudos verificados, o período coberto e os focos metodológicos predominantes.

Quadro 2 — Síntese quantitativa dos estudos considerados por eixo temático

Eixo temático	Nº de estudos com metadados verificados	Período	Principais focos metodológicos
Eixo 1 – Base conceitual e normativa	referências estruturais (normas e panoramas)	1990–2018	Normatização vigente (ABNT, ASTM); panorama nacional e global de RSU
Eixo 2 – Métodos de caracterização e amostragem de RSU	101	1979–2026	Desenho de campanha, abrangência geográfica, contextos institucionais, fluxos correlatos, tratamento estatístico
Eixo 3 – Teoria da amostragem e erro em materiais heterogêneos	10	2010–2024	Aplicação da teoria de Gy a RSU e a materiais correlatos (REEE, RDF, SRF)
Eixo 4 – Umidade, segregação e redistribuição de água	12	1986–2026	Transferência hídrica no sistema de coleta; monitoramento de umidade pós-disposição em aterro
Eixo 5 – Síntese e lacuna identificada	-	-	Leitura conjunta dos Eixos 1–4; funda os capítulos empíricos

Nota: A partir da triagem das bases formais (309 registros), da verificação bibliográfica Crossref, da atualização direcionada de 2026 e da busca formal no Web of Science, dos quais 123 compõem o corpus analisado após a verificação de rastreabilidade descrita no método (Eixos 2 a 4). Fonte: Autoria própria (2026).

A distribuição dos estudos entre os eixos evidencia onde a literatura se concentra e onde é silente. O Eixo 2, de métodos de caracterização e amostragem, reuniu o maior volume, com 101 estudos verificados, publicados entre 1979 e 2026, ao passo que o Eixo 3, sobre a teoria da amostragem aplicada a materiais heterogêneos, reuniu 10 estudos (2010–2024) e o Eixo 4, sobre umidade e redistribuição de água, 12 estudos (1986–2026). O Eixo 5 não corresponde a um conjunto próprio de estudos, mas à leitura conjunta dos anteriores, e é justamente nele que se localiza a lacuna: nenhum dos estudos reunidos isola o efeito da homogeneização normativa sobre a redistribuição de umidade entre frações.

O Quadro 3 relaciona, de forma individualizada e em ordem cronológica dentro de cada eixo, os 123 estudos com metadados bibliográficos verificados que compõem os Eixos 2 a 4 desta síntese.

Quadro 3 — Estudos incluídos na síntese, por eixo temático e ordem cronológica.

Nº	Autoria, ano	Periódico / fonte
Eixo 2 — Métodos de caracterização e amostragem de RSU (101 estudos)		
1	Hiraoka *et al*., 1979	Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers
2	Terashima *et al*., 1984	Conservation & Recycling
3	Beckers *et al*., 1986	Biomass
4	Holcombe *et al*., 1986	Hazardous and Industrial Solid Waste Testing and Disposal: Sixth Volume
5	Leroy *et al*., 1992	Waste Management & Research
6	Klee, 1993	Journal of Environmental Engineering
7	Scott, 1995	Biomass and Bioenergy
8	Martin *et al*., 1995	Journal of the Air & Waste Management Association
9	Sfeir *et al*., 1999	Journal of the Air & Waste Management Association
10	Stelling; Sjerps, 1999	Environmetrics
11	Fällman, 2000	Waste Management Series
12	Felder *et al*., 2001	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy
13	Møller, 2004	Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems
14	La Cour Jansen *et al*., 2004	Waste Management
15	Bolaane; Ali, 2004	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy
16	Gidarakos *et al*., 2006	Waste Management
17	Slack *et al*., 2007	Environmental Science & Technology

Quadro 3 — Estudos incluídos na síntese, por eixo temático e ordem cronológica.

Nº	Autoria, ano	Periódico / fonte
18	Dahlén; Lagerkvist, 2008	Waste Management
19	Sormunen *et al*., 2008	Waste Management
20	Dangi *et al*., 2008	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy
21	Paul; Daniel, 2008	Asian Journal of Water, Environment and Pollution
22	Almeida, 2012	IGNIS: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação
23	Martinho *et al*., 2012	Waste Management
24	Amber *et al*., 2012	Journal of Energy in Southern Africa
25	Fernando; Lima, 2012	Caminhos de Geografia
26	Kaartinen *et al*., 2013	Journal of Cleaner Production
27	Durán Moreno *et al*., 2013	Revista Internacional de Contaminación Ambiental
28	Rezende *et al*., 2013	Engenharia Sanitaria e Ambiental
29	Heravi *et al*., 2013	Pakistan Journal of Biological Sciences
30	Picanço *et al*., 2014	Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais
31	Brandstätter *et al*., 2014	Waste Management
32	Denafas *et al*., 2014	Resources, Conservation and Recycling
33	Edjabou *et al*., 2015	Waste Management
34	Campos; Borga, 2015	IGNIS: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação
35	Galdino; Martins, 2015	Tecno-Lógica
36	Aldrian *et al*., 2015	International Journal of Environmental Analytical Chemistry
37	Sahimaa *et al*., 2015	Waste Management
38	Liikanen *et al*., 2016	Waste Management
39	Araiza Aguilar *et al*., 2017	Revista Internacional de Contaminación Ambiental
40	Hoang *et al*., 2017	Journal of JSCE
41	Adeniran *et al*., 2017	Waste Management
42	Oliveira *et al*., 2017	Revista Ambientale
43	Alkmin; Junior, 2017	Caminhos de Geografia
44	Ranieri *et al*., 2017	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy
45	Saidan *et al*., 2017	Waste Management
46	Araújo *et al*., 2018	Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais
47	Oelofse *et al*., 2018	South African Journal of Science
48	García López *et al*., 2018	Detritus
49	Morello *et al*., 2018	Waste Management
50	Chen, 2018	Waste Management

Quadro 3 — Estudos incluídos na síntese, por eixo temático e ordem cronológica.

Nº	Autoria, ano	Periódico / fonte
51	Boer *et al*., 2018	Environmental Engineering and Management Journal
52	Faitli *et al*., 2019	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy
53	Tagliaferro; Viana, 2019	Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes
54	Trentin *et al*., 2019	Revista de Ciências Ambientais
55	Santos *et al*., 2019	Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ
56	Brandão *et al*., 2019	Semioses
57	Cestonaro *et al*., 2019	International Journal of Environment and Waste Management
58	Kim, 2019	Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo
59	Menezes *et al*., 2019	Engenharia Sanitaria e Ambiental
60	Ibikunle *et al*., 2020	Fuel
61	Ugwu *et al*., 2020	Heliyon
62	Morais *et al*., 2020	Revista Tecnologia e Sociedade
63	Touze *et al*., 2020	Waste Management
64	Couto *et al*., 2020	Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais
65	Fiel *et al*., 2021	Research, Society and Development
66	Adelodun *et al*., 2021	Waste Management
67	Rodrigues Vieira; Alves Fiore, 2021	Revista DAE
68	Guimarães; Batista, 2021	Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental
69	Queiroz Júnior *et al*., 2021	Revista Brasileira de Geografia Física
70	Šramková *et al*., 2021	Optimization and Engineering
71	Hartwell *et al*., 2021	Journal of the Air & Waste Management Association
72	Leite *et al*., 2021	Advanced Technology for the Conversion of Waste Into Fuels and Chemicals
73	Oliveira; Lopes, 2021	Brazilian Journal of Development
74	Sbrolini Tiburcio *et al*., 2021	Fuel
75	Sambiasi *et al*., 2022	Revista de Ciencia y Tecnología
76	Balthi Mshelia *et al*., 2022	Hittite Journal of Science and Engineering
77	Santana *et al*., 2022	Research, Society and Development
78	Viczek *et al*., 2022	International Journal of Environmental Science and Technology
79	Rodrigues Vieira; Alves Fiore, 2022	Revista DAE
80	Silva *et al*., 2022	Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade
81	Wasserman *et al*., 2022	Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste
82	Correa *et al*., 2022	Journal of Material Cycles and Waste Management
83	Mondelli *et al*., 2022	Environmental Science and Pollution Research

Quadro 3 — Estudos incluídos na síntese, por eixo temático e ordem cronológica.

Nº	Autoria, ano	Periódico / fonte
84	Rodrigues *et al*., 2023	REVISTA FOCO
85	Cruz Rodrigues *et al*., 2023	Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais
86	Carvajal-flórez *et al*., 2023	Tecnología y ciencias del agua
87	Alolayan *et al*., 2023	International Journal of Environment and Waste Management
88	Viegas *et al*., 2023	Anais - 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade
89	Saengchut *et al*., 2024	Journal of Ecological Engineering
90	Spies *et al*., 2024	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy
91	Onungwe *et al*., 2024	Frontiers in Sustainability
92	Emara *et al*., 2024	Cleaner Waste Systems
93	Ojuri *et al*., 2024	Waste Management Bulletin
94	Mota; Silva, 2024	Revista de Gestão Social e Ambiental
95	Araújo; Aquino, 2024	Revista Políticas Públicas & Cidades
96	Doimo Da Silva *et al*., 2025	Chemical Engineering and Processing - Process Intensification
97	Haritwal *et al*., 2025	Journal of Hazardous Materials
98	Oliveira, A.D. *et al*., 2025	Journal of Material Cycles and Waste Management
99	Robles *et al*., 2026	Revista Técnica \"energía\"
100	Spies *et al*., 2026	Resources, Conservation and Recycling
101	Sembiring *et al*., 2026	Journal of Material Cycles and Waste Management
Eixo 3 — Teoria da amostragem e erro em materiais heterogêneos (10 estudos)		
1	Petersen; Minkkinen; Esbensen, 2005	Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems
2	Pazó *et al*., 2010	International Journal of Molecular Sciences
3	Wavrer, 2018	TOS Forum
4	Cestonaro; Barros, 2019	Engenharia Sanitaria e Ambiental
5	Laubertova *et al*., 2019	Metallurgical and Materials Engineering
6	Khodier *et al*., 2020	International Journal of Environmental Science and Technology
7	Gerassimidou *et al*., 2020a	Journal of Hazardous Materials
8	Thawani *et al*., 2022	Environmental Technology
9	Haruko *et al*., 2024	Geomatics and Environmental Engineering
10	Barthet *et al*., 2024	Waste Management
Eixo 4 — Umidade, segregação e redistribuição de água (12 estudos)		
1	Domalski *et al*., 1986	Chemosphere
2	Yuen *et al*., 2000	Journal of Environmental Engineering

Quadro 3 — Estudos incluídos na síntese, por eixo temático e ordem cronológica.

Nº	Autoria, ano	Periódico / fonte
3	Gawande *et al*., 2003	Waste Management
4	Ribeiro *et al*., 2013	Geotecnia
5	Shihada *et al*., 2013	Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste
6	Ling *et al*., 2013	Environmental Earth Sciences
7	Naveen, 2018	International Journal of Geo-Engineering
8	Felipe Guedes *et al*., 2021	Revista DAE
9	Torres; Lange, 2022	Engenharia Sanitaria e Ambiental
10	Kola *et al*., 2023	Soils and Rocks
11	Nascimento *et al*., 2025	Engenharia Sanitaria e Ambiental
12	Leverenz *et al*., 2026	Waste Management

Fonte: Autoria própria (2026), a partir da verificação bibliográfica Crossref.

5.5.1 Base conceitual e normativa da caracterização de RSU

A amostragem de RSU no Brasil segue a ABNT NBR 10.007 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004), única referência nacional vigente para essa finalidade, ainda apoiada na adaptação metodológica difundida por Stech (1990). A norma norte-americana ASTM D5231 (ASTM International, 2016) segue lógica análoga, com faixa de massa de amostra distinta. Ambas prescrevem homogeneização como etapa antecedente ao quarteamento, sem detalhar seu efeito sobre as propriedades físicas do material. A ausência de padronização internacional para a amostragem de resíduos sólidos é apontada como um fator que limita a comparabilidade entre estudos conduzidos sob normas distintas (Edjabou et al., 2015). Cabe registrar que a família normativa brasileira de resíduos sólidos foi objeto de revisão recente, com a publicação da ABNT NBR 10004-1:2024 e da ABNT NBR 10004-2:2024, que substituíram a NBR 10004:2004 em matéria de classificação, ao passo que a NBR 10.007, dedicada à amostragem, permanece na edição de 2004. A revisão de uma norma da família e a permanência da outra delimitam o espaço normativo em que se insere a proposição desenvolvida nos capítulos seguintes.

5.5.2 Métodos de caracterização e amostragem de RSU

A preocupação metodológica com a amostragem de RSU antecede em décadas a normatização atualmente vigente. Hiraoka *et al*. (1979) já discutiam métodos de amostragem para análise de resíduos municipais no Japão, e a década seguinte consolidou um corpo de

estudos voltado à representatividade da fração orgânica fresca (Beckers *et al*., 1986), a protocolos de amostragem em pontos de descarte (Holcombe *et al*., 1986) e à otimização do número de amostras necessário para estabilizar a estimativa de composição (Terashima *et al*., 1984; Leroy *et al*., 1992). Klee (1993) e Scott (1995) ampliaram essa discussão, respectivamente, para a estimativa de quantidade de resíduos e para a harmonização internacional de protocolos analíticos aplicados à conversão energética de RSU, enquanto Martin *et al*. (1995) e Sfeir, Reinhart e McCauley-Bell (1999) documentaram, já naquele período, fontes específicas de viés introduzidas pelo próprio protocolo de amostragem, sem isolar a homogeneização mecânica como variável independente, e Stelling e Sjerps (1999) formalizaram método de amostragem e teste de hipótese para o controle legal de resíduos perigosos, extremo de exigência estatística raramente replicado na caracterização gravimétrica de RSU.

Esse compromisso com a robustez do desenho amostral permanece um eixo ativo da literatura contemporânea. Bolaane e Ali (2004) documentaram as dificuldades práticas da amostragem domiciliar na fonte em Gaborone e Dangi et al. (2008) propuseram amostragem por conglomerados estratificados como alternativa mais eficiente para estimar a geração domiciliar de resíduos no Nepal. Paul e Daniel (2008) padronizaram o tamanho mínimo de amostra para caracterização física de RSU pelo método de redução sucessiva por quadrantes, aproximando-se operacionalmente do quarteamento normativo, ainda que sem investigar seus efeitos sobre a distribuição de umidade entre frações. Dahlén e Lagerkvist (2008) e Sahimaa et al. (2015) sistematizaram, respectivamente, os métodos de estudo de composição residencial e o protocolo finlandês de amostragem residual, mais tarde atualizado e testado por Liikanen et al. (2016), evidenciando que o número e a duração das campanhas afetam diretamente a precisão da estimativa.

Wasserman *et al*. (2022) formalizaram estatisticamente essa exigência ao calcular o número mínimo de amostras necessário para atingir determinado intervalo de confiança, e Sembiring *et al*. (2026) demonstraram que a redução da duração da campanha compromete a análise da geração e composição de RSU. Šramková *et al*. (2021) propuseram estratificação e otimização multirrepresentativa como resposta a essa exigência, e Hartwell *et al*. (2021) estenderam a discussão à variação de propriedades do resíduo em profundidade, por meio de sondagem de grande diâmetro. Em conjunto, esses estudos tratam o desenho da campanha, isto é, quantas amostras coletar e por quanto tempo, como o principal determinante da qualidade estatística da caracterização, um enquadramento que deixa a etapa de preparo físico da amostra, a homogeneização em si, fora do escopo do problema.

A aplicação empírica desses protocolos, sobretudo variantes da ABNT NBR 10.007 e da ASTM D5231, estende-se a dezenas de contextos nacionais na América Latina, na África, na Ásia e na Europa (Quadro 3). Essa amplitude geográfica é acompanhada de uniformidade metodológica: os estudos diferem quanto ao local, à sazonalidade e à escala urbana, mas convergem em aplicar a homogeneização e o quarteamento como etapa dada, ajustando principalmente o número e a duração das campanhas. O trabalho de Denafas *et al*. (2014), que comparou a variação sazonal da composição em quatro cidades do leste europeu, ilustra o padrão dominante: a fonte de variabilidade investigada é externa ao preparo da amostra, e não o procedimento laboratorial que o antecede.

O Brasil concentra parcela expressiva desse corpo empírico, com caracterizações municipais em todas as regiões do país (Quadro 3), quase sempre estruturadas como aplicação pontual da ABNT NBR 10.007 a um único município. Essa produção consolida a caracterização gravimétrica como rotina de diagnóstico, mas seu desenho, um protocolo aplicado a um contexto, não comporta o exame do efeito da homogeneização, que só se torna observável por comparação entre métodos. As exceções que se afastam da aplicação municipal isolada apontam, por contraste, o que a maioria não faz: Viegas *et al*. (2023) acompanharam a evolução temporal da gravimetria em uma capital, e Leite *et al*. (2021) trataram a amostragem como variável a otimizar para estimar o poder calorífico, deslocando o foco do resultado para o método que o produz.

Em conjunto, esse volume de estudos confirma a consolidação da caracterização gravimétrica como instrumento técnico, mas também expõe sua principal limitação para a pergunta desta revisão: por não compararem métodos entre si, tais estudos não têm como isolar o efeito da homogeneização, apenas incorporá-la como etapa neutra.

Um subconjunto desses estudos recorta instituições de ensino como unidade de análise, replicando o mesmo protocolo em escala de campus, do ensino superior (Adeniran *et al*., 2017; Gallardo *et al*., 2016; Ojuri *et al*., 2024) à educação básica (Bandeira *et al*., 2025; Pereira *et al*., 2025). Felder, Petrell e Duff (2001) constituem exceção metodologicamente instrutiva: ao particionar o campus em áreas de atividade e repetir a coleta de amostras representativas, enfrentam diretamente a variação espacial e temporal que a aplicação municipal padrão trata de modo implícito, antecipando parte das preocupações metodológicas retomadas nos capítulos empíricos desta tese. Esse recorte institucional aproxima a literatura internacional do desenho empírico dos capítulos seguintes desta tese, conduzidos em uma instituição de educação básica, profissional e tecnológica.

Fora do recorte estrito de RSU bruto, uma literatura correlata trata da amostragem de fluxos derivados ou associados, o que amplia a base empírica sobre operações de redução amostral em material heterogêneo. Estudos de landfill mining descrevem a amostragem, o processamento e a caracterização de resíduos já dispostos (Kaartinen *et al*., 2013; García López *et al*., 2018; Sormunen *et al*., 2008; Morello *et al*., 2018; Faitli *et al*., 2019), e a produção de combustível derivado de resíduos recorre a protocolos de amostragem próprios, adaptados da caracterização convencional (Ranieri *et al*., 2017), inclusive para frações grosseiras mono ou mistas acondicionadas em fardos (Aldrian *et al*., 2015). No Brasil, a mesma ABNT NBR 10.007 tem sido adaptada para caracterizar rejeitos e frações grosseiras oriundos de unidades de triagem (MRF) e de tratamento mecânico-biológico, como evidenciam os estudos conduzidos em São Paulo (Correa *et al*., 2022; Mondelli *et al*., 2022) e a caracterização de combustível derivado de resíduos no país (Sbrolini Tiburcio *et al*., 2021; Oliveira *et al*., 2025), estendendo a mesma lógica normativa de homogeneização e quarteamento a fluxos de saída de processamento mecânico, sem tampouco investigar seus efeitos sobre as propriedades físicas do material retido.

A amostragem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, sobretudo plásticos (Martinho *et al*., 2012) e placas de circuito impresso (Touze *et al*., 2020), assim como de plásticos de uso único (Spies *et al*., 2024) e de microplásticos associados a aterros sanitários (Saengchut *et al*., 2024; Haritwal *et al*., 2025), estende o mesmo problema de partição amostral a materiais de granulometria e composição ainda mais heterogêneas que o RSU bruto. Spies *et al*. (2026) sintetizam esse campo em uma revisão de escopo sobre amostragem e análise manual de resíduos sólidos, com foco na avaliação de processamento mecânico, reconhecendo a fragmentação metodológica como problema transversal ao campo.

Uma vertente distinta da literatura volta-se ao tratamento estatístico apropriado para dados de composição gravimétrica. Møller (2004) e Fällman (2000) discutiram, respectivamente sob abordagem quimiométrica e de lixiviação potencial, a amostragem de cinzas de fundo heterogêneas de incineração, e Brandstätter *et al*. (2014) aplicaram modelagem por regressão multivariada para predizer características químicas de resíduos misturados em aterros antigos a partir de amostragem estruturada. Edjabou *et al*. (2017) formalizaram, para dados de composição de RSU especificamente, a violação dos pressupostos de independência entre categorias que somam necessariamente 100%, ponto retomado na discussão pela sua relação direta com o desenho estatístico adotado nos capítulos empíricos desta tese. Chen (2018) e Adelodun *et al*. (2021) documentam, por abordagens distintas, como a urbanização e a sazonalidade alteram a composição de RSU e de resíduos alimentares, respectivamente,

reforçando que a variabilidade composicional tem múltiplas fontes concorrentes além do próprio método de amostragem.

Mais próximo ao problema investigado nesta tese, Doimo da Silva *et al*. (2025) trataram a homogeneização intermitente de leiras como estratégia de melhoria do processo de biossecagem de biomassa de resíduo sólido de laranja, tratando a homogeneização como variável de processo capaz de alterar propriedades físicas do material, ainda que fora do contexto da amostragem para caracterização gravimétrica. Slack *et al*. (2007) documentaram, por amostragem direta, a heterogeneidade de resíduos domésticos perigosos no Reino Unido. Nenhum desses estudos, porém, isola o efeito da homogeneização mecânica, tratada nas normas de amostragem como etapa neutra, sobre a redistribuição de propriedades físicas entre frações, achado consistente com a lacuna já identificada no núcleo empírico deste eixo.

5.5.3 Teoria da amostragem e erro em materiais heterogêneos

A teoria da amostragem de Gy fornece o modelo mais utilizado para explicar o erro introduzido por operações de redução amostral em materiais particulados heterogêneos (Gy; Marin, 1978; Pitard, 1993; Gerlach *et al*., 2002). Sua aplicação não se restringe a RSU bruto: Pazó *et al*. (2010) aplicaram o arcabouço de Gy à amostragem de biocombustíveis sólidos heterogêneos, quantificando a incerteza associada à análise imediata; Wavrer (2018) aplicou explicitamente a teoria da amostragem à caracterização de RSU na França, tratando a heterogeneidade de constituição e de distribuição como fontes distintas de erro; e Cestonaro e Barros (2019) avaliaram, com base na Teoria da Amostragem de Pierre Gy, a representatividade do uso do trier na caracterização de leiras de compostagem de RSU, um dos poucos estudos identificados nesta revisão que aplica o arcabouço de Gy a uma etapa de preparo físico da amostra próxima à investigada nesta tese.

Fora do RSU bruto, a mesma teoria orienta a amostragem de fluxos heterogêneos correlatos: placas de circuito impresso de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (Laubertova *et al*., 2019; Barthet *et al*., 2024), resíduos comerciais mistos triturados, cuja série em duas partes trata separadamente do procedimento de amostragem e triagem granulométrica (Khodier *et al*., 2020) e da determinação de elementos por fração de tamanho de partícula (Viczek *et al*., 2022), combustível derivado de resíduos (Thawani *et al*., 2022; Haruko *et al*., 2024) e combustível sólido recuperado, cuja subamostragem foi comparada estatisticamente à própria Teoria da Amostragem por Gerassimidou *et al*. (2020a, 2020b). Essa convergência entre campos distintos, RSU bruto, resíduos eletroeletrônicos e combustíveis derivados de resíduos,

reforça o caráter geral do problema amostral: qualquer operação de partição sobre material heterogêneo introduz erro mensurável, independentemente da natureza específica do resíduo.

O detalhamento operacional desse arcabouço, sistematizado por Petersen, Minkkinen e Esbensen (2005), distingue os erros que decorrem da heterogeneidade constitucional do material daqueles gerados pela própria execução da amostragem, e sustenta que apenas a redução de massa conduzida sem viés preserva a representatividade da amostra. É nesse ponto que o quarteamento normativo se torna crítico: por depender da captura manual de quadrantes, ele é uma etapa de redução de massa cuja correção, no sentido da teoria da amostragem, não é assegurada pelas normas que o prescrevem. A homogeneização que antecede o quarteamento nas normas ABNT NBR 10.007 e ASTM D5231 é justificada como meio de reduzir a heterogeneidade de distribuição antes dessa partição, mas o arcabouço trata a heterogeneidade como propriedade de composição e tamanho de partícula, não de teor de umidade, e não prevê que o próprio ato de homogeneizar possa transferir água entre frações em contato.

Esse referencial, no entanto, trata o erro amostral essencialmente como uma questão de probabilidade de captura de partículas de composição e tamanho distintos. A possibilidade de que a própria operação de homogeneização redistribua propriedades físicas, como o teor de umidade, entre frações, não integra o modelo original de Gy nem sua aplicação corrente na literatura de resíduos, inclusive no estudo mais próximo ao problema desta tese dentre os identificados (Cestonaro; Barros, 2019).

5.5.4 Umidade, segregação e redistribuição de água em resíduos

A transferência de umidade entre frações de RSU está documentada, mas circunscrita a um contexto diferente do da homogeneização laboratorial. Magrinho e Semião (2008) modelaram a absorção de líquidos de resíduos de cozinha por papel e a adesão superficial em plásticos ao longo do fluxo de coleta. Götze *et al*. (2016), comparando coleta mista e segregada na Dinamarca, registraram maior umidade em papel e plástico no fluxo misto. Singhal *et al*. (2021) relataram que a umidade da fração orgânica compromete a separação das demais frações em resíduos da Índia. Em todos esses casos, a mistura decorre do sistema de coleta, resultante do contato entre resíduos ao longo de dias de armazenamento e transporte, e não de um procedimento de amostragem executado no momento da caracterização.

Outra vertente da literatura trata a umidade como propriedade a ser monitorada após a disposição final, em aterros sanitários, por métodos indiretos que dispensam escavação. Yuen, McMahon e Styles (2000) empregaram sonda de nêutrons para monitorar o teor de umidade in situ ao longo do tempo de decomposição; Gawande *et al*. (2003) desenvolveram sensor de

resistência elétrica para a mesma finalidade; Ling *et al*. (2013) aplicaram tomografia de resistividade elétrica para acompanhar a variação de umidade durante dois meses de degradação; e Shihada *et al*. (2013) propuseram abordagem para estimar a umidade de RSU aterrado sem perfuração. Ribeiro *et al*. (2013) e Naveen (2018) associaram o teor de umidade a parâmetros mecânicos e a propriedades estáticas e dinâmicas do maciço de resíduos, linha em que Kola, Roy e Chakraborty (2023) reconhecem, ao correlacionar recalque a velocidade de onda cisalhante, a dificuldade de extrair e reconstituir amostras representativas de resíduo heterogêneo para ensaio, e Felipe Guedes *et al*. (2021) acompanharam a evolução do processo biodegradativo em lisímetros com diferentes composições de RSU.

Domalski et al. (1986), uma das referências mais antigas deste grupo, já associava a umidade da amostra ao monitoramento de cloro ao longo da cadeia de amostragem até a combustão. Torres e Lange (2022) e Nascimento et al. (2025) trataram a umidade como parâmetro determinante do poder calorífico e da perda de massa por combustão de RSU, com implicação direta para rotas de valorização energética. Esses estudos operam em escala e finalidade distintas da caracterização gravimétrica de amostra recém-coletada: monitoram a variação de umidade ao longo do tempo de decomposição no próprio corpo do aterro, ou sua relação com o aproveitamento energético do resíduo, não o efeito de um procedimento de preparo de amostra sobre a distribuição de água entre frações no momento da caracterização.

Achado mais recente e diretamente relevante, publicado já no fechamento desta revisão, aproxima-se dessa lacuna por outra via: Leverenz, Souza e Christensen (2026) quantificaram a perda de água por evaporação durante a triagem manual de resíduo domiciliar exposto ao ar ambiente, medindo perdas de aproximadamente 2% da massa de água inicial em resíduo alimentar e de 1,6% a 5%, com casos de até 14%, em rejeito, ao longo de 6 a 8 horas de exposição, com sobrestimativa correspondente de 9% a 13% no poder calorífico inferior e no potencial de biogás calculados em base úmida.

O fenômeno que Leverenz, Souza e Christensen (2026) isolam, perda de umidade para o ambiente durante a exposição da amostra ao ar, é distinto do mecanismo investigado nesta tese, a redistribuição de umidade entre frações secas e úmidas por efeito da homogeneização mecânica, mas ambos operam na mesma janela crítica, a etapa de preparo e triagem da amostra, e convergem na conclusão de que essa etapa, tratada pelas normas vigentes como neutra, introduz viés mensurável sobre os resultados de caracterização. Sua publicação no mesmo ano desta revisão reforça que a pergunta de pesquisa desta tese está na fronteira atual do campo, e não isolada.

5.5.5 Síntese e lacuna identificada

Os quatro eixos anteriores permitem uma leitura conjunta. A homogeneização mecânica está normativamente estabelecida como etapa de preparo amostral (Eixo 1), e um corpo de cento e um estudos de caracterização gravimétrica a aplica de forma consistente, em contextos institucionais, municipais, geográficos e industriais amplamente distintos, com atenção voltada principalmente ao número e à duração das campanhas de amostragem, e não à etapa de homogeneização em si (Eixo 2). A teoria da amostragem de Gy, sustentada por nove estudos que a aplicam a RSU e a materiais correlatos, explica por que a partição de material heterogêneo introduz erro, mas restringe esse erro à captura desigual de partículas (Eixo 3). A transferência de umidade entre frações secas e úmidas, por sua vez, documentada em doze estudos, aparece como propriedade do sistema de coleta ao longo de dias, ou como fenômeno de aterro monitorado após a disposição final, não como efeito de uma etapa de preparo laboratorial isolada da redução de massa amostral (Eixo 4).

Essa lacuna encontra respaldo em evidência internacional recente e independente da literatura aplicada de RSU: revisão de escopo de 2026 sobre amostragem e análise manual de resíduos sólidos não identificou arcabouço metodológico consolidado para avaliar os efeitos do processamento mecânico sobre a composição (Spies *et al*., 2026), e estudo dedicado à reprodutibilidade da amostragem de resíduos atribui parte da variabilidade observada entre campanhas a decisões metodológicas de preparo da amostra, sem isolar a homogeneização como variável (Boer *et al*., 2018). Ademais, o quarteamento manual, procedimento central às normas ABNT NBR 10.007 e ASTM D5231, não é recomendado no referencial fundacional da própria Teoria da Amostragem de Gy (Gy; Marin, 1978; Pitard, 2019), o que reforça, a partir de fonte teórica externa à literatura aplicada de RSU, a pertinência de investigar empiricamente esse efeito, motivação central dos capítulos empíricos desta tese.

Entre os mais de cento e vinte estudos reunidos nos Eixos 2 a 4, não foram identificados, dentro da estratégia de busca adotada, estudos que isolem o efeito da homogeneização normativa, aplicada a uma amostra já coletada, do efeito da redução de massa associada ao quarteamento, sobre a redistribuição de umidade entre frações. Essa afirmação não pressupõe a inexistência absoluta de tais estudos na literatura mundial, apenas a sua ausência no recorte de bases e descritores efetivamente percorridos por esta revisão.

5.6 CONCLUSÃO

A literatura consultada, reunindo cento e vinte e três estudos com metadados bibliográficos verificados nos Eixos 2 a 4, além das referências teóricas e metodológicas de sustentação, estabelece três pontos consistentes. A homogeneização mecânica é uma etapa normativamente incorporada à amostragem de RSU, tratada como neutra em relação às propriedades físicas dos materiais em cento e um estudos de caracterização gravimétrica aqui sintetizados. A teoria da amostragem de Gy explica o erro de partição de materiais heterogêneos pela probabilidade de captura de partículas, sem tratar da migração de umidade, em nenhum dos dez estudos identificados no Eixo 3. E a transferência de água entre frações secas e úmidas está documentada, mas em relação ao sistema de coleta ao longo de dias ou ao monitoramento pós-disposição em aterros, não à etapa de homogeneização executada no momento da caracterização, em nenhum dos doze estudos identificados no Eixo 4. Isso inclui o achado mais recente e operacionalmente mais próximo desta tese, referente à perda evaporativa de água durante a triagem (Leverenz *et al*., 2026), que trata de mecanismo distinto, a perda para o ambiente, e não a redistribuição entre frações.

Nenhum estudo identificado nas bases e descritores percorridos por esta revisão isola o efeito da homogeneização normativa, independente da redução de massa amostral, sobre a redistribuição de umidade entre frações.

5.7 REFERÊNCIAS

ADELODUN, B.; KIM, S.H.; CHOI, K.S. Assessment of food waste generation and composition among Korean households using novel sampling and statistical approaches. **Waste Management**, v. 122, p. 71-80, 2021. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.003

ADENIRAN, A.; NUBI, A.; ADELOPO, A. Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. **Waste Management**, v. 67, p. 3-10, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.002

ALDRIAN, A.; WELLACHER, M.; POMBERGER, R. Development and validation of a new direct sampling method for coarse mono- and mixed waste fractions bound in bales. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 95, p. 1502-1522, 2015. https://doi.org/10.1080/03067319.2015.1115864

ALFAIA, R. G. de S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: a review. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 12, p. 1195-1209, 2017. https://doi.org/10.1177/0734242X17735375

ALKMIN, D.V.; JUNIOR, L.U. Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (rsu) do lixão do município de maria da fé, estado de minas gerais. **Caminhos de Geografia**, v. 18, p. 65-82, 2017. https://doi.org/10.14393/rcg186105

ALMEIDA, R.G.d. Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares urbanos do município de Caçador SC, á partir da caracterização física e composição gravimétrica. **IGNIS: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação**, v. 1, p. 51-70, 2012. https://doi.org/10.29327/223085.1.1-4

ALOLAYAN, M.A.; ALSANAD, A.H.; ALJALLAL, L.I.; ELMI, A. Municipal solid waste characteristics and segregation efficiency of in-house direct sampling in Kuwait. **International Journal of Environment and Waste Management**, v. 31, p. 467-480, 2023. https://doi.org/10.1504/ijewm.2023.131150

AMBER, I.; KULLA, D.M.; GUKOP, N. Generation, characteristics and energy potential of solid municipal waste in Nigeria. **Journal of Energy in Southern Africa**, v. 23, p. 47-51, 2012. https://doi.org/10.17159/2413-3051/2012/v23i3a3172

ARAIZA AGUILAR, J.A.; CHÁVEZ MORENO, J.C.; MORENO PÉREZ, J.A. Cuantificación de residuos sólidos urbanos generados en la cabecera municipal de berriozábal, chiapas, méxico. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 33, p. 691-699, 2017. https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.04.12

ARAÚJO, A.M.; AQUINO, M.D.d. Análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos presentes na comunidade de Guajiru, Trairi-Ceará. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 13, p. e1170, 2024. https://doi.org/10.23900/2359-1552v13n2-256-2024

ARAÚJO, N.C.d.; SOARES, B.B.; SUASSUNA, R.d.C.A.; SANTO, F.d.S.d.E.; SANTOS, M.S.T.; QUEIROZ, A.J.P. Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos gerados na cidade de Santa Cecília/Paraíba. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, p. 90-97, 2018. https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2018.007.0009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004-1: resíduos sólidos: parte 1: requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 21 p.

ASTM INTERNATIONAL. D5231-92(2016): standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

BALTHI MSHELİA, R.; SHEHU DİSO, İ.; AUDU ADAMU, A. Technical and Economic Analysis of Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Yola Metropolis, Adamawa State, Nigeria. **Hittite Journal of Science and Engineering**, v. 9, p. 117-123, 2022. https://doi.org/10.17350/hjse19030000262

BANDEIRA, J. B.; SOUSA, J. A.; BASTOS, A. T.; MEDEIROS, C. R. R. Gestão de resíduos sólidos em escola pública do Brasil: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 12, n. 30, p. 325-345, 2025. https://doi.org/10.21438/rbgas(2025)123022

BARTHET, A.; CHAURIS, H.; ROMARY, T.; SEMETEY, V.; CHAUTRU, E. Advanced granulometric characterization of shredded waste printed circuit boards for sampling. **Waste Management**, v. 187, p. 296-305, 2024. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.001

BECKERS, G.; NYNS, E.J.; NAVEAU, H. Representative sampling of the organic fraction of fresh municipal solid waste. **Biomass**, v. 11, p. 91-98, 1986. https://doi.org/10.1016/0144-4565(86)90040-5

BOER, E. den; JEDRCZAK, A.; BOER, J. den; BUTRYMOWICZ, T. Factors affecting the reproducibility of waste sampling and composition analyses. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 17, p. 2755-2766, 2018. https://doi.org/10.30638/eemj.2018.275

BOLAANE, B.; ALI, M. Sampling Household Waste at Source: Lessons Learnt in Gaborone. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 22, p. 142-148, 2004. https://doi.org/10.1177/0734242x04044970

BRANDÃO, C.R.P.; SILVA, A.V.B.d.A.; SILVA, L.O.; VITÓRIA, N.S.; DE SOUSA, I.F. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos descartados irregularmente no bairro dos rodoviários, paulo afonso - BA. **Semioses**, v. 13, p. 60-76, 2019. https://doi.org/10.15202/1981996x.2019v13n1p60

BRANDSTÄTTER, C.; LANER, D.; PRANTL, R.; FELLNER, J. Using multivariate regression modeling for sampling and predicting chemical characteristics of mixed waste in old landfills. **Waste Management**, v. 34, p. 2537-2547, 2014. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.009

CAMPOS, R.F.F.d.; BORGA, T. GERAÇÃO DE RESÍDUOS RECICLÁVEIS NO MUNICÍPIO DE CAÇADOR-SC. **IGNIS: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação**, v. 4, p. 24-38, 2015. https://doi.org/10.29327/223085.4.1-2

CARVAJAL-FLÓREZ, E.; TORO YEPES, J.J.; REALPE ERAZO, M.I. Caracterización de residuos sólidos en una institución de educación superior: caso de estudio campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. **Tecnología y ciencias del agua**, v. 14, p. 01-37, 2023. https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-01-01

CESTONARO, T.; BARROS, R.T.d.V. Representatividade da amostragem com emprego do trier na caracterização de leiras de compostagem de resíduos sólidos urbanos com base na Teoria da Amostragem de Pierre Gy. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 359-370, 2019. https://doi.org/10.1590/s1413-41522019173152

CESTONARO, T.; BARROS, R.T.D.V.; MATOS, A.T.D. Spatial and temporal variability of the chemical characteristics of food waste and green waste: influence on their sampling and composting. **International Journal of Environment and Waste Management**, v. 24, p. 1, 2019. https://doi.org/10.1504/ijewm.2019.100655

CHEN, Y.C. Effects of urbanization on municipal solid waste composition. **Waste Management**, v. 79, p. 828-836, 2018. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.017

CORPORATION FOR DIGITAL SCHOLARSHIP. **Zotero**: versão 7.0. Vienna: Corporation for Digital Scholarship, 2026. Programa de computador. Disponível em: https://www.zotero.org. Acesso em: 5 mai. 2026.

CORREA, C.A.; OLIVEIRA, M.A.de; JACINTO, C.; MONDELLI, G. Challenges to reducing post-consumer plastic rejects from the MSW selective collection at two MRFs in São Paulo city, Brazil. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 24, p. 1140-1155, 2022. https://doi.org/10.1007/s10163-022-01387-9

COUTO, B.d.O.C.; OLIVEIRA, A.F.d.; SALEH, B.B.; MORAIS, B.B.d.; JÚNIOR, C.R.d.S. A composição gravimétrica como ferramenta fundamental na gestão dos resíduos sólidos: estudo de caso do município de Rio Verde/GO. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, p. 404-410, 2020. https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.006.0033

CRUZ RODRIGUES, G.; SALGADO VARGAS, I.; RODRIGUES CASTRO, S. Caracterização gravimétrica como etapa de diagnóstico de resíduos sólidos: estudo em município de pequeno porte. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, p. 62-82, 2023. https://doi.org/10.9771/gesta.v0i1.51092

DAHLÉN, L.; LAGERKVIST, A. Methods for household waste composition studies. **Waste Management**, v. 28, p. 1100-1112, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.014

DANGI, M.B.; URYNOWICZ, M.A.; GEROW, K.G.; THAPA, R.B. Use of stratified cluster sampling for efficient estimation of solid waste generation at household level. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 26, p. 493-499, 2008. https://doi.org/10.1177/0734242x07085755

DENAFAS, G.; RUZGAS, T.; MARTUZEVIČIUS, D.; SHMARIN, S.; HOFFMANN, M.; MYKHAYLENKO, V.; OGORODNIK, S.; ROMANOV, M.; NEGULIAEVA, E.; CHUSOV, A.; TURKADZE, T.; BOCHOIDZE, I.; LUDWIG, C. Seasonal variation of municipal solid waste generation and composition in four East European cities. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 89, p. 22-30, 2014. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.001

DOIMO DA SILVA, V.d.C.; DE SOUZA, J.P.; HORTA, A.C.; MILESSI, T.S.; MAIA, G.D. Intermittent bed homogenization as a strategy for improving the biodrying process of orange solid waste biomass. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 216, p. 110399, 2025. https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110399

DOMALSKI, E.; CHURNEY, K.; LEDFORD, A.; BRUCE, S. Monitoring the fate of chlorine from MSW sampling through combustion Part I: Analysis of the waste stream for chlorine. **Chemosphere**, v. 15, p. 1339-1354, 1986. https://doi.org/10.1016/0045-6535(86)90409-1

DURÁN MORENO, A.; GARCÉS RODRÍGUEZ, M.; ROCÍO VELASCO, A.; MARÍN ENRIQUEZ, J.C.; GUTIÉRREZ LARA, R.; MORENO GUTIÉRREZ, A.; DELGADILLO HERNÁNDEZ, N.A. Características y análisis de composición de los residuos sólidos de la ciudad de méxico. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 29, 2013. https://doi.org/10.20937/rica.27126

EDJABOU, M. E.; MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Statistical analysis of solid waste composition data: arithmetic mean, standard deviation and correlation coefficients. **Waste Management**, v. 69, p. 13-23, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.036

EDJABOU, M.E.; JENSEN, M.B.; GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; PETERSEN, C.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T.F. Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. **Waste Management**, v. 36, p. 12-23, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.009

EMARA, K.; DAOUD, A.O.; WILLIAM, M.; FARAG, M.A. An innovative approach to municipal solid waste characterization for waste-to-energy processes in Egypt. **Cleaner Waste Systems**, v. 9, p. 100161, 2024. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100161

FAITLI, J.; NAGY, S.; ROMENDA, R.; GOMBKÖTŐ, I.; BOKÁNYI, L.; BARNA, L. Assessment of a residual municipal solid waste landfill for prospective 'landfill mining'. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 37, p. 1229-1239, 2019. https://doi.org/10.1177/0734242x19881197

FÄLLMAN, A.M. Significance in the results of total composition and potential leachability of screened MSWI BA from different plants and sampling periods. **Waste Management Series**, p. 355-370, 2000. https://doi.org/10.1016/s0713-2743(00)80048-3

FELDER, M. A. J.; PETRELL, R. J.; DUFF, S. J. B. A solid waste audit and directions for waste reduction at the University of British Columbia, Canada. **Waste Management & Research**, v. 19, n. 4, p. 354-365, 2001. https://doi.org/10.1177/0734242X0101900412

FELIPE GUEDES, M.J.; GLESON DOS SANTOS MOREIRA, F.; OLIVEIRA NUNES, L.A.; DE PAIVA, W.; ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO, V.; CAMARGO DE MELO, M. Evolução do processo biodegradativo em lisímetros com diferentes composições de resíduos sólidos urbanos. **Revista DAE**, v. 69, p. 105-118, 2021. https://doi.org/10.36659/dae.2021.080

FERNANDO, A.; LIMA, S.d.C. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos do município de maxixe-moçambique. **Caminhos de Geografia**, v. 13, p. 335-345, 2012. https://doi.org/10.14393/rcg134317460

FIEL, L.G.; MONTEIRO NETO, A.; SOUSA, M.C.d.; GUSMÃO, M.T.A.d.; PAIVA, P.F.P.R.; BRAGA, T.G.M.; SILVA JUNIOR, O.M.d.; RUIVO, M.d.L.P. Análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados na Ilha de Cotijuba em Belém – PA. **Research, Society and Development**, v. 10, p. e435101220724, 2021. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20724

GALDINO, S.D.J.; MARTINS, C.H. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional de um município de pequeno porte. **Tecno-Lógica**, v. 20, p. 01, 2015. https://doi.org/10.17058/tecnolog.v20i1.6060

GALLARDO, A.; EDO-ALCÓN, N.; CARLOS, M.; RENAU, M. The determination of waste generation and composition as an essential tool to improve the waste management plan of a

university. **Waste Management**, v. 53, p. 3-11, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.013

GARCÍA LÓPEZ, C.; KÜPPERS, B.; CLAUSEN, A.; PRETZ, T. LANDFILL MINING: A case study regarding sampling, processing and characterization of excavated waste from an Austrian landfill. **Detritus**, v. 2, p. 29, 2018. https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13664

GAWANDE, N.A.; REINHART, D.R.; THOMAS, P.A.; MCCREANOR, P.T.; TOWNSEND, T.G. Municipal solid waste in situ moisture content measurement using an electrical resistance sensor. **Waste Management**, v. 23, p. 667-674, 2003. https://doi.org/10.1016/s0956-053x(03)00100-4

GERASSIMIDOU, S.; VELIS, C. A.; KOMILIS, D. Establishing a sub-sampling plan for waste-derived solid recovered fuels (SRF): effects of shredding on representative sample preparation based on theory of sampling (ToS). **Waste Management**, v. 113, p. 430-438, 2020b. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.019

GERASSIMIDOU, S.; VELIS, C.A.; BOURNE, R.A.; KOMILIS, D.; GARCIA-TAENGUA, E.; WILLIAMS, P.T. Statistical quantification of sub-sampling representativeness and uncertainty for waste-derived solid recovered fuel (SRF): Comparison with theory of sampling (ToS). **Journal of Hazardous Materials**, v. 388, p. 122013, 2020a. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.122013

GERLACH, R. W.; DOBB, D. E.; RAAB, G. A.; NOCERINO, J. M. Gy sampling theory in environmental studies. 1. Assessing soil splitting protocols. **Journal of Chemometrics**, v. 16, n. 7, p. 321-328, 2002. https://doi.org/10.1002/cem.720

GIDARAKOS, E.; HAVAS, G.; NTZAMILIS, P. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. **Waste Management**, v. 26, p. 668-679, 2006. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.018

GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; BOLDRIN, A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Physico-chemical characterisation of material fractions in residual and source-segregated household waste in Denmark. **Waste Management**, v. 54, p. 13-26, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.009

GUIMARÃES, G.D.A.; BATISTA, M.M. Avaliação do potencial de reciclagem dos resíduos sólidos urbanos na região central do município de Itacoatiara/AM. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, p. 260, 2021. https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e32021260-276

GUSENBAUER, M.; HADDAWAY, N. R. Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of Google Scholar, PubMed, and 26 other resources. **Research Synthesis Methods**, v. 11, p. 181-217, 2020. https://doi.org/10.1002/jrsm.1378

GY, P.M.; MARIN, L. Unbiased sampling from a falling stream of particulate material. **International Journal of Mineral Processing**, v. 5, p. 297-315, 1978. https://doi.org/10.1016/0301-7516(78)90025-X

HADDAWAY, N. R.; COLLINS, A. M.; COUGHLIN, D.; KIRK, S. The role of Google Scholar in evidence reviews and its applicability to grey literature searching. **PLOS ONE**, v. 10, n. 9, e0138237, 2015. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138237

HARITWAL, D.K.; SINGH, P.; RAMANA, G.; DATTA, M. Application of high-resolution site characterisation tools and sampling methods for assessing microplastic migration beneath MSW dumpsites. **Journal of Hazardous Materials**, v. 488, p. 137384, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137384

HARTWELL, J.; MOUSAVI, M.S.; EUN, J.; BARTELT-HUNT, S. Evaluation of depth-dependent properties of municipal solid waste using a large diameter-borehole sampling method. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 71, p. 433-446, 2021. https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1848942

HARUKO, D.P.; TRIHADININGRUM, Y.; WILUJENG, S.A.; RADITA, D.R.; BAGASTYO, A.Y. Potential Use of Municipal Solid Waste Pile in Segawe Landfill (Tulungagung Regency, Indonesia) as Raw Material for Refuse Derived Fuel. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 18, p. 27-40, 2024. https://doi.org/10.7494/geom.2024.18.5.27

HERAVI, H.M.; SABOUR, M.R.; MAHVI, A.H. Municipal Solid Waste Characterization, Tehran-Iran. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 16, p. 759-769, 2013. https://doi.org/10.3923/pjbs.2013.759.769

HIRAOKA, M.; TAKEDA, N.; NYJITA, K. SAMPLING METHODS FOR MUNICIPAL SOLID WASTE ANALYSIS. **Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers**, v. 1979, p. 45-52, 1979. https://doi.org/10.2208/jscej1969.1979.282_45

HOANG, M.G.; FUJIWARA, T.; PHAM PHU, S.T. Municipal waste generation and composition in a tourist city — Hoi An, Vietnam. **Journal of JSCE**, v. 5, p. 123-132, 2017. https://doi.org/10.2208/journalofjsce.5.1_123

HOLCOMBE, L.; JOHNSON, D.; LORENZEN, D. Practices for Sampling Solid Wastes from Point Discharges and Impoundments. **Hazardous and Industrial Solid Waste Testing and Disposal: Sixth Volume**, p. 353-366, 1986. https://doi.org/10.1520/stp23090s

IBIKUNLE, R.; TITILADUNAYO, I.; LUKMAN, A.; DAHUNSI, S.; AKEJU, E. Municipal solid waste sampling, quantification and seasonal characterization for power evaluation: Energy potential and statistical modelling. **Fuel**, v. 277, p. 118122, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118122

KAARTINEN, T.; SORMUNEN, K.; RINTALA, J. Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, p. 56-66, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.036

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050.** Washington, DC: World Bank, 2018. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

KHODIER, K.; VICZEK, S.A.; CURTIS, A.; ALDRIAN, A.; O'LEARY, P.; LEHNER, M.; SARC, R. Sampling and analysis of coarsely shredded mixed commercial waste. Part I:

procedure, particle size and sorting analysis. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, p. 959-972, 2020. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02526-w

KIM, V.J.H. Análise da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares de São Carlos (SP). 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. https://doi.org/10.11606/d.18.2019.tde-17062019-104821

KLEE, A.J. New Approaches to Estimation of Solid-Waste Quantity and Composition. **Journal of Environmental Engineering**, v. 119, p. 248-261, 1993. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1993)119:2(248)

KOLA, N.; ROY, D.; CHAKRABORTY, D. Estimation of short-term settlements of MSW landfill materials using shear wave velocity. **Soils and Rocks**, v. 46, n. 3, e2023078521, 2023. https://doi.org/10.28927/SR.2023.078521

LA COUR JANSEN, J.; SPLIID, H.; HANSEN, T.L.; SVÄRD, Å.; CHRISTENSEN, T.H. Assessment of sampling and chemical analysis of source-separated organic household waste. **Waste Management**, v. 24, p. 541-549, 2004. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.02.013

LAUBERTOVA, M.; MALINDZAKOVA, M.; TRPCEVSKA, J.; GAJIC, N. Assessment of sampling and chemical analysis of waste printed circuit boards from WEEE: gold content determination. **Metallurgical and Materials Engineering**, v. 25, p. 171-182, 2019. https://doi.org/10.30544/427

LEITE, J.T.C.; MARANA, K.B.; DRUDI, K.C.; CENEDESE, C.H.; ANTONIO, G.C. Sampling composition for the low heat value evaluation of municipal solid wastes in Brazil. **Advanced Technology for the Conversion of Waste Into Fuels and Chemicals**, p. 315-332, 2021. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90150-5.00009-1

LEROY, D.; GIOVANNONI, J.; MAYSTRE, L. Sampling method to determine a household waste composition variance. **Waste Management & Research**, v. 10, p. 3-12, 1992. https://doi.org/10.1016/0734-242x(92)90052-m

LEVERENZ, D.; SOUZA, R.G.de; CHRISTENSEN, T.H. Water losses during household waste characterization: an overlooked issue? **Waste Management**, v. 216, p. 115442, 2026. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115442

LIIKANEN, M.; SAHIMAA, O.; HUPPONEN, M.; HAVUKAINEN, J.; SORVARI, J.; HORTTANAINEN, M. Updating and testing of a Finnish method for mixed municipal solid waste composition studies. **Waste Management**, v. 52, p. 25-33, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.022

LING, C.; ZHOU, Q.; XUE, Y.; ZHANG, Y.; LI, R.; LIU, J. Application of electrical resistivity tomography to evaluate the variation in moisture content of waste during 2 months of degradation. **Environmental Earth Sciences**, v. 68, p. 57-67, 2013. https://doi.org/10.1007/s12665-012-1715-y

MAGRINHO, A.; SEMIÃO, V. On the effect of MSW moisture content on meeting target recycling rates. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 310-317, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.021

MARTIN, J.H.; COLLINS, A.R.; DIENER, R.G. A Sampling Protocol for Composting, Recycling, and Re-use of Municipal Solid Waste. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 45, p. 864-870, 1995. https://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467416

MARTINHO, G.; PIRES, A.; SARAIVA, L.; RIBEIRO, R. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. **Waste Management**, v. 32, p. 1213-1217, 2012. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.010

MENEZES, R. O.; CASTRO, S. R.; SILVA, J. B. G.; TEIXEIRA, G. P.; SILVA, M. A. M. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 271-282, 2019. https://doi.org/10.1590/s1413-41522019177437

MØLLER, H. Sampling of heterogeneous bottom ash from municipal waste-incineration plants. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 74, p. 171-176, 2004. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.016

MONDELLI, G.; JUAREZ, M.B.; JACINTO, C.; OLIVEIRA, M.A.de; GOMES COELHO, L.H.; BIANCARDI, C.B.; CASTRO FARIA, J.L.de. Geo-environmental and geotechnical characterization of municipal solid waste from the selective collection in Sao Paulo city, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 19898-19912, 2022. https://doi.org/10.1007/s11356-021-18281-w

MORAIS, P.D.; COSTA, T.V.d.; SEABRA FILHO, G.Q. Caracterização dos resíduos sólidos do município de São José de Espinharas (PB). **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 16, p. 163, 2020. https://doi.org/10.3895/rts.v16n41.11786

MORELLO, L.; RAGA, R.; SGARBOSSA, P.; ROSSON, E.; COSSU, R. Storage potential and residual emissions from fresh and stabilized waste samples from a landfill simulation experiment. **Waste Management**, v. 75, p. 372-383, 2018. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.026

MORGAN, R. L.; WHALEY, P.; THAYER, K. A.; SCHÜNEMANN, H. J. Identifying the PECO: a framework for formulating good questions to explore the association of environmental and other exposures with health outcomes. **Environment International**, v. 121, p. 1027-1031, 2018. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.015

MOTA, A.R.S.d.; SILVA, N.M.d. Gravimetric Characterization of Solid Waste in the Dump of the Municipality of Coari - Amazonas, Brazil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, p. e09540, 2024. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-123

NASCIMENTO, A.P.d.; WILCHES, J.M.C.; MATTOS, P.S.W.D.; RODRIGUES, R.A.; MONDELLI, G. Combustion mass loss proceedings for solid waste: some results for MSW and CDW in Brazil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 30, 2025. https://doi.org/10.1590/s1413-415220250080

NAVEEN, B.P. Measurement of static and dynamic properties of municipal solid waste at Mavallipura landfill site, India. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 9, 2018. https://doi.org/10.1186/s40703-018-0088-9

OELOFSE, S.; MUSWEMA, A.; RAMUKHWATHO, F. Household food waste disposal in South Africa: A case study of Johannesburg and Ekurhuleni. **South African Journal of Science**, v. 114, p. 6, 2018. https://doi.org/10.17159/sajs.2018/20170284

OJURI, O.O.; OLOWOSELU, A.S.; AKINRELE, J.; AYODELE, F.O.; JAYEJEJE, O.O. Sustainable integrated solid waste management for a university campus − A case study of the Federal University of Technology Akure (FUTA), Nigeria. **Waste Management Bulletin**, v. 2, p. 161-170, 2024. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.04.004

OLIVEIRA, A.C.S.d.; SANTOS, J.G.C.; SILVA, R.M.d.; BARROS, R.P.d. Caracterização e destinação dos resíduos sólidos domiciliares do município de Arapiraca-AL: uma abordagem sobre a produção per capta. **Revista Ambientale**, v. 2, p. 10, 2017. https://doi.org/10.17648/ambientale.v2i1.83

OLIVEIRA, A.D.de; DUCOM, G.; CASTILHOS JUNIOR, A.B.de; PERES, S.; JUCA, J.F.T.; PERIER-CAMBY, H.; BAYARD, R. Refuse derived fuel produced in Brazil: physico-chemical analysis, standards and opportunities for energy recovery. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 27, p. 666-683, 2025. https://doi.org/10.1007/s10163-024-02107-1

OLIVEIRA, A.F.d.; LOPES, A.A. Composição gravimétrica como ferramenta para a gestão de resíduos sólidos / Gravimetric composition as a tool for solid waste management. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, p. 27221-27226, 2021. https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-433

ONUNGWE, I.; HUNT, D.V.L.; JEFFERSON, I. Transitioning towards circular economy through municipal solid waste analysis and characterisation using SowaCLINK software. **Frontiers in Sustainability**, v. 5, 2024. https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1321329

PAGE, M. J. *et al*. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, 2021. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

PAUL, J.A.J.; DANIEL, T. Standardization of Sampling Method for Physical Characterization of Municipal Solid Waste. **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, v. 5, p. 15-19, 2008. https://doi.org/10.3233/ajw-2008-5_1_15

PAZÓ, J.A.; GRANADA, E.; SAAVEDRA, Á.; PATIÑO, D.; COLLAZO, J. Heterogenic Solid Biofuel Sampling Methodology and Uncertainty Associated with Prompt Analysis. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 11, p. 2118-2133, 2010. https://doi.org/10.3390/ijms11052118

PEREIRA, E. A. A.; SOARES, J. K. N. C.; PEREIRA, E. V.; GUEDES, C. S.; CANDEIA, A. L.; SILVA, J. M. D.; COSTA, J. G. N.; FERREIRA, E. S. A. Caracterização de resíduos sólidos em escola pública de Patos, PB. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 9, 2025. https://doi.org/10.54033/cadpedv22n9-347

PETERSEN, L.; MINKKINEN, P.; ESBENSEN, K. H. Representative sampling for reliable data analysis: theory of sampling. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 77, n. 1-2, p. 261-277, 2005. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.09.013

PICANÇO, S.F.; TELLO, J.C.R.; COELHO, L.M. Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos produzidos na cidade de Parintins (AM). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 5, p. 107-116, 2014. https://doi.org/10.6008/spc2179-6858.2014.002.0010

PITARD, F. F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1993.

PITARD, F. F. **Theory of Sampling and Sampling Practice.** 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2019.

QUEIROZ JÚNIOR, A.B.; BEZERRA, J.M.; COSTA, T.T.D.; ROQUE, F.S.; REGO, A.T.A.D.; COSTA, H.C.G.; NOBRE, S.B. Caracterização Gravimétrica de Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Ereré/CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 172-188, 2021. https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.1.p172-188

RANIERI, E.; IONESCU, G.; FEDELE, A.; PALMIERI, E.; RANIERI, A.C.; CAMPANARO, V. Sampling, characterisation and processing of solid recovered fuel production from municipal solid waste: An Italian plant case study. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 35, p. 890-898, 2017. https://doi.org/10.1177/0734242x17716276

REZENDE, J.H.; CARBONI, M.; MURGEL, M.A.d.T.; CAPPS, A.L.d.A.P.; TEIXEIRA, H.L.; SIMÕES, G.T.C.; RUSSI, R.R.; LOURENÇO, B.L.R.; OLIVEIRA, C.d.A. Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, p. 1-8, 2013. https://doi.org/10.1590/s1413-41522013000100001

RIBEIRO, A.; AZEVEDO, R.; ROCHA, E.; AZEVEDO, I.; LORETO, A. Determinação de parâmetros mecânicos de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios realizados em laboratório. **Geotecnia**, p. 81-101, 2013. https://doi.org/10.14195/2184-8394_127_4

ROBLES, N.; RIVADENEIRA, D.; HERRERA, M.; PONCE, W. Análisis de la Influencia Temporal y Geográfica del Muestreo sobre las Propiedades Fisicoquímicas de FORSU en Manabí, Ecuador. **Revista Técnica "energía"**, v. 22, p. 146-155, 2026. https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v22.n2.2026.743

RODRIGUES VIEIRA, D.C.; ALVES FIORE, F. Caracterização de resíduos sólidos urbanos em municípios de pequeno porte - estudo de caso no município de Monteiro Lobato/SP. **Revista DAE**, v. 70, p. 52-66, 2022. https://doi.org/10.36659/dae.2022.035

RODRIGUES VIEIRA, D.C.; ALVES FIORE, F. Visão de gestores municipais sobre requisitos aplicáveis à caracterização de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso na Bacia do Paraíba do Sul. **Revista DAE**, v. 69, p. 73-91, 2021. https://doi.org/10.36659/dae.2021.062

RODRIGUES, M.A.; ISMAIL, K.A.R.; LINO, F.A.d.M. Análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Manaus – AM. **REVISTA FOCO**, v. 16, p. e2247, 2023. https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n6-068

SAENGCHUT, P.; VIRIYA, H.; KONGRITTI, N. Source Apportionment of Microplastics in Environment from Sanitary Landfill: A Case Study of Muangpak Municipality Landfill,

Thailand. **Journal of Ecological Engineering**, v. 25, p. 278-284, 2024. https://doi.org/10.12911/22998993/175410

SAHIMAA, O.; HUPPONEN, M.; HORTTANAINEN, M.; SORVARI, J. Method for residual household waste composition studies. **Waste Management**, v. 46, p. 3-14, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.032

SAIDAN, M.N.; DRAIS, A.A.; AL-MANASEER, E. Solid waste composition analysis and recycling evaluation: Zaatari Syrian Refugees Camp, Jordan. **Waste Management**, v. 61, p. 58-66, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.026

SAMBIASI, C.G.; PASCUAL BARRERA, A.E.; SAMBIASI, M.A. Urban Solid Waste Characterization of the Misiones Metropolitan Area. **Revista de Ciencia y Tecnología**, p. 36-41, 2022. https://doi.org/10.36995/j.recyt.2022.38.005

SANTANA, M.S.A.d.; JUCÁ, J.F.T.; CALLADO, N.H.; CARVAHO, E.C.d.; PONTES, L.A.G.d.B. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos de um aterro consorciado no agreste alagoano: uma abordagem metodológica por regionalização. **Research, Society and Development**, v. 11, p. e35111335240, 2022. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35240

SANTOS, C.E.; BORBA, W.F.; CAMARGO, M.; SORGATO, A.C.; ANDRIOLI, C.; DECOL, J.; MARTINS, M.; ERPEN, V. Analysis of Urban Solid Waste Management Applied to a Selective Collection Pilot Area. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, p. 94-101, 2019. https://doi.org/10.11137/2019_4_94_101

SBROLINI TIBURCIO, R.; MALPELI JUNIOR, M.; CAMPOS LEITE, J.T.de; MINORU YAMAJI, F.; PEREIRA NETO, A.M. Physicochemical and thermophysical characterization of rejected waste and evaluation of their use as refuse-derived. **Fuel**, v. 293, p. 120359, 2021. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120359

SCOTT, P. The International Energy Agency's (IEA) work in harmonising sampling and analytical protocols related to municipal solid waste (MSW) conversion to energy. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, p. 415-439, 1995. https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00108-5

SEMBIRING, E.; RAMADAN, A.H.; FARID, M. Implications of shorter sampling durations on the analysis of municipal solid waste generation and composition. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 28, p. 133-140, 2026. https://doi.org/10.1007/s10163-025-02401-6

SFEIR, H.; REINHART, D.R.; MCCAULEY-BELL, P.R. An Evaluation of Municipal Solid Waste Composition Bias Sources. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 49, p. 1096-1102, 1999. https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463903

SHIHADA, H.; HOSSAIN, M.S.; KEMLER, V.; DUGGER, D. Estimating Moisture Content of Landfilled Municipal Solid Waste without Drilling: Innovative Approach. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 17, p. 317-330, 2013. https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000155

SILVA, A.F.d.; ISHIHARA, J.H.; ALVES, C.L. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos do Município de Tucuruí, Estado do Pará, Norte do Brasil. **Revista Brasileira de**

Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 9, p. 887-897, 2022. https://doi.org/10.21438/rbgas(2022)092223

SINGHAL, A.; GUPTA, A. K.; DUBEY, B.; GHANGREKAR, M. M. Seasonal characterization of municipal solid waste for selecting feasible waste treatment technology for Guwahati city, India. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 72, n. 2, p. 147-160, 2021. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1980450

SLACK, R.J.; BONIN, M.; GRONOW, J.R.; VAN SANTEN, A.; VOULVOULIS, N. Household Hazardous Waste Data for the UK by Direct Sampling. **Environmental Science & Technology**, v. 41, p. 2566-2571, 2007. https://doi.org/10.1021/es061775w

SORMUNEN, K.; ETTALA, M.; RINTALA, J. Detailed internal characterisation of two Finnish landfills by waste sampling. **Waste Management**, v. 28, p. 151-163, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.003

SOUZA, M. T. de; SILVA, M. D. da; CARVALHO, R. de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo)**, v. 8, n. 1, p. 102-106, 2010. https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134

SPIES, A.M.; GELDMACHER, J.; GARCÍA LÓPEZ, C.; PRETZ, T.; RAULF, K. Methodology to quantify single-use plastic products in municipal solid waste Part 1: Development of a sampling methodology. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 42, p. 485-494, 2024. https://doi.org/10.1177/0734242x231190803

SPIES, A.M.; SCHMÄDECKER, S.H.; KUHN, N.; RAULF, K.; KOINIG, G.; GREIFF, K.; POMBERGER, R. A systematic scoping review of solid waste sampling and manual analyses, focusing on assessing mechanical waste processing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 231, p. 108855, 2026. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.108855

ŠRAMKOVÁ, K.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; JIRÁSEK, P.; SMEJKALOVÁ, V.; POPELA, P. Stratification and multi-representative optimization approach to waste composition analysis. **Optimization and Engineering**, v. 22, p. 1727-1754, 2021. https://doi.org/10.1007/s11081-021-09645-9

STECH, P. J. **Resíduos Sólidos: caracterização, resíduos sólidos domésticos: tratamento e disposição final.** São Paulo: CETESB, 1990.

STELLING, M.; SJERPS, M. A sampling and hypothesis testing method for the legal control of solid hazardous waste. **Environmetrics**, v. 10, p. 247-259, 1999. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199905/06)10:3<247::AID-ENV352>3.0.CO;2-Z

TAGLIAFERRO, E.R.; VIANA, D.V. Caracterização Gravimétrica dos Resíduos Sólidos de um Aterro Sanitário Municipal no Interior do Estado de São Paulo. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 7, 2019. https://doi.org/10.17271/2317860471620192209

TERASHIMA, Y.; URABE, S.; YOSHIKAWA, K. Optimum sampling of municipal solid wastes. **Conservation & Recycling**, v. 7, p. 295-308, 1984. https://doi.org/10.1016/0361-3658(84)90028-6

THAWANI, B.; MAHANTY, B.; BEHERA, S.K. Characterization of refuse derived fuel samples prepared from municipal solid waste in Vellore, India. **Environmental Technology**, v. 43, p. 1843-1852, 2022. https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1856191

TORRES, V.A.; LANGE, L.C. Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valoração energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, p. 25-30, 2022. https://doi.org/10.1590/s1413-415220210221

TOUZE, S.; GUIGNOT, S.; HUBAU, A.; DEVAU, N.; CHAPRON, S. Sampling waste printed circuit boards: Achieving the right combination between particle size and sample mass to measure metal content. **Waste Management**, v. 118, p. 380-390, 2020. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.054

TRENTIN, A.W.D.S.; BRAUN, A.B.; RODRÍGUEZ, A.L.; LOPES, D.A.R. Estudo da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos em Santa Cruz do Sul, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 13, p. 07, 2019. https://doi.org/10.18316/rca.v13i1.3636

UGWU, C.O.; OZOEGWU, C.G.; OZOR, P.A. Solid waste quantification and characterization in university of Nigeria, Nsukka campus, and recommendations for sustainable management. **Heliyon**, v. 6, p. e04255, 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04255

VICZEK, S.A.; KANDLBAUER, L.; KHODIER, K.; ALDRIAN, A.; SARC, R. Sampling and analysis of coarsely shredded mixed commercial waste. Part II: particle size-dependent element determination. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, p. 6359-6374, 2022. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03567-w

VIEGAS, G.; ANTUNES, C.; LANGE, L. Análise da evolução temporal da gravimetria dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Belo Horizonte. **Anais - 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, 2023. https://doi.org/10.55449/conresol.6.23.iv-048

WASSERMAN, M.; ANSHASSI, M.; TOWNSEND, T.G. Assessing Sample Number Requirements for Municipal Solid Waste Composition Studies. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 26, 2022. https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000652

WAVRER, P. Theory of Sampling (TOS) applied to characterisation of Municipal Solid Waste (MSW): a case study from France. **TOS Forum**, v. 2013, p. 3, 2018. https://doi.org/10.1255/tosf.101

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005. https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x

YUEN, S.T.S.; MCMAHON, T.A.; STYLES, J.R. Monitoring In Situ Moisture Content of Municipal Solid Waste Landfills. **Journal of Environmental Engineering**, v. 126, p. 1088-1095, 2000. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2000)126:12(1088).

6 CAPÍTULO II - MASSA TRIADA E ESCALA DE AGREGAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ANÁLISE COMPOSICIONAL DE TRÊS PROTOCOLOS AMOSTRAIS

6.1 RESUMO

A caracterização gravimétrica de resíduos sólidos urbanos (RSU) produz dados fechados, cuja soma é fixada em 100%, condição que invalida o emprego de estatística clássica sobre as frações. Este estudo comparou três protocolos de caracterização aplicados aos resíduos de um complexo educacional de tempo integral em Eunápolis, Bahia, em três campanhas de maio de 2025: triagem integral sem redução amostral (Método Geral), ABNT NBR 10.007:2004 e ASTM D5231-92. Os resíduos foram triados em dez microcategorias. Os dados foram tratados por análise composicional, com transformação de razão logarítmica centrada, distância de Aitchison e matriz de variação, restringindo-se as comparações principais a subcomposições livres de zeros. O poder de detecção acompanhou a massa triada: o protocolo ASTM (104,80 kg) registrou dez categorias; o Método Geral (72,65 kg), nove; e o protocolo ABNT (21,53 kg), seis. A menor fração detectada variou de 0,057% a 2,322% da massa triada. As razões entre frações majoritárias permaneceram estáveis entre protocolos, com variância log-ratio de 0,004 para Orgânicos/Plásticos e de 0,150 para Orgânicos/Rejeitos sanitários. A agregação em macrogrupos reduziu as distâncias composicionais entre 1,4 e 2,6 vezes em relação às subcomposições detalhadas de mesma dimensão, o que caracteriza mascaramento e não equivalência entre protocolos. Os dados não sustentam a atribuição das divergências à homogeneização mecânica: os dois protocolos que a empregam divergiram entre si mais do que qualquer um deles em relação ao controle. O delineamento não separa efeito de protocolo e efeito de dia, de modo que os resultados descrevem divergências observadas, sem atribuição associativa.

Palavras-chave: quarteamento; distância de Aitchison; razão logarítmica.

6.2 ABSTRACT

Gravimetric characterization of municipal solid waste (MSW) produces closed data, whose sum is fixed at 100%, a condition that invalidates the use of classical statistics on the fractions. This study compared three characterization protocols applied to the waste of a full-time educational complex in Eunápolis, Bahia, over three campaigns in May 2025: integral sorting without sample reduction (General Method), ABNT NBR 10.007:2004, and ASTM D5231-92. The waste was sorted into ten microcategories. The data were analyzed through a compositional approach, using the centered log-ratio transformation, the Aitchison distance, and the variation matrix, with the main comparisons restricted to zero-free subcompositions. Detection power tracked the sorted mass: the ASTM protocol (104.80 kg) recorded ten categories; the General Method (72.65 kg), nine; and the ABNT protocol (21.53 kg), six. The smallest detected fraction ranged from 0.057% to 2.322% of the sorted mass. The ratios among the major fractions remained stable across protocols, with a log-ratio variance of 0.004 for Organics/Plastics and 0.150 for Organics/Sanitary rejects. Aggregation into macrogroups reduced the compositional distances by 1.4 to 2.6 times relative to the detailed subcompositions of the same dimension, which characterizes masking rather than equivalence between protocols. The data do not support attributing the divergences to mechanical homogenization: the two protocols that employ it diverged from each other more than either diverged from the control. The design does not separate the protocol effect from the day effect, so the results describe observed divergences, without causal attribution.

Keywords: quartering; Aitchison distance; log-ratio.

6.3 INTRODUÇÃO

A caracterização gravimétrica determina a composição percentual em massa das frações que constituem os resíduos sólidos urbanos (RSU). Dela dependem o dimensionamento de unidades de triagem, a definição de rotas de coleta seletiva, a projeção de metas de reciclagem e a formulação de programas de logística reversa (Adeniran *et al.*, 2017; Aleisa; Al-Jarallah, 2024; Gallardo *et al.*, 2016). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece diretrizes para a gestão integrada (Brasil, 2010), e o Marco Legal do Saneamento fixa metas de universalização e de encerramento da disposição inadequada até 2033 (Brasil, 2020). Ambos os instrumentos pressupõem diagnósticos composicionais confiáveis na escala municipal.

O procedimento nacional de amostragem é normatizado pela NBR 10.007:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), que prevê a homogeneização mecânica seguida de quarteamento sucessivo, com o objetivo de reduzir a massa a ser triada. A norma norte-americana ASTM D5231-92 (ASTM International, 2016) adota redução distinta: a massa descarregada é misturada, zoneada e quarteada até a obtenção de amostra de triagem entre 91 e 136 kg, submetida integralmente à separação manual. Os dois protocolos combinam homogeneização e redução amostral em proporções diferentes, e a literatura não estabelece qual dos dois componentes governa a fidedignidade do resultado.

A ausência de padronização internacional para amostragem de RSU limita a comparabilidade entre estudos e compromete a robustez estatística das estimativas (Edjabou *et al.*, 2015). A esse problema soma-se outro, de natureza distinta e menos discutido. Dados de composição gravimétrica são dados fechados: as frações somam necessariamente 100%, e o incremento de qualquer uma delas impõe decréscimo às demais. Médias aritméticas, desvios-padrão, coeficientes de correlação e testes de aderência aplicados diretamente sobre percentuais ou massas de frações ignoram essa restrição e produzem medidas de dispersão e associação sem interpretação válida (Edjabou *et al.*, 2017). O tratamento adequado exige transformação prévia para coordenadas de razão logarítmica, sobre as quais a análise estatística recupera sentido (Aitchison, 1986; Egozcue *et al.*, 2003).

Instituições de ensino em regime de tempo integral constituem geradores com perfil próprio, decorrente da permanência prolongada dos usuários e da centralização do preparo de refeições. Estudos brasileiros registram predominância da fração orgânica biodegradável nesses ambientes e apontam carência de planos de gerenciamento estruturados e de dados empíricos de composição (Bandeira *et al.*, 2025; Pereira *et al.*, 2025). O baixo volume diário de geração aproxima essas unidades do limite inferior de massa em que os protocolos normativos foram

concebidos para operar, o que torna o ambiente escolar um caso favorável para examinar o comportamento dos protocolos sob redução amostral.

Este estudo comparou, sob abordagem composicional, três protocolos de caracterização gravimétrica aplicados aos resíduos gerados no Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica de Eunápolis (CIEB), Bahia, com dois objetivos: descrever como a massa efetivamente triada e a escala de agregação das categorias afetam o perfil gravimétrico determinado; e avaliar em que medida a divergência entre protocolos pode ser atribuída à homogeneização mecânica.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

6.4.1 Área e campanhas de caracterização

A pesquisa foi conduzida no CIEB, em Eunápolis, Bahia. A instituição opera em regime de tempo integral e atende cerca de 1.140 usuários, distribuídos entre 650 alunos do ensino integral diurno, 350 alunos da educação de jovens e adultos no turno noturno e cerca de 90 servidores.

Foram realizadas três campanhas em dias não consecutivos de maio de 2025, cada uma correspondendo à aplicação de um protocolo (Tabela 1). Os resíduos foram acondicionados em sacos plásticos durante o turno de funcionamento, o que impediu perda de lixiviado e contaminação cruzada prévia. A triagem ocorreu em local coberto, com piso impermeável e fechamento lateral. As condições de armazenamento e de triagem foram idênticas nas três campanhas.

Tabela 1 - Campanhas de caracterização, massa triada e poder de detecção das categorias, CIEB Eunápolis (BA), 2025.

Campanha	Data	Protocolo	Massa triada (kg)	Categorias detectadas	Menor fração detectada (kg)	Menor fração detectada (% da massa triada)
1	14/05/2025	Método Geral	72,65	9 de 10	0,20	0,275
2	22/05/2025	ABNT NBR 10.007:2004	21,53	6 de 10	0,50	2,322
3	27/05/2025	ASTM D5231-92	104,80	10 de 10	0,06	0,057

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

6.4.2 Protocolos comparados

O Método Geral consistiu na triagem manual da massa integral coletada, sem a homogeneização e sem o quarteamento. Cada componente foi segregado e pesado em balança

digital com resolução de 0,01 kg. Este protocolo foi adotado como controle, por não impor redução amostral nem revolvimento da matriz.

O protocolo ABNT seguiu a NBR 10.007:2004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004). A massa coletada foi submetida a ciclos sucessivos de homogeneização por tombamento e mistura sobre lona plástica, seguidos de quarteamento, do que resultou fração amostral de 21,53 kg destinada à triagem.

O protocolo ASTM seguiu a D5231-92 (ASTM International, 2016), com mistura e homogeneização da massa coletada, formação de pilha cônica, coleta de quatro amostras da base e uma do topo e quarteamento subsequente, do que resultou amostra de triagem de 104,80 kg. A exigência normativa de coleta em cinco dias consecutivos foi suprimida, em razão do baixo volume diário de geração, da decomposição acelerada da fração orgânica em clima tropical úmido e da impossibilidade de refrigeração das amostras.

6.4.3 Categorização dos resíduos

Os resíduos foram triados em dez microcategorias: Orgânicos biodegradáveis (restos de alimentos, folhas e cascas), designados pela forma abreviada Orgânicos ao longo do texto, das tabelas e das figuras; Papel/Papelão; Plásticos (plástico mole, plástico rígido e PET); Metais (ferrosos, aço e alumínio); Vidros; Inertes (areia, terra, tijolos, cerâmica e argamassa); Multicamadas (embalagens cartonadas e similares); Rejeitos sanitários; Perigosos (medicamentos, pilhas, baterias e lâmpadas fluorescentes); e Outros (toucas descartáveis, tecidos, isopor, embalagens aluminizadas e materiais não identificáveis).

Para a análise da escala de agregação, as microcategorias foram amalgamadas em macrogrupos funcionais, segundo a rota de destinação: Compostáveis (Orgânicos biodegradáveis); Recicláveis Secos (Papel/Papelão, Plásticos, Metais, Vidros e Multicamadas); Rejeitos e afins (Rejeitos sanitários e Outros); e Inertes e Perigosos.

6.4.4 Análise composicional

As massas triadas por categoria foram fechadas ao total de cada protocolo, o que gerou um vetor composicional por protocolo. A soma unitária das frações impede o uso de estatística clássica sobre os percentuais, razão pela qual as comparações foram conduzidas em coordenadas de razão logarítmica (Aitchison, 1986; Edjabou *et al.*, 2017; Egozcue *et al.*, 2003).

A transformação de razão logarítmica centrada de uma composição x, com D partes, é definida pela Equação 1.

$$clr(x) = \left[ln\left(\frac{x_1}{g(x)}\right), ln\left(\frac{x_2}{g(x)}\right), \ldots, ln\left(\frac{x_D}{g(x)}\right)\right] \quad \text{(eq.1)}$$

Em que:

clr(x) - vetor de coordenadas de razão logarítmica centrada (adimensional);

x_i - proporção da i-ésima fração (adimensional);

g(x) - média geométrica das D partes da composição, definida por g(x) = ($x_1 \cdot x_2 \cdot \ldots \cdot x_D$)^(1/D) (adimensional);

D - número de partes da composição (adimensional).

A dissimilaridade entre duas composições x e y foi medida pela distância de Aitchison, apresentada na Equação 2.

$$d_A(x,y) = \left\{\sum_{i=1}^{D}\left[ln\left(\frac{x_i}{g(x)}\right) - ln\left(\frac{y_i}{g(y)}\right)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{(eq.2)}$$

Em que:

d_A (x, y) - distância de Aitchison entre as composições x e y (adimensional).

A estabilidade da razão entre pares de frações foi avaliada pela matriz de variação, definida pela Equação 3.

$$t_{ij} = var\left[ln\left(\frac{x_i}{x_j}\right)\right] \quad \text{(eq.3)}$$

Em que:

t_{ij} - elemento da matriz de variação para as frações i e j (adimensional). Valores próximos de zero indicam que a razão entre as duas frações se mantém constante entre protocolos.

A transformação de razão logarítmica não admite zeros. Os zeros observados têm duas origens distintas, que exigem tratamentos distintos. Zeros essenciais decorrem da ausência real da fração no fluxo do dia e não podem ser imputados, sob pena de criar informação inexistente. A distinção entre um zero essencial e um zero de arredondamento é, portanto, decidida pelo registro de campo, e não pelo valor numérico observado. Um zero é tratado como essencial apenas quando há evidência documental da ausência da fração no fluxo do dia. A fração Inertes não foi registrada nas campanhas do Método Geral e do protocolo ABNT, para as quais o registro de campo não documenta obra predial na instituição, ao passo que a campanha do protocolo ASTM foi precedida de obras de reparo. A fração Vidros concentrou-se em um único evento de descarte, também documentado em campo. Zeros de arredondamento decorrem da não captura de fração presente no fluxo, situação esperada quando a massa triada é reduzida, e correspondem a Metais e Perigosos no protocolo ABNT.

Adotaram-se, por isso, duas estratégias combinadas. As comparações principais foram restritas a subcomposição de cinco frações com rota de destinação definida, registradas em todos os protocolos e livres de zeros, dispensando imputação. A categoria Outros, embora também zero-free, é analisada separadamente por sua natureza residual: sua variância log-ratio com as demais frações situa-se entre 1,2 e 3,6, o que dominaria qualquer métrica de dissimilaridade e deslocaria o foco da análise composicional do comportamento das frações principais. As comparações que envolvem a composição completa empregaram substituição multiplicativa dos zeros de arredondamento, com valor de imputação igual a 65% do limite de detecção da balança, convertido em proporção da massa triada de cada protocolo (Martín-Fernández *et al.*, 2003). A substituição multiplicativa foi adotada por preservar as razões entre as partes não imputadas, propriedade exigida pela natureza composicional dos dados, ao contrário da substituição aditiva simples. As comparações centrais, contudo, apoiam-se em subcomposições livres de zeros, de modo que a imputação não condiciona as conclusões, apenas as análises de caráter ilustrativo sobre a composição completa. A sensibilidade dos resultados ao limite adotado foi verificada por variação do parâmetro entre 0,005 kg e 0,100 kg.

O delineamento não contemplou a repetição de protocolo, condição que impediria a estimação de variância dentro de cada nível e, por consequência, qualquer procedimento inferencial. Nenhum teste de hipótese foi aplicado. As análises são descritivas e caracterizam a magnitude das divergências observadas. Os cálculos foram conduzidos em ambiente R versão 4.4.1 (R Core Team, 2024).

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.5.1 Composição gravimétrica e poder de detecção

A fração Orgânicos biodegradáveis predominou nos três protocolos, com participação entre 56,35% e 59,60% da massa triada (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição gravimétrica por microcategoria e protocolo de caracterização, CIEB Eunápolis (BA), 2025.

Categoria	Geral (kg)	Geral (%)	ABNT (kg)	ABNT (%)	ASTM (kg)	ASTM (%)
Orgânicos	43,30	59,60	12,83	59,59	59,05	56,35
Papel/Papelão	4,55	6,26	1,30	6,04	18,43	17,59
Plásticos	5,41	7,45	1,80	8,36	8,04	7,67
Metais	0,40	0,55	0,00	0,00	0,25	0,24

Tabela 2 - Composição gravimétrica por microcategoria e protocolo de caracterização, CIEB Eunápolis (BA), 2025.

Categoria	Geral (kg)	Geral (%)	ABNT (kg)	ABNT (%)	ASTM (kg)	ASTM (%)
Vidros	6,15	8,47	0,00	0,00	2,54	2,42
Inertes	0,00	0,00	0,00	0,00	7,67	7,32
Multicamadas	0,85	1,17	0,50	2,32	0,52	0,50
Rejeitos sanitários	11,34	15,61	2,70	12,54	7,29	6,96
Perigosos	0,20	0,28	0,00	0,00	0,06	0,06
Outros	0,45	0,62	2,40	11,15	0,95	0,91
Total	**72,65**	**100,00**	**21,53**	**100,00**	**104,80**	**100,00**

Nota: os Vidros do Método Geral correspondem a copos e pratos quebrados acumulados por cerca de 30 dias e descartados na véspera da campanha; os Inertes do protocolo ASTM correspondem a obras de reparo predial executadas na véspera da campanha. Ambos os eventos constam do registro de campo. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

O valor supera o registrado em instituições de ensino superior, em que Adeniran et al. (2017) obtiveram 15% na Universidade de Lagos e Gallardo et al. (2016) obtiveram 15,9% na Universidade Jaume I, com predominância de papel e papelão. A diferença é coerente com o regime de tempo integral do CIEB, no qual as refeições são preparadas e servidas na própria unidade, ao passo que em universidades a alimentação é descentralizada e a geração se desloca para embalagens e material de escritório.

O número de categorias efetivamente registradas acompanhou a massa triada. O protocolo ASTM, com 104,80 kg triados, registrou as dez microcategorias e detectou fração de até 0,06 kg, equivalente a 0,057% da massa triada. O Método Geral, com 72,65 kg, registrou nove categorias, e a menor fração detectada correspondeu a 0,275%. O protocolo ABNT, com 21,53 kg, registrou seis categorias, e a menor fração detectada correspondeu a 2,322%. Metais, Vidros e Perigosos, presentes no fluxo institucional e registrados nos demais protocolos, não foram capturados pela fração amostral do protocolo ABNT.

O gradiente é monotônico e tem explicação direta. A massa mínima de uma categoria detectável em uma triagem é fixada pela resolução da balança e pela ocorrência de ao menos uma unidade do material na fração amostrada. Ao reduzir a massa triada a 21,53 kg, o quarteamento reduz na mesma proporção o número esperado de unidades de cada categoria presente na massa original. Categorias cuja participação é da ordem de décimos de ponto percentual passam a ter probabilidade de captura próxima de zero. O resultado é a conversão sistemática de frações raras em ausências aparentes. Esse efeito é atribuível ao protocolo, e não ao dia, porque a redução amostral é o próprio objeto da norma.

O comportamento da categoria residual “Outros” confirmou o mecanismo pelo lado oposto. Sua participação passou de 0,62% no Método Geral para 11,15% no protocolo ABNT, e a razão Outros/Orgânicos aumentou dezoito vezes em relação ao controle (Figura 2). Amostras reduzidas amplificam a contribuição relativa de itens não padronizados, o que é

consistente com a sensibilidade das categorias de baixa massa à redução amostral apontada por Edjabou et al. (2015). Do ponto de vista da gestão, a participação elevada de “Outros” sinaliza ausência de segregação na fonte e indica demanda por ações dirigidas à comunidade escolar.

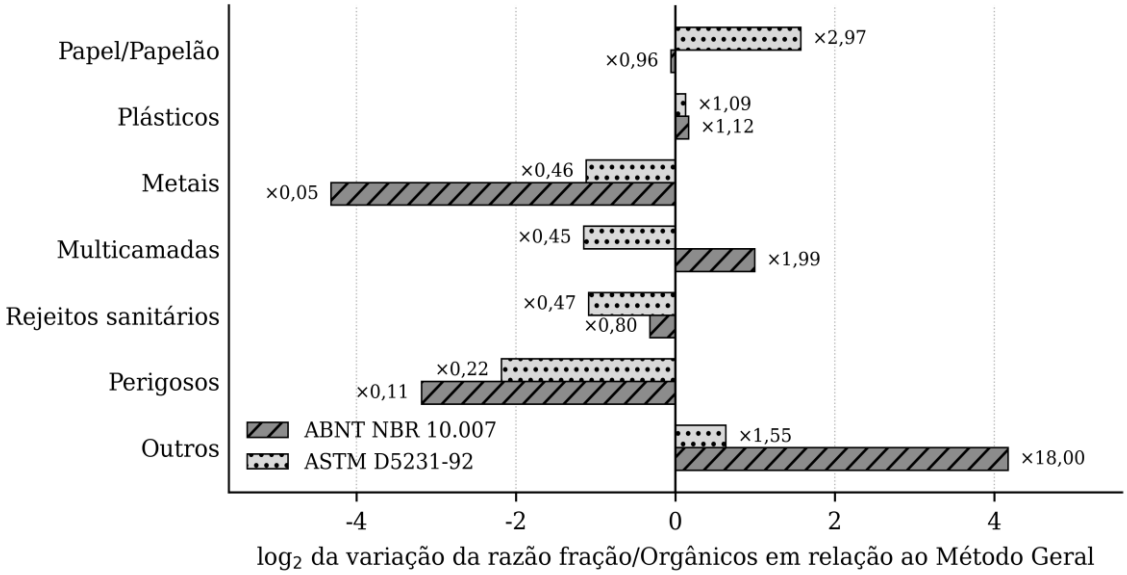


Figura 2 - Variação multiplicativa da razão entre cada fração e a fração Orgânicos, nos protocolos normativos, em relação ao Método Geral.

Nota: valores em escala logarítmica de base 2. O valor 1,00 indica reprodução exata da razão observada no Método Geral. As razões de Metais e Perigosos no protocolo ABNT decorrem da substituição multiplicativa dos zeros e dependem do limite de detecção adotado. Fonte: Dados da pesquisa (2025); elaboração própria (2026).

6.5.2 Estabilidade das razões entre frações majoritárias

As cinco categorias com rota de destinação definida, registradas em todos os protocolos e livres de zeros, foram Orgânicos biodegradáveis, Papel/Papelão, Plásticos, Multicamadas e Rejeitos sanitários. A categoria “Outros” foi excluída desta subcomposição por dominar as distâncias composicionais em razão de sua alta variância log-ratio (2,4 a 3,6), o que obscureceria o comportamento das frações de interesse para a gestão. Sobre a subcomposição de cinco partes, a matriz de variação (Tabela 3) discrimina dois grupos de comportamento.

Tabela 3 - Matriz de variação das razões logarítmicas entre as cinco frações registradas em todos os protocolos, CIEB Eunápolis (BA), 2025.

Fração	Orgânicos	Papel/Papelão	Plásticos	Multicamadas	Rejeitos sanitários
Orgânicos	0,000	0,409	0,004	0,554	0,150
Papel/Papelão	0,409	0,000	0,394	1,820	1,029
Plásticos	0,004	0,394	0,000	0,539	0,178
Multicamadas	0,554	1,820	0,539	0,000	0,288
Rejeitos sanitários	0,150	1,029	0,178	0,288	0,000

Nota: valores adimensionais. Quanto mais próximo de zero, mais estável é a razão entre as duas frações ao longo dos três protocolos. Subcomposição livre de zeros, sem imputação. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

As razões entre as frações de maior massa mantiveram-se estáveis. A variância log-ratio do par Orgânicos/Plásticos foi de 0,004, e a do par Orgânicos/Rejeitos sanitários foi de 0,150 (Figura 2). Valores dessa ordem indicam que a proporção entre essas frações praticamente não se altera quando o protocolo muda, ainda que a massa triada varie por um fator de cinco. Frações abundantes e distribuídas de modo homogêneo na massa resistem tanto ao revolvimento quanto ao quarteamento, porque a probabilidade de captura de cada uma permanece elevada em qualquer subamostra.

As razões que envolvem Multicamadas e Papel/Papelão apresentaram variâncias entre 0,288 e 1,820. O par Papel/Papelão-Multicamadas registrou o maior valor da matriz, mais de duas ordens de grandeza acima do par Orgânicos/Plásticos. Trata-se de duas frações de baixa massa e alta área superficial, condição que reduz o número de unidades disponíveis e amplia o efeito da partição da pilha sobre a proporção capturada.

As distâncias de Aitchison calculadas sobre essa subcomposição foram de 0,688 entre o Método Geral e o protocolo ABNT, de 1,540 entre o Método Geral e o protocolo ASTM e de 1,895 entre os dois protocolos normativos. A ordenação é informativa: o protocolo de menor massa triada, que também aplica homogeneização, é o que mais se aproxima do controle, ao passo que os dois protocolos normativos são, entre si, os mais distantes.

6.5.3 Efeito da agregação em macrogrupos

A comparação entre escalas exige uma cautela metodológica. A distância de Aitchison cresce com o número de partes da composição, de modo que valores obtidos sobre dez categorias não podem ser confrontados com valores obtidos sobre quatro macrogrupos. Para isolar o efeito da agregação, a comparação foi conduzida sob dimensão constante. Tomou-se a subcomposição interna dos recicláveis secos formada por Papel/Papelão, Plásticos e Multicamadas, únicas frações do macrogrupo registradas em todos os protocolos, uma vez que Metais e Vidros não foram capturados pelo protocolo ABNT. Essa subcomposição foi contrastada com a composição obtida pela amalgamação das três partes em uma única, ao lado de Orgânicos e Rejeitos sanitários. Ambas as composições têm três partes.

A amalgamação reduziu todas as distâncias (Figura 3). O par Método Geral e protocolo ABNT passou de 0,538 para 0,241; o par Método Geral e protocolo ASTM passou de 1,337 para 0,961; e o par entre os dois protocolos normativos passou de 1,851 para 0,722. A redução variou de 1,4 a 2,6 vezes, com o maior efeito justamente no par mais divergente.

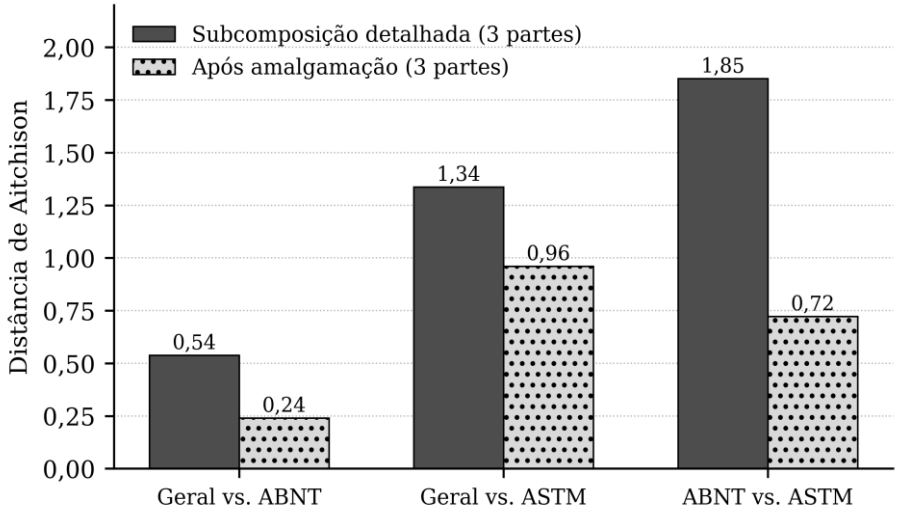


Figura 3 - Efeito da amalgamação sobre a distância composicional entre protocolos, sob dimensão constante de três partes.

Nota: a subcomposição detalhada é formada por Papel/Papelão, Plásticos e Multicamadas; a composição amalgamada reúne essas três frações em uma única parte, contrastada com Orgânicos e Rejeitos sanitários. Fonte: Dados da pesquisa (2025); elaboração própria (2026).

O resultado tem consequência direta para a prática. A agregação de microcategorias em macrogrupos funcionais não elimina a divergência entre protocolos: apenas a torna invisível. A composição interna dos recicláveis secos ilustra o ponto. No Método Geral, Papel/Papelão representa 42,09% dessa fração; no protocolo ABNT, 36,11%; e no protocolo ASTM, 68,28%. A amalgamação converte três perfis internos distintos em um único número, que passa a variar apenas de 16,52% a 28,92% da composição de três partes. Concluir que os protocolos são equivalentes na escala macroscópica confunde uma propriedade da métrica com uma propriedade do protocolo. A adequação aparente decorre da agregação, e não da qualidade da amostragem.

O ponto merece registro porque o encaminhamento habitual em estudos de caracterização é oposto. A concordância observada em macrogrupos é frequentemente tomada como validação do procedimento amostral para fins de dimensionamento. Os dados aqui obtidos não sustentam essa leitura. Se a decisão de gestão depender da composição interna de um macrogrupo, e o dimensionamento de unidades de triagem depende, a concordância na escala agregada não oferece garantia alguma.

6.5.4 Limites da atribuição das divergências à homogeneização

A atribuição das divergências à homogeneização mecânica não encontra apoio nos dados deste estudo. Os dois protocolos normativos empregam homogeneização; o Método Geral não a emprega. Sob a hipótese de um viés induzido por essa operação, ambos deveriam

divergir do controle no mesmo sentido e apresentar entre si divergência menor do que a observada contra o controle. O padrão é o inverso, tanto nas distâncias quanto no comportamento da fração que mais se desloca (Figura 2).

A razão Papel/Papelão sobre os Orgânicos permaneceu praticamente inalterada no protocolo ABNT em relação ao Método Geral, com variação multiplicativa de 0,96. No protocolo ASTM, a mesma razão aumentou 2,97 vezes. Um protocolo que homogeneíza reproduziu o controle; o outro, que também homogeneíza, afastou-se dele por um fator de três. A homogeneização, presente em ambos, não discrimina os dois resultados nesta fração e, portanto, não explica a divergência que os separa. O mesmo se aplica à redistribuição de umidade entre frações durante o revolvimento, mecanismo compatível com a superestimativa de frações secas: sob essa hipótese, o efeito deveria manifestar-se nos dois protocolos com magnitude semelhante, e não em apenas um deles.

O conjunto das demais frações não resolve a questão em nenhuma das duas direções. Plásticos deslocaram-se no mesmo sentido sob os dois protocolos normativos, com variação de 1,12 e 1,09, o que é compatível com incorporação de massa à fração durante o preparo; a magnitude, contudo, é da ordem da variabilidade que se espera entre dias de coleta, e um delineamento com uma campanha por protocolo não a distingue dela. Multicamadas variaram em sentidos opostos, com 1,99 no protocolo ABNT e 0,45 no protocolo ASTM. Metais e Perigosos não foram detectados no protocolo ABNT e reduziram-se no protocolo ASTM, comportamento esperado sob perda de detecção e não sob deslocamento de massa entre frações. O quadro é, portanto, de indeterminação: nenhuma fração isolada sustenta a atribuição, e nenhuma a exclui.

Duas explicações concorrentes permanecem para a superestimativa de Papel/Papelão no protocolo ASTM, e o delineamento não permite discriminá-las. A primeira é a variabilidade da geração no dia 27 de maio, data em que o registro de campo documenta obras de reparo predial e o consequente aporte de inertes. A segunda é uma característica específica do procedimento de zoneamento em pilha cônica, no qual materiais leves e de alta área superficial tendem a migrar para a superfície do cone e a ser sobreamostrados na coleta do topo. A segunda explicação é fisicamente plausível e não é contrariada pelos dados. A discriminação entre as duas exige que os protocolos sejam aplicados a uma mesma massa, em campanhas pareadas com replicação, delineamento no qual o dia de coleta passa a bloco e deixa de competir com o protocolo pela explicação da variância.

6.5.5 Limitações do delineamento

Cada protocolo foi aplicado em uma única campanha, em dia distinto. Protocolo e dia são, portanto, inseparáveis: qualquer divergência observada admite as duas leituras. A restrição decorre da natureza do objeto, uma vez que a massa de um dia, triada integralmente, não pode ser submetida a um segundo protocolo. A superação exige delineamento pareado, com partição de uma mesma massa entre protocolos e replicação, o que constitui o desdobramento imediato desta pesquisa.

A ausência de repetição impede a estimação de variância e exclui qualquer procedimento inferencial. Nenhum valor de p é reportado, e nenhuma diferença é declarada significativa. Duas ordens de resultado, contudo, resistem a essa restrição. A perda de categorias sob redução amostral é atribuível ao protocolo por construção, porque a redução da massa triada é o que a norma prescreve, e não uma propriedade do dia. O efeito da amalgamação é uma propriedade algébrica das composições, verificável sobre qualquer conjunto de dados fechados, e independe do delineamento amostral.

A supressão da coleta multidiária prevista pela ASTM D5231-92 restringe a comparação ao procedimento de redução amostral da norma, e não à norma em sua integralidade. Sembiring, Ramadan e Farid (2026) demonstram que a duração da coleta influencia diretamente a robustez das estimativas de geração e composição, o que reforça a delimitação. A variabilidade da geração escolar agrava a restrição: o número de usuários presentes oscila diariamente, e a centralização do preparo de refeições concentra a geração orgânica em poucos horários, condição documentada em instituições de ensino brasileiras por Bandeira *et al.* (2025) e Pereira *et al.* (2025) e observada em campi universitários por Singh *et al.* (2022). Diferentemente de sistemas domiciliares, cuja população geradora é mais estável, o ambiente escolar apresenta forte variabilidade de curto prazo, o que reduz a generalização de campanhas pontuais.

A substituição multiplicativa dos zeros de arredondamento introduziu uma dependência do limite de detecção adotado. A verificação de sensibilidade mostrou que as distâncias que envolvem o protocolo ABNT, único a apresentar zeros e, portanto, a exigir imputação, variaram com o parâmetro adotado, ao passo que as distâncias entre o Método Geral e o protocolo ASTM, que não contêm zeros e dispensaram imputação, permaneceram constantes. Por essa razão, as conclusões deste estudo apoiam-se em subcomposições sem zeros, e os resultados obtidos sobre a composição completa cumprem função ilustrativa.

6.6 CONCLUSÃO

Quanto ao primeiro objetivo, a massa efetivamente triada governou o poder de detecção das categorias. A redução amostral prescrita pela ABNT NBR 10.007:2004 converteu frações raras em ausências aparentes e amplificou a participação relativa da categoria residual, o que compromete o uso do protocolo sempre que a decisão de gestão depender de categorias de baixa massa, como metais recuperáveis ou resíduos de manejo diferenciado.

As razões entre as frações majoritárias, por outro lado, resistiram à mudança de protocolo. Para estimar a participação da fração orgânica biodegradável e dimensionar rotas de compostagem, os três protocolos produziram informações equivalentes.

A escala de agregação alterou a leitura do resultado. A amalgamação em macrogrupos funcionais reduziu as distâncias composicionais entre os protocolos sob dimensão constante, mas a concordância observada na escala agregada não validou o protocolo amostral, apenas ocultou a divergência interna. Estudos de caracterização que reportem somente macrogrupos funcionais não fornecem base para avaliar a fidedignidade do procedimento adotado.

Quanto ao segundo objetivo, os dados não sustentaram a atribuição das divergências à homogeneização mecânica. Os dois procedimentos que a empregam divergiram entre si mais do que qualquer um deles em relação ao controle sem homogeneização. O resultado não refuta a existência de um viés associado à homogeneização: estabelece que delineamentos em que protocolo e dia de coleta permaneçam confundidos, prática corrente na literatura de caracterização, não têm como testá-la. A verificação dessa hipótese exige delineamento pareado, adotado no capítulo seguinte.

Por fim, dados de composição gravimétrica são dados fechados, e o tratamento destes por estatística clássica produz medidas sem interpretação válida. A adoção de coordenadas de razão logarítmica é condição para que comparações entre protocolos de caracterização de RSU sejam interpretáveis.

6.7 REFERÊNCIAS

ADENIRAN, A. E.; NUBI, A. T.; ADELOPO, A. O. Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. Waste Management, v. 67, p. 3-10, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.002

AITCHISON, J. The statistical analysis of compositional data. London: Chapman and Hall, 1986. 416 p. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4109-0

ALEISA, E.; AL-JARALLAH, R. Characterization of municipal solid waste in Kuwait: sector-specific composition analysis and implications. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 74, n. 9, p. 623-638, 2024. https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2378102

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 21 p.

ASTM INTERNATIONAL. **D5231-92(2016)**: standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

BANDEIRA, J. B.; SOUSA, J. A.; BASTOS, A. T.; MEDEIROS, C. R. R. Gestão de resíduos sólidos em escola pública do Brasil: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 12, n. 30, p. 325-345, 2025. https://doi.org/10.21438/rbgas(2025)123022

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 jun. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 20 jun. 2026.

EDJABOU, M. E.; JENSEN, M. B.; GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; PETERSEN, C.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Municipal solid waste composition: sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. **Waste Management**, v. 36, p. 12-23, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.009

EDJABOU, M. E.; MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Statistical analysis of solid waste composition data: arithmetic mean, standard deviation and correlation coefficients. **Waste Management**, v. 69, p. 13-23, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.036

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V.; MATEU-FIGUERAS, G.; BARCELÓ-VIDAL, C. Isometric logratio transformations for compositional data analysis. **Mathematical Geology**, v. 35, n. 3, p. 279-300, 2003. https://doi.org/10.1023/B:MATG.0000030270.14499.f6

GALLARDO, A.; EDO-ALCÓN, N.; CARLOS, M.; RENAU, M. The determination of waste generation and composition as an essential tool to improve the waste management plan of a university. **Waste Management**, v. 53, p. 3-11, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.015

MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A.; BARCELÓ-VIDAL, C.; PAWLOWSKY-GLAHN, V. Dealing with zeros and missing values in compositional data sets using nonparametric imputation. **Mathematical Geology**, v. 35, n. 3, p. 253-278, 2003. https://doi.org/10.1023/A:1023866030544

PEREIRA, E. A. A.; SOARES, J. K. N. C.; PEREIRA, E. V.; GUEDES, C. S.; CANDEIA, A. L.; SILVA, J. M. D.; COSTA, J. G. N.; FERREIRA, E. S. A. Caracterização de resíduos sólidos em escola pública de Patos, PB. Revista Caderno Pedagógico, v. 22, n. 9, e14347, 2025. https://doi.org/10.54033/cadpedv22n9-347

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 20 jun. 2026.

SEMBIRING, E.; RAMADAN, A. H.; FARID, M. Implications of shorter sampling durations on the analysis of municipal solid waste generation and composition. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 28, n. 1, p. 133-140, 2026. https://doi.org/10.1007/s10163-025-02401-6

SINGH, K.; LOHCHAB, R. K.; DHULL, P.; KUMARI, P.; CHOUDHARY, V.; BALA, J. Solid wastes generation at various zones of universities campus: characterisation and its management approaches. Pollution Research, v. 41, n. 2, p. 557-568, 2022. https://doi.org/10.53550/pr.2022.v41i02.024

7 CAPÍTULO III - TRANSFERÊNCIA HÍDRICA DIRECIONAL INDUZIDA PELA HOMOGENEIZAÇÃO NORMATIZADA NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

7.1 RESUMO

A caracterização gravimétrica é a principal ferramenta de diagnóstico da composição de resíduos sólidos urbanos (RSU) e subsidia decisões de planejamento, dimensionamento de infraestrutura e avaliação do potencial de reciclagem. As normas mais usadas nessa caracterização, a ABNT NBR 10.007/2004 e a ASTM D5231, exigem homogeneização mecânica da amostra antes do quarteamento, etapa geralmente tratada como neutra para as propriedades dos materiais. Esta pesquisa foi realizada objetivando-se avaliar se essa homogeneização, isolada da redução de massa da amostra, redistribui umidade entre as frações dos resíduos. Adotou-se em delineamento pareado três métodos aplicados ao mesmo lote de resíduos: uma referência sem homogeneização, que processa a massa integral; a ABNT, homogeneização com posterior quarteamento; e uma adaptação da ASTM, que preserva a massa integral e aplica apenas a homogeneização. A composição foi analisada por PERMANOVA sobre dissimilaridade de Bray-Curtis e por ANOVA em blocos; o teor de umidade de cada fração foi determinado por secagem a 110 °C até massa constante. A estrutura macroscópica da composição não diferiu de forma perceptível entre os métodos. Controlada a variação entre coletas, o método passou a explicar parcela significativa da variação composicional ($R^2 = 0,076$; $p = 0,015$). A umidade, por sua vez, dependeu fortemente do método ($R^2 = 0,864$; $p < 0,001$), sem alteração da massa hídrica total da amostra ($p = 0,530$), o que indica redistribuição interna de água entre frações (efeito esponja). Plásticos e papel/papelão, originalmente secos, absorveram de 21 a 27 pontos percentuais de umidade sob os protocolos normativos. A partir desses ganhos, foram propostos fatores de correção por fração e método, validados por regressão linear (R^2 de até 0,884). Os resultados indicam que dados gravimétricos obtidos por protocolos normativos, sem correção, superestimam a massa de recicláveis secos, o que justifica ajustes nos procedimentos de preparo de amostra.

Palavras-chave: efeito esponja; teor de umidade; lixiviado; fator de correção; viés metodológico.

Directional moisture transfer induced by standardized homogenization in the gravimetric characterization of municipal solid waste

7.2 ABSTRACT

Gravimetric characterization is the main diagnostic tool for the composition of municipal solid waste (MSW) and underpins planning decisions, infrastructure sizing, and recycling-potential assessment. The standards most commonly used for this characterization, ABNT NBR 10.007/2004 and ASTM D5231, require mechanical homogenization of the sample before quartering, a step usually treated as neutral with respect to material properties. This study assessed whether such homogenization, isolated from sample mass reduction, redistributes moisture among waste fractions. A paired design was adopted, with three methods applied to the same waste batch: a reference without homogenization, which processes the full mass; the ABNT method, homogenization followed by quartering; and an ASTM adaptation, which preserves the full mass and applies only homogenization. Composition was analyzed by PERMANOVA on Bray-Curtis dissimilarity and by blocked ANOVA; the moisture content of each fraction was determined by oven-drying at 110 °C to constant mass. The macroscopic structure of composition did not differ perceptibly across methods. Once between-campaign variation was controlled, method explained a significant share of compositional variation (R^2 = 0.076; $p = 0.015$). Moisture, in turn, depended strongly on method ($R^2 = 0.864$; $p < 0.001$), with no change in the sample's total water mass ($p = 0.530$), indicating internal water redistribution among fractions (sponge effect). Originally dry plastics and paper/cardboard absorbed 21 to 27 percentage points of moisture under the standardized protocols. Based on these gains, fraction- and method-specific correction factors were proposed and validated by linear regression (R^2 up to 0.884). The results indicate that uncorrected gravimetric data obtained under standardized protocols overestimate the mass of dry recyclables, which justifies adjustments to sample-preparation procedures.

Keywords: sponge effect; moisture content; leachate; correction factor; methodological bias.

7.3 INTRODUÇÃO

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) orienta o planejamento de sistemas de gestão, o dimensionamento de unidades de triagem e tratamento e a avaliação do potencial de recuperação de materiais recicláveis (Kaza *et al.*, 2018; Alfaia *et al.*, 2017). No Brasil, a capacidade técnica de muitos municípios para conduzir esse diagnóstico é limitada (Marino *et al.*, 2018), o que torna a fidelidade dos protocolos de caracterização um requisito prático, não apenas metodológico.

Obter uma amostra representativa de um material heterogêneo como os RSU envolve um problema de amostragem conhecido. A teoria da amostragem de Gy (Pitard, 1993) e sua aplicação a estudos ambientais (Gerlach *et al.*, 2002) mostraram que operações de partição, como o quarteamento manual, introduzem erro amostral mensurável, independentemente das propriedades físicas dos materiais. Diversos autores propuseram protocolos e planos de subamostragem voltados à representatividade (Dahlén; Lagerkvist, 2008; Sahimaa *et al.*, 2015; Wasserman *et al.*, 2022; Gerassimidou; Velis; Komilis, 2020), e a área passou a exigir quantificação e controle estatístico da incerteza em estudos de resíduos (Esbensen; Velis, 2016). Quanto ao tratamento dos dados, Edjabou *et al.* (2015, 2017) demonstraram que os percentuais de composição são dados composicionais, presos a um total fixo de 100%, e exigem métodos estatísticos compatíveis com essa restrição.

As duas normas de referência, a brasileira ABNT NBR 10.007 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) e a norte-americana ASTM D5231 (ASTM International, 2016; Waskow, 2015), preveem homogeneização mecânica da amostra, por revolvimento ou tombamento, antes da determinação da composição, geralmente seguida de quarteamento. Essa etapa costuma ser descrita apenas como meio de obter representatividade, sem que se investiguem seus efeitos sobre as propriedades dos materiais. A mesma premissa aparece em estudos recentes: Silva Martínez *et al.* (2024), no nordeste do México, e Mota e Silva (2024), no Amazonas, homogeneízam a amostra sem avaliar se o procedimento altera a distribuição de umidade entre os componentes.

Há evidência de que a fração orgânica biodegradável dos RSU perde umidade para materiais mais secos quando permanecem em contato físico. Magrinho e Semião (2008) modelaram a absorção de líquidos de resíduos de cozinha pelo papel, com teores de 35% a 45%, e a adesão superficial em plásticos, de 20% a 30%. Götze et al. (2016), comparando coleta mista e segregada na Dinamarca, registraram maior umidade em papel e plástico no fluxo misto; Singhal et al. (2021) relataram que a umidade da fração orgânica compromete a separação das

demais frações. Em todos esses casos, a mistura é uma propriedade do sistema de coleta, resultante do contato entre resíduos ao longo do dia ou dias, e não do procedimento de amostragem em laboratório.

Não se identificou, na literatura, um desenho experimental que isole o efeito da homogeneização normativa, aplicada a uma amostra já coletada, do efeito da redução de massa associada ao quarteamento. Essa ausência foi sistematizada na revisão integrativa que compõe o primeiro capítulo desta tese, que mapeou a literatura de caracterização e amostragem de RSU e delimitou a lacuna aqui enfrentada. Assim, este estudo investiga essa lacuna: avalia se a homogeneização mecânica normativa redistribui umidade entre as frações do RSU, quantifica essa transferência e propõe um fator de correção para os resultados gravimétricos. A hipótese de trabalho é que a homogeneização desloca água da matriz úmida da amostra, sobretudo da fração orgânica biodegradável, para os recicláveis secos, inflando a massa aparente destes últimos, fenômeno aqui denominado efeito esponja.

7.4 MATERIAL E MÉTODOS

7.4.1 Área de estudo e coleta dos resíduos

O estudo foi realizado no Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica (CIEB), em Eunápolis, Bahia (Figura 4), instituição de ensino de tempo integral que atende cerca de 1.140 pessoas por dia, com alimentação escolar em múltiplos turnos. Esse perfil resulta em geração com predomínio da fração orgânica biodegradável. A caracterização de RSU em instituições de ensino com essas características é um subcampo estabelecido na literatura (Gallardo et al., 2016; Adeniran et al., 2017; Ugwu et al., 2020).

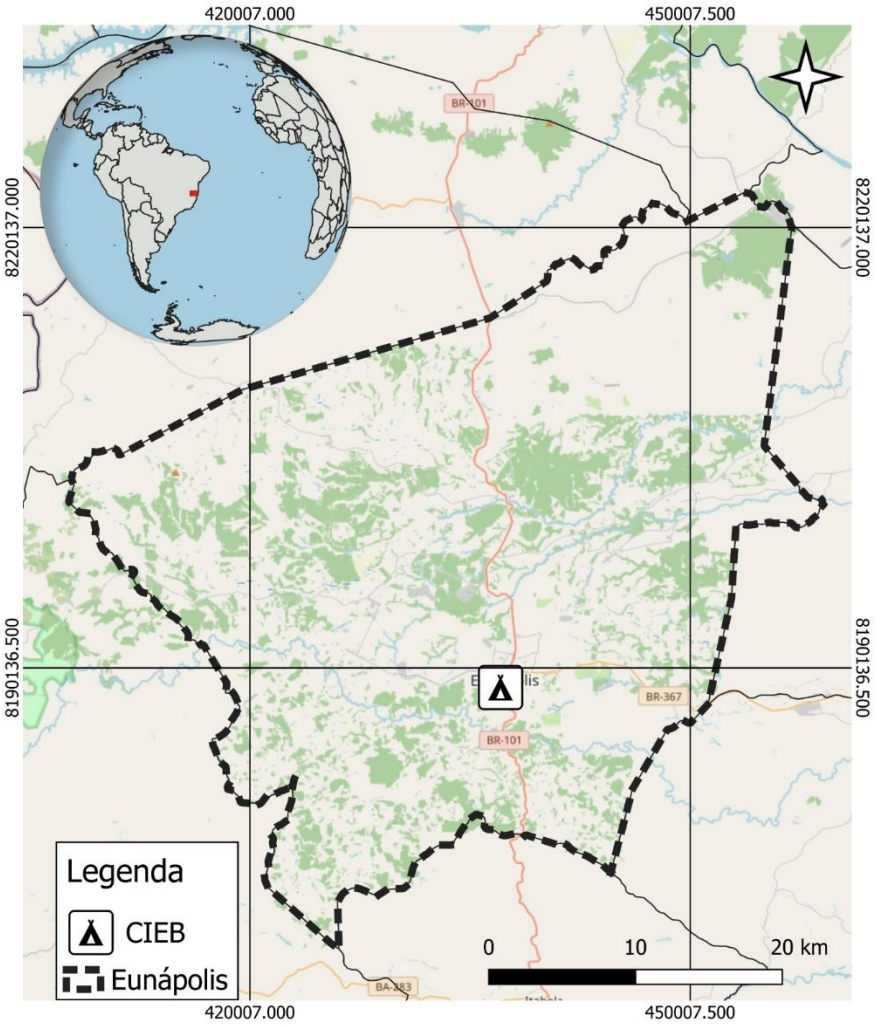


Figura 4 – Localização do município de Eunápolis, Bahia, e do Complexo Integrado de Educação Básica, Profissional e Tecnológica (CIEB).

Fonte: Elaboração própria (2026).

A caracterização baseou-se em quatro campanhas pareadas, realizadas em 31 de março e em 3, 8 e 10 de abril de 2026. Por se tratar de uma única unidade geradora, coletou-se a totalidade dos resíduos gerados em cada campanha, sem descarte ou seleção de amostras. As amostras foram acondicionadas em sacos impermeáveis logo após a coleta e processadas em área coberta e impermeabilizada, de modo a atribuir eventuais diferenças de umidade entre métodos ao estresse mecânico, e não a fatores climáticos externos.

7.4.2 Delineamento experimental e métodos comparados

O delineamento aplicou os três métodos ao mesmo lote de resíduos, no mesmo dia, o que permitiu separar estatisticamente o efeito da homogeneização mecânica do efeito da redução de massa da amostra. A Referência Geral, tomada como controle, caracterizou a massa integral coletada, sem revolvimento, quarteamento ou homogeneização. A ABNT NBR

10.007/2004 aplica homogeneização por revolvimento, seguida de quarteamento sucessivo até aproximadamente um quarto da massa (24 kg a 27 kg por campanha). A ASTM D5231, adaptada, aplica homogeneização por tombamento e preserva a massa integral (91 kg a 101 kg por campanha), sem redução por quarteamento. A Figura 5 sintetiza o delineamento experimental, desde a coleta pareada até a derivação dos fatores de correção.

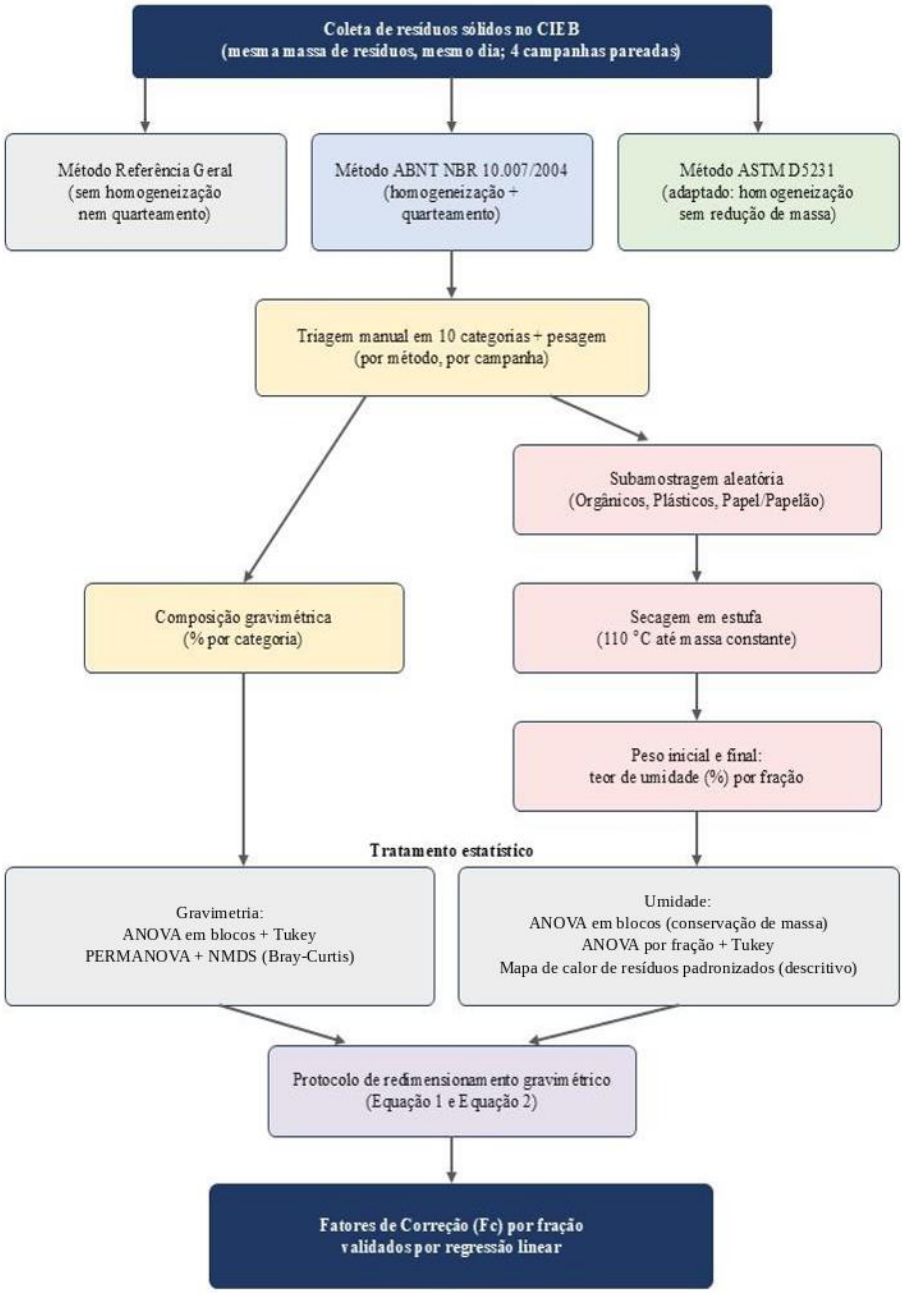


Figura 5 - Fluxograma do delineamento experimental do estudo do efeito esponja, das campanhas pareadas de coleta à derivação dos fatores de correção.

Fonte: Autoria própria (2026).

Essa configuração permite atribuir eventuais efeitos à mistura mecânica: a Referência Geral e a ASTM processam massas equivalentes e diferem apenas quanto à homogeneização;

a ABNT combina homogeneização e redução de massa. A adaptação da ASTM, ao preservar a massa integral e aplicar somente o tombamento, funciona como o controle que isola o efeito da mistura do efeito da redução do volume amostral. Esse contraste é a razão do delineamento: sem uma condição que homogeneíze sem reduzir massa, o efeito da mistura ficaria confundido com o efeito do quarteamento, e não seria possível atribuir a redistribuição de umidade a uma ou a outra operação. A comparação entre a Referência Geral e a ASTM adaptada, que processam massas equivalentes, mede o efeito isolado da homogeneização; a comparação de ambas com a ABNT, que reduz a massa, mede o efeito adicional do quarteamento.

7.4.3 Determinação do teor de umidade

Em cada campanha e por cada método, subamostras das frações orgânica biodegradável, plástica e de papel/papelão foram pesadas e secas em estufa de secagem com circulação forçada de ar, a 110 °C, até massa constante, condição verificada pela ausência de perda de massa em pesagens sucessivas. O teor de umidade corresponde à redução percentual de massa após a secagem. Essas três frações foram selecionadas por concentrarem o fenômeno investigado: a orgânica biodegradável é a matriz doadora de água, de maior teor de umidade nativo, e plásticos e papel/papelão são as frações secas de maior capacidade de absorção, apontadas na literatura como receptoras preferenciais em fluxos de resíduos úmidos (Magrinho; Semião, 2008; Götze et al., 2016).

Cabe explicitar o estatuto da temperatura adotada. Não há, entre as normas vigentes, método específico para a determinação do teor de umidade de RSU: a ASTM D5231, que rege a caracterização gravimétrica aqui comparada, trata apenas da triagem manual e da determinação da composição, sem prescrever procedimento de secagem, e a ABNT NBR 10.007:2004 tampouco o faz. O valor de 110 °C corresponde, portanto, a uma adaptação metodológica, apoiada na faixa de 105 °C a 110 °C estabelecida para a determinação de umidade em materiais heterogêneos pela ABNT NBR 6457 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016) e pela ASTM D2216 (ASTM International, 2019), e próxima dos 105 °C adotados pela ISO 18134-1 (International Organization for Standardization, 2022) para biocombustíveis sólidos, família normativa mais próxima da matriz orgânica aqui analisada.

A escolha da temperatura não compromete a inferência do estudo, e a razão é de delineamento. As subamostras dos três métodos de uma mesma campanha foram secas nas mesmas condições, na mesma estufa e no mesmo ciclo, de modo que eventual volatilização de compostos orgânicos leves a essa temperatura é comum aos três métodos e se cancela no

contraste entre eles, que é a medida de interesse. O que a temperatura adotada pode afetar é o valor absoluto do teor de umidade de cada fração, e não a diferença entre métodos, sobre a qual se apoiam os fatores de correção. A replicação a 105 °C, para verificar a estabilidade dos valores absolutos, integra a agenda de validação apresentada ao final deste capítulo.

7.4.4 Protocolo de redimensionamento gravimétrico (fator de correção)

A constatação de que a homogeneização altera a distribuição de umidade motivou um procedimento de correção fundamentado na conservação da massa seca: admite-se que a matéria sólida das categorias não migra durante a homogeneização, apenas o lixiviado. A massa úmida corrigida é obtida devolvendo à massa seca a proporção de umidade que o material possuía em seu estado nativo, conforme a Equação 4:

$$M_{\text{corrigida}} = M_{\text{aparente}} \times \left(\frac{100 - U_{\text{medida}}}{100 - U_{\text{nativa}}}\right) \qquad \text{(eq.4)}$$

Em que:

M_aparente é a massa da fração lida após o procedimento normativo, U_medida é o teor de umidade aferido após esse procedimento e U_nativa é o teor de umidade da categoria obtido pela Referência Geral. Isolando a relação entre as umidades, define-se um fator de correção empírico, Fc, conforme a Equação 5:

$$M_{\text{corrigida}} = M_{\text{aparente}} \times F_c \qquad \text{(eq.5)}$$

Valores de Fc menores que 1 indicam massa superestimada por absorção de água; valores maiores que 1 indicam massa subestimada por perda relativa de umidade.

7.4.5 Análise estatística

As análises foram conduzidas em R, versão 4.4.1 (R Core Team, 2024), com o pacote *tidyverse*, sobre as quatro campanhas pareadas. Por se tratar de dados composicionais, em que as frações somam cem por cento e não são independentes entre si, a inferência sobre o efeito do método foi reservada à análise multivariada, que compara perfis composicionais inteiros sem assumir independência entre as frações; a semelhança entre os perfis médios foi examinada apenas de forma exploratória. A dissimilaridade de Bray-Curtis foi escolhida por ser adequada a matrizes de proporções e por não exigir a normalidade que os testes paramétricos univariados pressupõem. A PERMANOVA testa se os perfis composicionais médios diferem entre os níveis do fator, particionando a soma de dissimilaridades entre e dentro dos grupos; o R^2 por ela

reportado é a fração dessa dissimilaridade total atribuível ao fator, e não uma medida de efeito causal. O NMDS, por sua vez, é um recurso descritivo de ordenação, cuja única leitura válida é a proximidade relativa entre amostras no espaço reduzido, sem interpretação métrica dos eixos.

A Coleta foi tratada como bloco porque a variação entre campanhas, associada a diferenças reais de geração de um dia para outro, é uma fonte de heterogeneidade que precisa ser controlada para que o efeito do método não seja mascarado por ela. A composição foi testada por PERMANOVA sobre dissimilaridade de Bray-Curtis (Anderson, 2001; Bray; Curtis, 1957), com 9.999 permutações, e visualizada por escalonamento multidimensional não métrico, NMDS (Kruskal, 1964); os fatores Método e Coleta, esta última tratada como bloco, compuseram o modelo. Diferenças por categoria foram avaliadas por ANOVA em blocos casualizados, com Método como efeito fixo e Coleta como bloco, seguida do teste de Tukey (Tukey, 1949). O efeito do método sobre a umidade de cada fração foi quantificado por regressão linear, com a Referência Geral como categoria de referência. A direção da migração hídrica foi descrita, sem finalidade inferencial, por um mapa de calor de resíduos padronizados. Os gráficos foram produzidos com o pacote *ggplot2* (Wickham, 2016).

A distância de Bray-Curtis foi adotada por sua aplicação estabelecida em estudos de composição de RSU (Edjabou *et al.*, 2015, 2017). Análise de sensibilidade com a distância de Aitchison, métrica composicionalmente correta para dados em razão logarítmica, produziu coeficiente de determinação similar para o fator Campanha ($R^2 = 0{,}690$) e confirmou a predominância do efeito de campanha sobre o efeito de método, com este último sem significância estatística ($p = 0{,}289$). A composição gravimétrica em massa revelou-se instrumento insensível ao efeito esponja, independentemente da métrica adotada.

A escolha desse conjunto de procedimentos foi feita em contraste com alternativas capazes de responder à mesma pergunta sob pressupostos distintos. A análise de variância multivariada paramétrica (MANOVA) exigiria normalidade multivariada e um número de observações superior ao de variáveis, condição não atendida por doze observações e dez categorias. A ANOVA e o teste de Kruskal-Wallis, aplicados diretamente a cada percentual como base inferencial principal, violariam a restrição de soma constante dos dados composicionais (Edjabou et al., 2017). O ANOSIM, embora também livre de distribuição, não particiona a variação por fator nem acomoda o bloco de campanha, o que impediria separar o efeito do método do efeito da coleta. A análise sobre coordenadas de razão logarítmica isométrica é composicionalmente correta, mas exige a imputação dos zeros de arredondamento, procedimento cuja dependência do limite de detecção adotado foi documentada no capítulo

anterior desta tese. A PERMANOVA, por não assumir distribuição, admitir o delineamento em blocos e reportar a partição da variação por fator, reúne as propriedades exigidas pelo delineamento pareado aqui empregado, e a convergência com a análise de sensibilidade conduzida sob a distância de Aitchison sustenta a leitura adotada. Registre-se, por fim, que a restrição composicional não se aplica ao teor de umidade: por ser uma razão entre a massa de água e a massa úmida de cada fração, medida de forma independente em cada uma delas, a umidade não está sujeita à soma constante, o que torna a ANOVA em blocos e a regressão linear procedimentos adequados ao achado central deste capítulo.

7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.5.1 Estrutura macroscópica da composição

Os três métodos preservaram a hierarquia da composição, com predomínio de orgânicos biodegradáveis, seguidos de papel/papelão, plásticos e rejeitos sanitários (Tabela 4; Figura 6), nas quais essa categoria é designada apenas por Orgânicos, por limitação de espaço. Os perfis médios foram semelhantes entre métodos, sem categorias com desvio expressivo em relação ao padrão geral. A avaliação formal do efeito do método sobre a composição, apropriada a dados composicionais, é apresentada na seção seguinte, pela análise multivariada.

Tabela 4 – Composição gravimétrica média (%) por método de amostragem.

Categoria	Referência Geral	ABNT	ASTM
Orgânicos	60,67	57,19	57,63
Papel/Papelão	10,28	11,60	11,34
Plásticos	9,55	11,12	10,51
Rejeitos Sanitários	8,37	9,62	9,05
Outros	4,59	5,19	4,75
Multicamadas	2,48	2,11	2,62
Vidros	2,01	1,39	2,06
Inertes	1,00	0,84	0,97
Metais	0,80	0,85	0,81
Perigosos	0,21	0,04	0,21

Fonte: Autoria própria (2026).

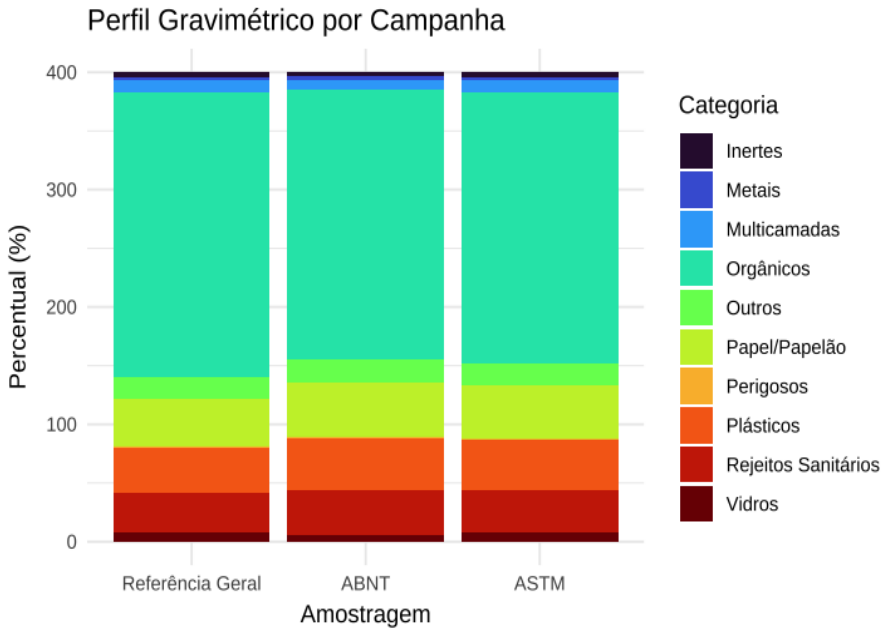


Figura 6 – Perfil gravimétrico médio (%) por método de amostragem.

Fonte: Autoria própria (2026).

7.5.2 Efeito do método na estrutura composicional

A análise multivariada indicou o que a inspeção macroscópica não capta. A variação entre coletas foi a principal fonte de heterogeneidade da composição ($R^2 = 0{,}859$; $F = 26{,}22$; $p < 0{,}001$). Controlado esse efeito, o método explicou parcela significativa, ainda que discreta, da variação composicional ($R^2 = 0{,}076$; $F = 3{,}48$; $p = 0{,}015$); analisado isoladamente, sem o controle da coleta, o efeito do método não foi significativo. A ordenação por NMDS (*stress* < 0,001) corroborou esse padrão, com sobreposição ampla entre os grupos e leve deslocamento do agrupamento associado à ABNT (Figura 7). Homogeneização e quarteamento, portanto, não reorganizam a estrutura macroscópica da composição, mas produzem deslocamentos discretos e sistemáticos na proporção entre frações. Esse efeito composicional deve ser lido com a cautela que a própria análise de sensibilidade impõe: sob a distância de Aitchison, métrica composicionalmente correta, o efeito do método não alcançou significância estatística ($p = 0{,}289$), o que indica que a composição em massa é instrumento pouco sensível ao fenômeno investigado. A evidência que sustenta o achado central deste capítulo não é composicional, e sim a medida direta do teor de umidade por fração, apresentada nas seções seguintes.

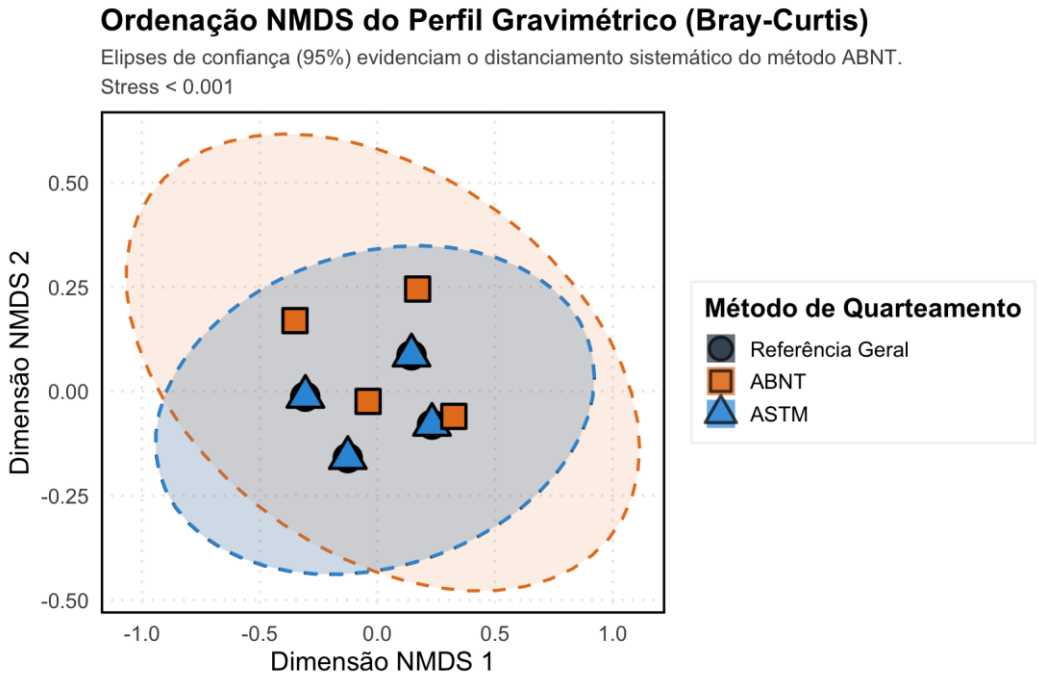


Figura 7 – Ordenação NMDS da composição gravimétrica (dissimilaridade de Bray-Curtis), com elipses de confiança de 95% por método.

Fonte: Autoria própria (2026).

7.5.3 Variação gravimétrica por categoria

As ANOVAs em blocos, com teste de Tukey, identificaram onde esses deslocamentos ocorrem (Tabela 5; Figura 8). Os dois protocolos normativos subestimaram a fração orgânica biodegradável, de 60,67% para valores próximos a 57%, e superestimaram papel/papelão, que ultrapassou 11%. Sob a ABNT, observaram-se ainda subestimação de vidros e superestimação de rejeitos sanitários. O padrão é consistente com transferência de massa induzida no preparo da amostra, e não com diferença real de geração entre métodos, uma vez que o delineamento pareado submete o mesmo lote aos três métodos no mesmo dia.

Tabela 5 – Categorias com diferença significativa na ANOVA em blocos ($p < 0,05$).

Categoria	Comportamento	p (Método)	Comparação (Tukey)
Orgânicos	Subestimada	0,0236	Geral difere de ABNT e ASTM
Papel/Papelão	Superestimada	0,0148	Geral difere de ABNT e ASTM
Vidros	Subestimada (ABNT)	0,0005	ABNT difere de Geral e ASTM
Rejeitos Sanitários	Superestimada (ABNT)	0,0204	ABNT difere de Geral

Fonte: Autoria própria (2026).

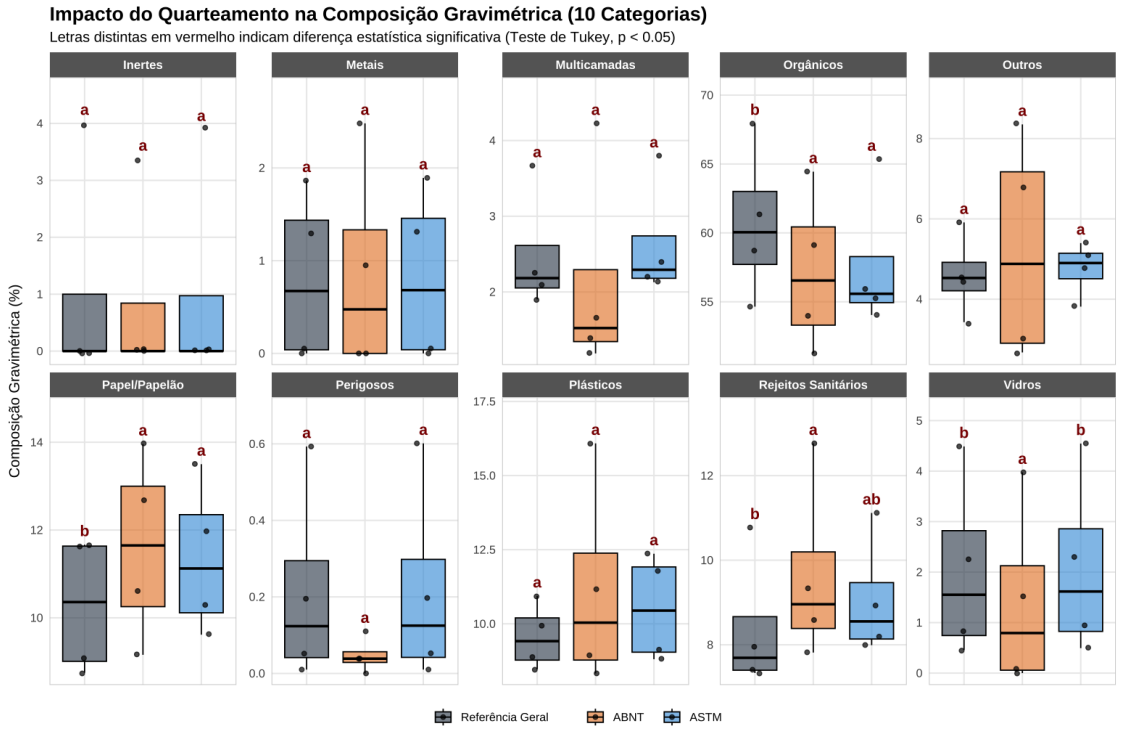


Figura 8 – Composição gravimétrica (%) por categoria e método; letras distintas indicam diferença significativa (Tukey, p < 0,05).

Fonte: Autoria própria (2026).

7.5.4 Transferência de umidade e o efeito esponja

A PERMANOVA aplicada aos dados de umidade revelou padrão distinto do observado para a composição, a variação entre coletas não foi significativa (R^2 = 0,089; p = 0,101), enquanto o método explicou a maior parte da variabilidade (R^2 = 0,864; F = 54,30; p < 0,001). Três resultados sustentam essa leitura (Figura 9). A massa hídrica total da amostra não variou entre métodos (F = 0,71; p = 0,530), embora tenha variado entre coletas (F = 11,18; p = 0,007), o que indica redistribuição interna de água, sem perda ou ganho líquido. A resposta concentrou-se nos recicláveis secos: a fração orgânica biodegradável não variou de forma significativa (F = 0,35; p = 0,718), enquanto plásticos (F = 70,18; p < 0,001) e papel/papelão (F = 76,77; p < 0,001) apresentaram ganhos médios, expressos em pontos percentuais de teor de umidade e sempre em relação à Referência Geral, de 26,6 (ABNT) e 23,6 (ASTM) nos plásticos e de 21,2 e 21,8 no papel/papelão. A leitura direcional que segue é descritiva, apoiada no sinal dos resíduos padronizados, e não constitui teste inferencial da direção da transferência. Os resíduos padronizados de Pearson, representados no mapa de calor (Figura 10), indicam plásticos e papel como receptores, com valores negativos na Referência Geral e positivos após ABNT e ASTM, e a fração orgânica biodegradável em sentido oposto, como reservatório provável de água.

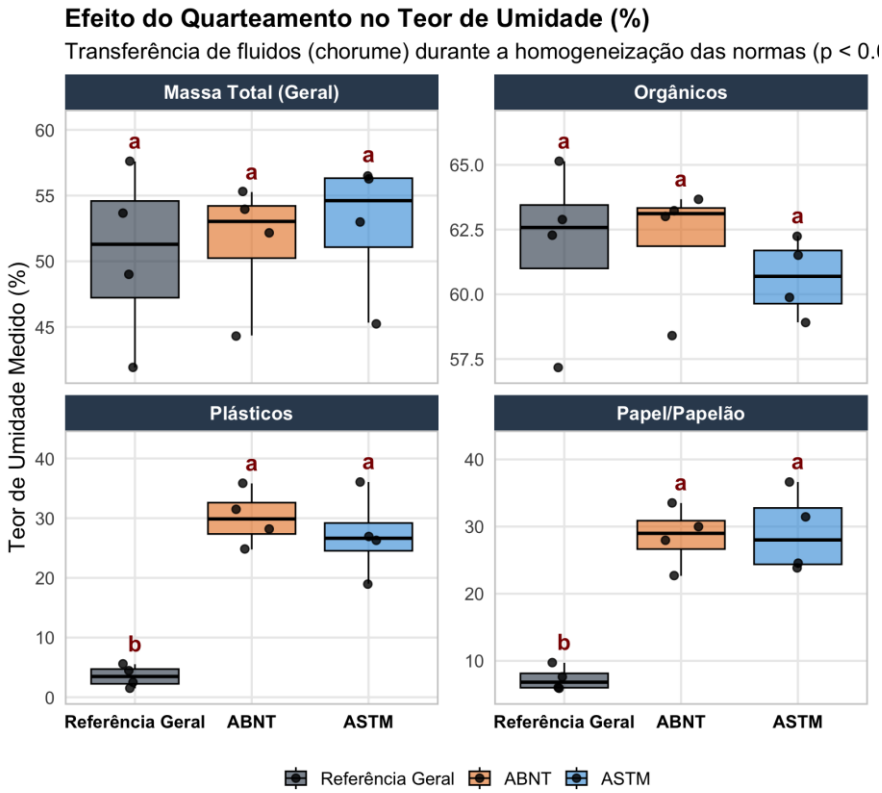


Figura 9 – Teor de umidade médio (%) da massa total e das frações orgânica, plástica e de papel/papelão por método; letras distintas indicam diferença significativa (Tukey, p < 0,001).

Fonte: Autoria própria (2026).

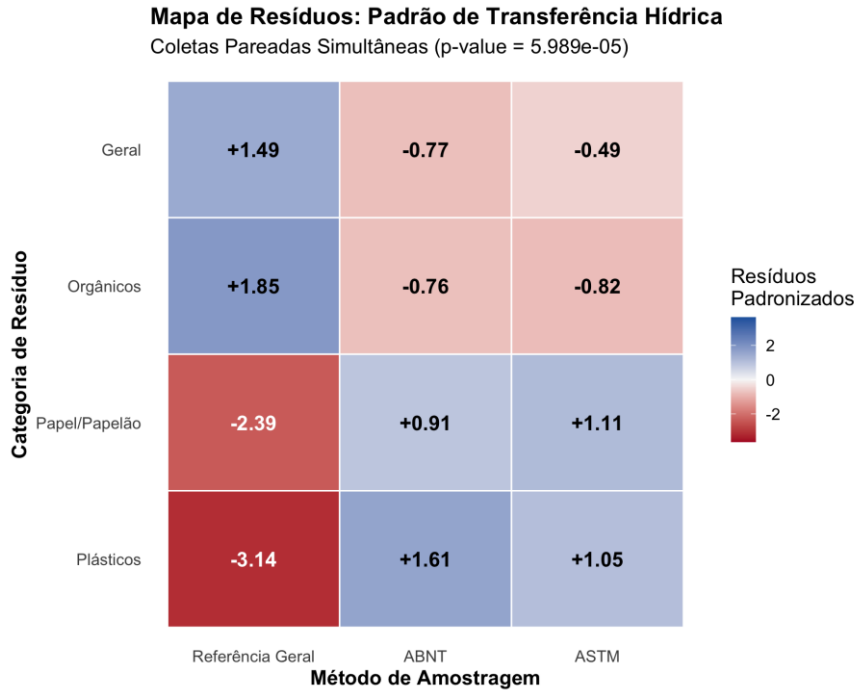


Figura 10 – Mapa de calor dos resíduos padronizados por categoria e método.

Fonte: Autoria própria (2026).

O balanço entre as frações medidas não se fecha por completo, pois o ganho absoluto de água pelos recicláveis secos supera a perda estimada para a fração orgânica biodegradável, considerada isoladamente. Isso indica que a água absorvida provém da matriz úmida da amostra como um todo, incluindo rejeitos sanitários, finos orgânicos e lixiviado livre, e não apenas dos orgânicos biodegradáveis. A caracterização físico-química de frações de RSU mostra que a umidade não se concentra apenas na fração orgânica reconhecível, mas se distribui por rejeitos sanitários, finos e material não triável, todos com teores de água elevados (Götze et al., 2016; Dahlén; Lagerkvist, 2008), o que sustenta a interpretação de que a água transferida tem origem difusa na matriz.

Como o teor de umidade foi medido em três frações, um fechamento completo do balanço não é possível com os dados disponíveis; a conservação da água total permanece sustentada pela ausência de diferença significativa na umidade total entre métodos. O balanço pode ser dimensionado com as próprias medidas de umidade por fração. A fração orgânica manteve teor de umidade praticamente constante entre os métodos, com média de 61,9% na condição nativa, 62,1% sob a ABNT e 60,6% sob a ASTM, variação inferior a 1,5 ponto percentual e estatisticamente não significativa ($F = 0,35$; $p = 0,718$). O exame campanha a campanha reforça essa leitura: enquanto os recicláveis secos ganham umidade de forma sistemática, sempre no mesmo sentido, a fração orgânica oscila em torno de seu teor nativo sem direção definida, ora com pequena redução, ora com pequeno aumento entre as campanhas. Fosse a fração orgânica identificável a fonte principal da água transferida, esperar-se-ia nela uma perda consistente, acompanhando o ganho dos secos, o que não se observa. A ausência de perda direcional na fração orgânica, concomitante ao ganho direcional dos secos, é evidência adicional de que a água transferida tem origem difusa na matriz, e não na fração orgânica reconhecível. Como plásticos e papel/papelão incorporam entre 20 e 27 pontos percentuais de umidade sob os protocolos normativos, o volume de água que essas frações recebem não pode originar-se da fração orgânica identificável, que praticamente não cede água, mas de componentes úmidos não medidos da matriz, como rejeitos sanitários, finos orgânicos e lixiviado livre. O balanço restrito às três frações medidas fica, por isso, estruturalmente aberto do lado dos receptores, e é essa abertura, e não uma inconsistência dos dados, que a origem difusa da água explica.

Cabe registrar que a identificação positiva da fração ou frações doadoras permanece, neste estudo, uma inferência, e não uma medição: o teor de umidade foi determinado apenas nas frações orgânica biodegradável, plástica e de papel/papelão, de modo que rejeitos sanitários, finos e material não triável são apontados como origem provável da água por seu teor de

umidade tipicamente elevado, documentado na literatura, e não por aferição direta nesta pesquisa. A demonstração aqui sustentada é a de que a água incorporada pelos recicláveis secos não provém da fração orgânica biodegradável identificável; a localização precisa da matriz doadora requer a medida de umidade das demais frações úmidas, indicada na agenda de pesquisa. Quanto à conservação da massa hídrica total, a ausência de diferença significativa ($p = 0,530$) é reforçada pela própria pequenez do efeito observado: a variação bruta da umidade total entre métodos situa-se dentro da faixa de flutuação entre campanhas, de modo que o resultado indica um efeito desprezível, e não apenas um teste sem poder para detectá-lo.

A componente hídrica não é, contudo, o único mecanismo pelo qual a homogeneização infla a massa aparente dos recicláveis secos. Observou-se, ao longo das campanhas, a aderência de matéria orgânica sólida à superfície de plásticos e papel/papelão durante o revolvimento, sujidade que permanece agregada ao material após a triagem. Diferentemente da água, essa matéria sólida não é removida pela secagem a 110 °C e, portanto, não é capturada pela determinação do teor de umidade nem corrigida pelos fatores propostos. O mecanismo que este estudo isolou e quantificou é, assim, especificamente hídrico; a aderência de sólidos é um fenômeno concomitante, observado em campo e não quantificado, que atua no mesmo sentido de superestimar a massa dos recicláveis. Disso decorre que os fatores de correção derivados da umidade constituem um limite inferior do viés total de massa: a superestimação real dos recicláveis secos tende a ser maior do que a parcela atribuível apenas à água transferida.

A direção observada é consistente com Magrinho e Semião (2008), Götze *et al.* (2016) e Singhal *et al.* (2021), que descrevem a matriz úmida como origem da água absorvida por materiais secos. A diferença está no estágio em que a mistura ocorre: nos estudos citados, ela decorre do sistema de coleta, ao longo de dias; neste estudo, decorre do próprio procedimento de amostragem, no momento da caracterização. O viés é, portanto, do instrumento de medição, não do resíduo, e por ser sistemático não se reduz com o aumento do número de amostras. No campo dos combustíveis derivados de resíduos, o processamento mecânico já é reconhecido como fator que afeta a preparação de amostras representativas (Gerassimidou; Velis; Komilis, 2020), o que reforça que o efeito aqui documentado não é uma peculiaridade do fluxo de RSU, mas está associado à manipulação mecânica de materiais heterogêneos de forma mais geral.

7.5.5 Fatores de correção e validação por regressão

A partir dos ganhos de umidade, estimaram-se fatores de correção por fração e método (estimados sobre as próprias campanhas que os geraram, o que caracteriza ajuste e verificação de consistência interna, e não validação externa, reservada como agenda futura em razão do

número reduzido de campanhas) (Tabela 6), com valores próximos entre ABNT e ASTM para uma mesma categoria. Os receptores exigiram fatores redutores: nos plásticos, Fc de 0,725 (ABNT) e 0,756 (ASTM), o que indica que cerca de 24% a 28% da massa aparente corresponde a lixiviado absorvido; no papel/papelão, Fc próximo de 0,77 em ambos os protocolos. A fração orgânica biodegradável, matriz doadora, não exigiu fator de correção: sua variação de umidade entre os métodos não foi estatisticamente significativa, coerente com a diluição da perda em sua massa dominante.

Tabela 6 – Fatores de correção gravimétrica (Fc) por fração afetada e método.

Fração	Método	Umidade medida (%)	Umidade nativa (%)	Fc	Comportamento
Plásticos	ABNT	30,1	3,5	0,725	Receptor
Plásticos	ASTM	27,1	3,5	0,756	Receptor
Papel/Papelão	ABNT	28,5	7,3	0,771	Receptor
Papel/Papelão	ASTM	29,1	7,3	0,765	Receptor

Nota: Fc < 1 indica superestimação por absorção; Fc > 1 indica subestimação por perda de umidade. Fonte: Autoria própria (2026).

A regressão linear, com o método como preditor, confirmou que as distorções são sistemáticas (Tabela 7; Figura 11). Nos plásticos, o modelo explicou 88% da variação (R^2 = 0,884), com acréscimos de 26,59 (ABNT) e 23,59 (ASTM) pontos percentuais sobre uma umidade basal de 3,49% cuja estimativa não difere de zero de forma significativa (intercepto $p = 0,194$), imprecisão esperada e sem efeito sobre os coeficientes de método, ($p < 0,001$); no papel/papelão, o comportamento foi semelhante ($R^2 = 0,872$). Nos orgânicos, o efeito do método não foi estatisticamente significativo, compatível com seu papel de doador: a perda de água dilui-se na massa dominante da fração e torna-se pouco perceptível para ela mesma. Os coeficientes de determinação elevados devem ser lidos com a cautela que o número reduzido de observações impõe: com quatro campanhas e três parâmetros por modelo, restam poucos graus de liberdade, de modo que valores altos de R^2 são, em parte, esperados nesse regime e não constituem, por si, evidência de generalidade. A regressão é aqui um instrumento descritivo, de quantificação do deslocamento sistemático entre métodos, e não uma prova de ajuste preditivo fora da amostra.

Tabela 7 – Parâmetros da regressão linear para o efeito do método sobre o teor de umidade (Referência Geral como intercepto).

Fração	Parâmetro	β	Erro padrão	p	R^2
Plásticos	**Intercepto (Ref. Geral)**	**3,49**	**2,49**	**0,194**	**0,884**
	Efeito ABNT	+26,59	3,52	< 0,001	
	Efeito ASTM	+23,59	3,52	< 0,001	
Papel/Papelão	Intercepto (Ref. Geral)	7,32	2,25	0,010	0,872
	Efeito ABNT	+21,22	3,18	< 0,001	
	Efeito ASTM	+21,82	3,18	< 0,001	

Fonte: Autoria própria (2026).

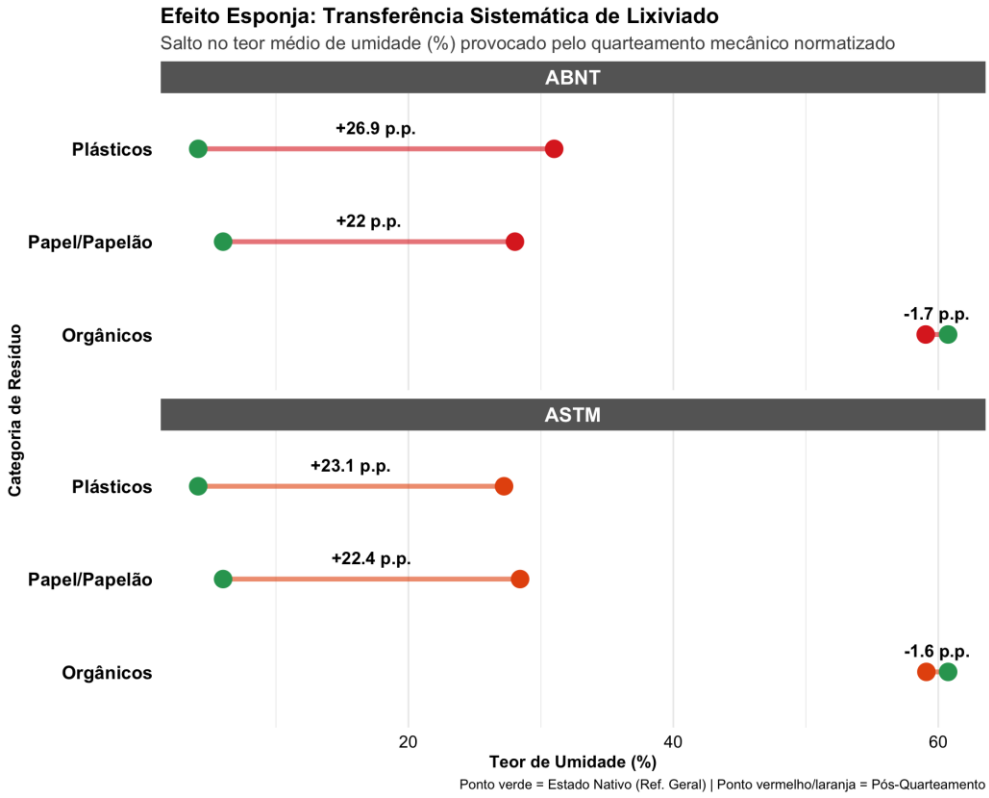


Figura 11 – Salto no teor médio de umidade (pontos percentuais) da condição nativa para os protocolos ABNT e ASTM.

Fonte: Autoria própria (2026).

Aplicados os fatores às frações afetadas e renormalizada a composição a 100%, a soma dos desvios em relação ao perfil nativo caiu de 9,59 para 5,71 pontos percentuais na ABNT e de 6,13 para 4,61 na ASTM. A maior aproximação ocorreu justamente na fração orgânica, cujo desvio passou de 3,48 para 0,02 (ABNT) e de 3,04 para 0,17 (ASTM), ainda que nenhum fator de correção lhe tenha sido aplicado: ao reduzir a massa aparente de plásticos e papel/papelão e redistribuir proporcionalmente a diferença, a renormalização restitui à fração orgânica a participação que a transferência hídrica lhe havia subtraído. A melhora concentra-se nas frações

diretamente ligadas à transferência hídrica; categorias sem relação com o fenômeno, como rejeitos sanitários e metais, tiveram seu desvio levemente ampliado pela renormalização, que redistribui proporcionalmente a massa liberada pela correção entre todas as categorias. Esse comportamento decorre da própria natureza composicional dos dados: como as frações somam cem por cento, a correção de uma categoria propaga-se necessariamente para as demais, e nenhuma fração pode ser ajustada isoladamente sem afetar o restante do perfil (Edjabou *et al*., 2017). O leve aumento de desvio nas categorias não relacionadas não é falha do procedimento, mas consequência inevitável da restrição de soma fixa. O fator de correção, portanto, aproxima o perfil composicional da condição nativa de forma direcionada, não uniforme.

7.5.6 Implicações e proposta de ajuste

Estudos relativamente recentes mantêm a premissa de neutralidade da homogeneização: Silva Martínez et al. (2024) e Mota e Silva (2024) não avaliaram os seus efeitos sobre a umidade das frações. O uso direto dos dados normativos, sem correção, subestima a fração orgânica biodegradável, o que afeta o dimensionamento de compostagem e biodigestão, e superestima recicláveis secos, o que distorce projeções de recuperação e viabilidade da reciclagem, já que parte da massa contabilizada corresponde a água absorvida. Em escala municipal, projetado ao horizonte de um plano de gestão de resíduos, um viés de poucos pontos percentuais implica volumes de massa mal estimados. A magnitude pode ser dimensionada a partir dos próprios dados. No CIEB, a triagem integral registrou geração média de 97,8 kg por dia de caracterização, equivalente a cerca de 86 g por pessoa ao dia, dos quais os fatores de correção sob a ABNT, de 0,725 para plásticos e 0,771 para papel/papelão, indicam que 27,5% da massa de plástico e 22,9% da de papel/papelão reportadas correspondem a água absorvida, e não a material. Transposto à escala de planejamento, o efeito é proporcional à massa envolvida: em um sistema que contabilize 100 toneladas anuais de plástico sob protocolo normativo, cerca de 27 toneladas não são material recuperável, com reflexo direto sobre o dimensionamento da linha de triagem e a projeção de receita da reciclagem, e a subestimação correspondente da fração orgânica biodegradável desloca capacidade que seria destinada a compostagem ou biodigestão.

Revisões futuras da ABNT NBR 10.007/2004 e, por analogia, da ASTM D5231 poderiam considerar o viés hídrico aqui documentado, o que requer validação prévia em outros contextos. Três ajustes parecem viáveis: medir o teor de umidade de cada fração antes e depois da homogeneização, tornando a redistribuição mensurável; permitir o reporte da composição também em base seca, reduzindo a dependência da massa úmida; e incorporar fatores de

correção quando o reporte for em massa úmida. Nenhum desses ajustes exige abandonar os protocolos vigentes; todos preservam a comparabilidade das séries históricas. A via institucional para uma revisão dessa natureza é a submissão de proposta de estudo à comissão responsável no âmbito da ABNT, seguida de consulta nacional antes da publicação, rito que resultou na revisão da NBR 10004 e na sua publicação em duas partes (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024), em 2024, enquanto a NBR 10.007, dedicada à amostragem, permanece na edição de 2004.

Do ponto de vista aplicado, os fatores de correção propostos oferecem uma rotina de ajuste incorporável a estudos que sigam a ABNT NBR 10.007:2004 ou a ASTM D5231: basta determinar a umidade nativa de plásticos, papel/papelão e orgânicos biodegradáveis a partir de uma amostra sem homogeneização, e aplicar os fatores correspondentes sobre a massa aparente de cada fração. Usinas de triagem e planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos, que costumam dimensionar linhas de reciclagem e unidades de compostagem a partir de dados gravimétricos brutos, passam a dispor de um instrumento simples para corrigir a superestimação de recicláveis secos e a subestimação da fração orgânica biodegradável antes de qualquer decisão de investimento. Um desvio de até 28% da massa aparente de plásticos não é um refinamento marginal: projetado ao horizonte de um plano municipal de gestão, ele pode representar toneladas de capacidade de triagem dimensionadas para um material que, em parte, é água. Onde a capacidade técnica instalada para a gestão de resíduos é limitada, como o descrito para parte expressiva dos municípios brasileiros (Marino; Chaves; dos Santos Junior, 2018; Alfaia; Costa; Campos, 2017), o custo de superdimensionar a triagem de recicláveis e de subdimensionar a compostagem da fração orgânica biodegradável recai diretamente sobre a viabilidade dos sistemas implantados. Registre-se, ainda, que a massa não é o único parâmetro de dimensionamento dessas unidades: o teor de umidade por fração, aqui aferido, é dado de entrada em projeto de compostagem, de biodigestão e de estimativa de geração de lixiviado, de modo que o seu registro, além de corrigir a composição, agrega informação de projeto hoje ausente da rotina normativa.

A ANOVA por categoria trata cada percentual como variável independente, pressuposto inadequado para dados composicionais, em que a soma das frações é fixa (Edjabou *et al.*, 2017). Por essa razão, a inferência sobre o efeito do método foi ancorada na PERMANOVA sobre a matriz completa de dissimilaridade, que compara os perfis composicionais sem assumir independência entre as frações, e a ANOVA por categoria foi empregada apenas para localizar em quais frações ocorrem os deslocamentos e verificar sua consistência entre as campanhas, não como base inferencial principal. A convergência entre os dois níveis de análise, o

multivariado e o localizado, sustenta o achado. A transformação log-ratio, aplicada no Capítulo II desta tese à comparação composicional dos protocolos, é a abordagem canônica para dados composicionais e poderia ser estendida à análise da umidade por fração em estudos que disponham de maior número de campanhas. Os resultados derivam de uma única instituição e de quatro campanhas em intervalo curto, o que recomenda cautela na generalização dos valores numéricos dos fatores de correção; o caráter pareado das campanhas, contudo, confere ao delineamento um controle superior ao que o número de campanhas sugeriria isoladamente.

A condição de massa constante na secagem foi verificada por pesagens sucessivas, sem levantamento de curvas de secagem sistemáticas. A secagem a 110 °C pode, em princípio, volatilizar compostos orgânicos leves junto com a água, o que poderia confundir-se com o ganho de umidade medido; essa contribuição, porém, tende a ser pequena nas frações receptoras, plásticos e papel/papelão, cuja matéria própria é predominantemente não volátil, e, por ser comum aos três métodos secos em condições idênticas, cancela-se no contraste entre eles. Ainda assim, a ausência de método normalizado para a determinação de umidade em RSU recomenda que replicações futuras verifiquem a estabilidade dos valores absolutos a 105 °C, temperatura adotada pelas famílias normativas de biocombustíveis sólidos e de combustíveis derivados de resíduos.

Uma segunda limitação, de sinal oposto, decorre da aderência de matéria orgânica sólida à superfície dos recicláveis, observada em campo mas não quantificada: como essa fração sólida não é removida na estufa, ela não integra a umidade medida, de modo que os fatores de correção corrigem apenas a componente hídrica do viés e subestimam o viés de massa total. A separação entre a água transferida e os sólidos aderidos, por lavagem e secagem controladas, é uma medida necessária para quantificar integralmente a superestimação dos recicláveis.

7.6 CONCLUSÃO

A homogeneização mecânica prevista pelas normas de caracterização gravimétrica não é neutra. Isolada da redução de massa, ela redistribuiu umidade entre as frações dos RSU nas quatro campanhas pareadas conduzidas neste estudo de caso, sem alterar a massa hídrica total da amostra, o que caracteriza uma redistribuição interna de água e não uma perda por evaporação.

A transferência foi quantificada por fatores de correção específicos por fração e por método. Para os plásticos, o fator foi de 0,725 sob a ABNT e de 0,756 sob a ASTM; para papel/papelão, situou-se próximo de 0,77 sob ambos os protocolos. A fração orgânica biodegradável, matriz doadora, não demandou fator próprio, uma vez que a sua variação de

umidade entre os métodos não foi estatisticamente significativa, e a renormalização da composição corrigida restitui-lhe a participação subtraída pela transferência hídrica. Sem correção, dados gravimétricos obtidos sob a ABNT ou sob a ASTM superestimam os recicláveis secos em até um quarto da massa reportada, magnitude estimada nas condições deste estudo e ainda sujeita a confirmação em outros perfis de geração.

O estudo articulou o erro de amostragem, centrado em operações de partição e de redução de massa, com um mecanismo físico até então não isolado nesse contexto: a redistribuição de umidade entre frações de natureza distinta sob estresse mecânico. A homogeneização normativa não apenas redistribui a probabilidade de captura de partículas, como já demonstrado pela teoria da amostragem de Gy, mas redistribui massa entre categorias por um mecanismo de natureza hídrica. Tratar as duas fontes de incerteza como equivalentes, ou ignorar a segunda, compromete a interpretação de qualquer estudo gravimétrico que dependa de homogeneização prévia.

A validação desses fatores em outros contextos é o passo necessário antes de qualquer generalização. Instituições com perfis de geração distintos do observado no CIEB, sobretudo com menor fração orgânica biodegradável ou maior variabilidade sazonal de umidade, podem apresentar fatores diferentes dos aqui calculados. Estudos que repliquem o delineamento pareado em múltiplos sítios, ao longo de diferentes estações do ano, e que meçam a umidade nativa de todas as frações, e não apenas das três aqui avaliadas, poderão testar se os fatores convergem para valores estáveis ou variam de forma sistemática com o clima e o perfil de geração. Essa validação é o que separa um fator de correção específico de um sítio de um parâmetro de referência aplicável à prática nacional de caracterização gravimétrica.

7.7 REFERÊNCIAS

ADENIRAN, A. E.; NUBI, A. T.; ADELOPO, A. O. Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. **Waste Management**, v. 67, p. 3-10, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.002

ALFAIA, R. G. de S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: a review. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 12, p. 1195-1209, 2017. https://doi.org/10.1177/0734242X17735375

ANDERSON, M. J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. **Austral Ecology**, v. 26, n. 1, p. 32-46, 2001. https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.x

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004-1: resíduos sólidos: parte 1: requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 21 p.

ASTM INTERNATIONAL. D2216-19: standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. West Conshohocken: ASTM International, 2019. https://doi.org/10.1520/D2216-19

ASTM INTERNATIONAL. **D5231-92(2016)**: standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

BRAY, J. R.; CURTIS, J. T. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. **Ecological Monographs**, v. 27, n. 4, p. 325-349, 1957. https://doi.org/10.2307/1942268

DAHLÉN, L.; LAGERKVIST, A. Methods for household waste composition studies. **Waste Management**, v. 28, n. 7, p. 1100-1112, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.014

EDJABOU, M. E.; JENSEN, M. B.; GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; PETERSEN, C.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Municipal solid waste composition: sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. **Waste Management**, v. 36, p. 12-23, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.009

EDJABOU, M. E.; MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Statistical analysis of solid waste composition data: arithmetic mean, standard deviation and correlation coefficients. **Waste Management**, v. 69, p. 13-23, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.036

ESBENSEN, K. H.; VELIS, C. Transition to circular economy requires reliable statistical quantification and control of uncertainty and variability in waste. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 12, p. 1197-1200, 2016. https://doi.org/10.1177/0734242X16674573

GALLARDO, A.; EDO-ALCÓN, N.; CARLOS, M.; RENAU, M. The determination of waste generation and composition as an essential tool to improve the waste management plan of a university. **Waste Management**, v. 53, p. 3-11, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.013

GERASSIMIDOU, S.; VELIS, C. A.; KOMILIS, D. Establishing a sub-sampling plan for waste-derived solid recovered fuels (SRF): effects of shredding on representative sample preparation based on theory of sampling (ToS). **Waste Management**, v. 113, p. 430-438, 2020. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.019

GERLACH, R. W.; DOBB, D. E.; RAAB, G. A.; NOCERINO, J. M. Gy sampling theory in environmental studies. 1. Assessing soil splitting protocols. **Journal of Chemometrics**, v. 16, n. 7, p. 321-328, 2002. https://doi.org/10.1002/cem.720

GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; BOLDRIN, A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Physico-chemical characterisation of material fractions in residual and source-segregated household waste in Denmark. **Waste Management**, v. 54, p. 13-26, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.009

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 18134-1: solid biofuels: determination of moisture content: part 1: reference method. Geneva: ISO, 2022.

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a waste 2.0**: a global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

KRUSKAL, J. B. Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method. **Psychometrika**, v. 29, n. 2, p. 115-129, 1964. https://doi.org/10.1007/BF02289694

MAGRINHO, A.; SEMIÃO, V. On the effect of MSW moisture content on meeting target recycling rates. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 310-317, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.021

MARINO, A. L.; CHAVES, G. L. D.; DOS SANTOS JUNIOR, J. L. Do Brazilian municipalities have the technical capacity to implement solid waste management at the local level? **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 378-386, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.324

MOTA, A. R. S. da; SILVA, N. M. da. Gravimetric characterization of solid waste in the dump of the municipality of Coari – Amazonas, Brazil. **Revista de Gestão Social e Ambiental** (RGSA), v. 18, n. 11, e09540, 2024. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-123

PITARD, F. F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice**: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1993.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 20 jun. 2026.

SAHIMAA, O.; HUPPONEN, M.; HORTTANAINEN, M.; SORVARI, J. Method for residual household waste composition studies. **Waste Management**, v. 46, p. 3-14, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.032

SILVA MARTÍNEZ, R. D.; DÍAZ JIMÉNEZ, L.; AGUILAR JUÁREZ, O.; CARLOS HERNÁNDEZ, S. Characterization of municipal solid waste with the perspective of biofuels and bioproducts recovery in Northeast Mexico. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 26, n. 6, p. 3665-3680, 2024. https://doi.org/10.1007/s10163-024-02036-4

SINGHAL, A.; GUPTA, A. K.; DUBEY, B.; GHANGREKAR, M. M. Seasonal characterization of municipal solid waste for selecting feasible waste treatment technology for

Guwahati city, India. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 72, n. 2, p. 147-160, 2021. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1980450

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 5, n. 2, p. 99-114, 1949. https://doi.org/10.2307/3001913

UGWU, C. O.; OZOEGWU, C. G.; OZOR, P. A. Solid waste quantification and characterization in university of Nigeria, Nsukka campus, and recommendations for sustainable management. **Heliyon**, v. 6, n. 6, e04255, 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04255

WASKOW, R. P. **ASTM D5231 aplicada à caracterização da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos**: estudo de caso: Novo Hamburgo, RS. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WASSERMAN, M.; ANSHASSI, M.; TOWNSEND, T. G. Assessing sample number requirements for municipal solid waste composition studies. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 26, n. 1, e04021038, 2022. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000652

WICKHAM, H. **ggplot2**: elegant graphics for data analysis. 2. ed. New York: Springer, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4.

8 CAPÍTULO IV - A HOMOGENEIZAÇÃO NÃO É NEUTRA: CONSOLIDAÇÃO DOS ACHADOS E PROPOSIÇÃO DE CORREÇÃO DO VIÉS HÍDRICO NA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

8.1 RESUMO

A caracterização gravimétrica orienta o dimensionamento de sistemas de coleta, triagem, compostagem e disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), e depende de protocolos de amostragem que prescrevem a homogeneização mecânica da amostra antes da redução de massa. Este capítulo consolida as evidências dos três estudos que compõem a tese, uma revisão integrativa da literatura de caracterização e amostragem, um estudo comparativo de três protocolos aplicados a resíduos institucionais e um experimento pareado que isolou o efeito da homogeneização sobre a umidade das frações. A leitura conjunta sustenta uma conclusão que nenhum dos estudos autoriza isoladamente: a homogeneização redistribui água das frações úmidas para as secas sem alterar a massa hídrica total da amostra, e essa redistribuição infla a massa aparente dos recicláveis secos em proporção que alcança um quarto da massa reportada. O fenômeno constitui uma classe de erro de preparo que a teoria da amostragem de Gy, formulada para materiais inertes, não modela. Discutem-se as consequências do viés para o planejamento de reciclagem, compostagem e gestão de lixiviado, e propõe-se um ajuste aos protocolos ABNT NBR 10.007 e ASTM D5231, articulado em quatro elementos, que preserva a comparabilidade das séries históricas e não exige instrumentação além da já prevista na rotina de caracterização. Delimitam-se as condições de validação necessárias antes da generalização dos fatores de correção.

Palavras-chave: erro de preparo de amostra; material higroscópico; base seca; fator de correção; ABNT NBR 10.007.

8.2 ABSTRACT

Gravimetric characterization guides the design of collection, sorting, composting and disposal systems for municipal solid waste (MSW), and relies on sampling protocols that prescribe mechanical homogenization of the sample before mass reduction. This chapter consolidates the evidence from the three studies that make up the thesis: an integrative review of the characterization and sampling literature, a comparative study of three protocols applied to institutional waste, and a paired experiment that isolated the effect of homogenization on fraction moisture. The joint reading supports a conclusion that none of the studies authorizes on its own: homogenization redistributes water from wet to dry fractions without changing the total moisture mass of the sample, and this redistribution inflates the apparent mass of dry recyclables by up to a quarter of the reported mass. The phenomenon is a class of preparation error that Gy's sampling theory, formulated for inert materials, does not model. The consequences of the bias for recycling, composting and leachate management planning are discussed, and an adjustment to the ABNT NBR 10.007 and ASTM D5231 protocols is proposed, structured in four elements, preserving the comparability of historical series and requiring no instrumentation beyond that already used in characterization routines. The validation conditions required before generalizing the correction factors are outlined.

Keywords: sample preparation error; hygroscopic material; dry basis; correction factor; ABNT NBR 10.007.

8.3 INTRODUÇÃO

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos é o dado de entrada de quase toda decisão de gestão, do dimensionamento de rotas de coleta ao cálculo de capacidade de usinas de triagem, e sustenta a avaliação do potencial de compostagem e a projeção de recuperação de recicláveis (Kaza *et al*., 2018). A confiabilidade dessa base depende de uma etapa que os protocolos de amostragem tratam como preparo neutro: a homogeneização mecânica da amostra, seguida da redução de massa por quarteamento. A norma brasileira ABNT NBR 10.007 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) e a norma norte-americana ASTM D5231 (ASTM International, 2016) prescrevem essa sequência sob o pressuposto de que a mistura reduz a heterogeneidade de distribuição sem alterar as propriedades das frações que serão pesadas.

Esse pressuposto foi examinado ao longo dos capítulos anteriores desta tese e não se sustenta para uma propriedade determinada, o teor de umidade. Os três estudos que compõem a tese, conduzidos em escalas de observação distintas, convergem sobre esse ponto, e a articulação entre eles é o objeto deste capítulo.

A contribuição deste capítulo de fechamento não é a constatação isolada de um viés, já sugerida de forma dispersa na literatura, mas a articulação das evidências dos três estudos em um diagnóstico único, a sua localização na etapa de preparo, a sua tradução em instrumento de correção aplicável à prática de caracterização e a demonstração de que os objetivos específicos da tese foram cumpridos. O capítulo consolida os resultados sem os repetir, situa o fenômeno documentado em relação ao arcabouço teórico que fundamenta a amostragem de RSU e desenvolve, a partir desse diagnóstico, uma proposição de ajuste às normas de amostragem, com a delimitação das condições de validação que a antecedem.

8.4 BASE DE EVIDÊNCIAS

Este capítulo constitui uma consolidação integrativa dos três estudos que compõem a tese, e não um novo levantamento empírico. A base de evidências reúne três desenhos complementares, cada um dirigido a uma dimensão do problema. O primeiro é a revisão integrativa da literatura de caracterização gravimétrica e de teoria da amostragem, que estabeleceu o estado da questão e delimitou a lacuna relativa ao efeito da homogeneização sobre a distribuição de umidade entre frações. O segundo é o estudo comparativo conduzido no CIEB, que aplicou três protocolos, a triagem integral sem redução amostral, tomada como referência, a ABNT NBR 10.007 e a ASTM D5231, e avaliou a fidelidade composicional dos métodos

normatizados por análise de dados composicionais. O terceiro é o experimento pareado, no qual os três métodos foram aplicados ao mesmo lote de resíduos no mesmo dia, o que separou o efeito da homogeneização da variação entre coletas e permitiu medir o teor de umidade por fração.

A consolidação seguiu três operações analíticas. A primeira foi a articulação das conclusões dos estudos em escalas distintas de observação, a composição percentual agregada e a massa hídrica por fração, com a explicitação de por que resultados aparentemente discordantes são compatíveis. A segunda foi o raciocínio de balanço de massa hídrica, que distingue a redistribuição interna de água, na qual a massa hídrica total permanece constante, da perda por evaporação, na qual a água deixa o sistema. A terceira foi a derivação da proposição de correção a partir do diagnóstico consolidado, com o exame das alternativas de correção segundo o compromisso que cada uma estabelece entre o viés hídrico e o erro de segregação. A interpretação dos resultados numéricos remete aos capítulos que os produziram, aos quais este capítulo não acrescenta dados, mas confere leitura conjunta.

8.5 DISCUSSÃO

8.5.1 Síntese e diagnóstico consolidado

Os três estudos convergem sobre a mesma operação a partir de escalas de observação diferentes, e a força do diagnóstico está nessa convergência. A revisão integrativa estabeleceu que a caracterização gravimétrica dispõe de um corpo consolidado de estudos de composição e de um arcabouço teórico de amostragem, mas que o efeito da homogeneização sobre a distribuição de umidade entre frações não havia sido isolado. A literatura reconhece, de forma dispersa, que o manuseio e o preparo de amostras podem alterar propriedades físicas dos resíduos (Gerlach *et al*., 2002; Dahlén; Lagerkvist, 2008; Edjabou *et al*., 2015), e a transferência hídrica entre componentes já fora descrita em nível de sistema de coleta e na modelagem da absorção de líquidos por papel e plásticos (Magrinho; Semião, 2008; Götze *et al*., 2016). Em todos esses casos, porém, a mistura é propriedade do sistema de coleta, e não da operação de amostragem em laboratório. A lacuna identificada foi a ausência de um desenho que isolasse o efeito da homogeneização normativa, aplicada a uma amostra já coletada, do efeito da redução de massa associada ao quarteamento.

O estudo do CIEB abordou a fidelidade composicional dos métodos normatizados e revelou dependência de escala. Na agregação em macrogrupos funcionais, os métodos ABNT e ASTM reproduziram o perfil de referência, sem diferença estatística. Na escala das dez

microcategorias, os três métodos divergiram do perfil de referência e entre si, o que indica que cada protocolo de mistura se associa a um padrão de distorção próprio. A superestimação de papel/papelão destacou-se como a divergência mais consistentemente atribuível à homogeneização, por não se associar a nenhum evento episódico de geração. O estudo apontou dois mecanismos não excludentes para essa superestimação, a estratificação física dos materiais leves durante o quarteamento e a possível redistribuição de umidade a partir da fração orgânica, e reconheceu que a distinção entre ambos exigiria a determinação do teor de umidade por fração.

O experimento pareado abordou o mecanismo físico. Ao aplicar os três métodos ao mesmo lote no mesmo dia, o delineamento separou o efeito da homogeneização da variação entre coletas. A estrutura macroscópica da composição não diferiu de forma perceptível entre os métodos, resultado coerente com a estabilidade dos macrogrupos observada no CIEB. Controlada a variação entre coletas, contudo, o método passou a explicar parcela significativa da variação composicional, e a análise da umidade revelou o mecanismo subjacente. A massa hídrica total da amostra não variou entre os métodos, enquanto plásticos e papel/papelão, originalmente secos, ganharam entre vinte e um e vinte e sete pontos percentuais de umidade sob os protocolos normativos, e a fração orgânica biodegradável atuou como reservatório. A constância da água total, associada à variação por fração, caracteriza uma redistribuição interna, sem perda ou ganho líquido de água pelo sistema. A partir desses ganhos, estimaram-se fatores de correção por fração e método, validados por regressão, com valores entre 0,72 e 0,77 para plásticos e papel/papelão.

A articulação entre o estudo do CIEB e o experimento pareado exige explicitar por que suas conclusões, aparentemente discordantes, são compatíveis. O estudo do CIEB concluiu que, para um dimensionamento macroscópico, os métodos normatizados são adequados, uma vez que reproduzem o perfil de referência na escala de macrogrupos. O experimento pareado concluiu que a homogeneização infla a massa aparente dos recicláveis secos em proporção que alcança um quarto da massa reportada. Longe de se repetirem, os dois capítulos operam em escalas de observação distintas. A primeira refere-se à estabilidade da composição percentual quando as categorias são agregadas; a segunda, à massa de água que se desloca entre categorias específicas sem alterar a soma percentual do conjunto. Um perfil de macrogrupos estável pode conter, no seu interior, frações cuja massa individual está enviesada pela água absorvida, porque a agregação soma frações receptoras e doadoras e cancela o deslocamento entre elas. A composição agregada é insensível ao fenômeno; a massa por fração não é. Essa distinção define o uso correto de cada resultado: o dado de macrogrupo serve ao dimensionamento de rotas de

coleta e de capacidade instalada, o dado de fração serve ao planejamento de reciclagem e de compostagem, e é neste segundo uso que a correção se torna necessária.

O achado que sustenta o diagnóstico é o balanço de massa hídrica. A ausência de variação da umidade total entre métodos, combinada ao ganho de água por plásticos e papel/papelão e à cessão pela fração orgânica biodegradável, distingue o fenômeno de uma perda por evaporação. Leverenz, Souza e Christensen (2026) documentaram a perda evaporativa de umidade durante a exposição da amostra ao ar ao longo da triagem, mecanismo que retira água do sistema. O efeito aqui descrito é de natureza distinta: a água não deixa a amostra, muda de lugar dentro dela. Essa distinção localiza o problema na etapa de homogeneização, e não no tempo de manuseio ou na exposição ambiental, e diferencia a contribuição desta tese das descrições anteriores de variação de umidade em resíduos. O balanço não se fechou por completo com a medida de umidade em três frações, o que indica que parte da água transferida provém de componentes não medidos da matriz, como rejeitos sanitários e finos orgânicos; a conservação da água total permanece o alicerce do diagnóstico.

8.5.2 O viés hídrico como erro de preparo não previsto pela teoria da amostragem

A representatividade das amostras de RSU costuma ser justificada pela teoria da amostragem de Gy, referência recorrente na literatura de caracterização e em manuais de aplicação ambiental (Gy; Marin, 1978; Pitard, 2019; Gerlach *et al*., 2002). A teoria descreve os erros associados à redução de massa de um material heterogêneo, modelado como um conjunto de partículas cujas propriedades permanecem fixas durante o manuseio, e localiza o erro na probabilidade de que partículas de composição e tamanho distintos sejam capturadas em proporção representativa. A aplicação desse arcabouço a RSU foi tratada por Wavrer (2018) e estendida a materiais heterogêneos análogos, como os combustíveis sólidos recuperados, por Gerassimidou *et al*. (2020a), sempre sob a premissa de invariância das partículas.

O resultado do experimento pareado não se acomoda nessa estrutura. A homogeneização não altera a probabilidade de captura das partículas de plástico ou de papel; altera a massa dessas partículas, ao incorporar a elas água proveniente de outra fração. É uma transferência de massa entre constituintes dentro da amostra, e não um viés de seleção. O arcabouço de Gy prevê o erro de preparo como perda, contaminação ou alteração acidental introduzida pela manipulação, e recomenda minimizá-lo por execução correta do procedimento. Não prevê que o procedimento correto, executado conforme a norma, seja ele próprio a causa de uma redistribuição sistemática de massa entre categorias. Em materiais inertes, para os quais a teoria foi desenvolvida, essa possibilidade não se coloca. Em RSU, material higroscópico e

biologicamente ativo, com frações cujo teor de umidade varia de menos de cinco por cento a mais de sessenta por cento, ela é estrutural. Poderia objetar-se que a própria teoria já contempla o erro de preparo, na categoria que reúne perda, contaminação e alteração da amostra durante o manuseio. A distinção é precisamente esta: o erro de preparo clássico pressupõe que a alteração retira ou acrescenta matéria ao sistema, ao passo que o mecanismo aqui descrito conserva a massa total e apenas a redistribui entre frações. Trata-se, portanto, de um subtipo de erro de preparo não modelado, e não de um caso já previsto sob outro nome.

Propõe-se, com base nesse contraste, tratar a redistribuição de umidade como uma classe de erro de preparo específica de materiais higroscópicos, distinta do erro de preparo por perda ou contaminação já previsto na teoria. O erro aqui descrito não decorre de execução incorreta, e por isso não é eliminável por maior cuidado do operador; decorre da natureza do material submetido a uma operação de mistura, e só é neutralizável pela medida direta da umidade por fração ou pela supressão da etapa que o gera. Essa formulação dialoga com a distinção que Esbensen e Velis (2016) estabelecem entre erros de amostragem corrigíveis por procedimento e limitações estruturais da representatividade em fluxos de resíduos, e a estende: além de redistribuir a probabilidade de captura de partículas, a homogeneização normativa redistribui massa entre categorias por um mecanismo físico de natureza hídrica. A formulação posiciona o achado como extensão do domínio de aplicação da teoria a materiais que violam a premissa de invariância das partículas, e não como refutação da teoria em seu domínio original.

8.5.3 Implicações para a análise de dados composicionais

A natureza composicional dos dados gravimétricos amplifica a consequência do viés hídrico e condiciona o modo de o corrigir. A composição em massa é um dado de soma fixa, em que as frações somam cem por cento, de modo que a distorção em uma categoria se propaga necessariamente para as demais (Edjabou *et al*., 2015; Edjabou *et al*., 2017). Quando a homogeneização infla a massa aparente de plásticos e papel/papelão, a fração orgânica biodegradável aparece proporcionalmente reduzida, ainda que não tenha perdido matéria sólida. O experimento pareado tratou a limitação da análise univariada de dados composicionais recorrendo a métodos de distância multivariada, a análise de variância permutacional sobre dissimilaridade de Bray-Curtis e a ordenação por escalonamento multidimensional não métrico, abordagem cuja adequação ao tratamento de composições de RSU vem sendo demonstrada em comparações entre estudos (Tonjes *et al*., 2025). Aplicar um fator de correção a uma fração receptora sem renormalizar o conjunto violaria a restrição de soma fixa; renormalizar após a correção redistribui proporcionalmente a massa liberada entre todas as categorias, o que

aproxima o perfil corrigido da condição nativa de forma direcionada, com a maior aproximação concentrada na fração orgânica. Esse comportamento é consequência da estrutura de soma fixa dos dados, e deve ser interpretado à luz dela.

A escolha das métricas entre os dois estudos empíricos merece registro, porque é aparente a incoerência de se empregar a distância de Aitchison, própria da abordagem de razão logarítmica, no estudo comparativo, e a dissimilaridade de Bray-Curtis com PERMANOVA no experimento pareado. A diferença responde ao propósito de cada análise: o estudo comparativo examinou a estabilidade das razões entre frações sob redução amostral, questão para a qual a coordenada de razão logarítmica é a formulação canônica; o experimento pareado testou a existência de efeito de método sobre o perfil completo, com blocos de coleta, tarefa para a qual a PERMANOVA sobre dissimilaridade oferece o teste multivariado sem pressupor normalidade. A ressalva de Edjabou et al. (2017) contra o uso de estatística univariada sobre percentuais brutos vale para ambos os desenhos e foi observada nos dois: a inferência apoiou-se sempre na análise multivariada, e a análise por categoria serviu apenas para localizar os deslocamentos. A extensão da abordagem de razão logarítmica à análise da umidade por fração, viável em estudos com maior número de campanhas, é o refinamento estatístico natural desta linha.

8.5.4 Fragilidades dos protocolos normativos vigentes

A leitura conjunta dos capítulos expõe fragilidades da ABNT NBR 10.007 e da ASTM D5231 que a prática corrente não tematiza, e que dizem respeito tanto ao procedimento de redução de massa quanto ao pressuposto de neutralidade da mistura. O quarteamento manual, operação central da NBR 10.007, não integra o referencial fundacional da teoria da amostragem invocada para justificar a representatividade das amostras de RSU. Gy e Marin (1978) e Pitard (2019) condicionam a correção de uma amostra à captura de incrementos que respeitem a equiprobabilidade de seleção das partículas, e é essa condição que a divisão manual em quadrantes não assegura, porque a delimitação e a extração dos quadrantes ficam sujeitas à decisão do operador e à disposição espacial dos materiais na pilha. Wavrer (2018), ao aplicar a teoria da amostragem à caracterização de RSU, e Gerassimidou, Velis e Komilis (2020b), ao formular planos de subamostragem para combustíveis derivados de resíduos, tratam a redução de massa como problema de projeto amostral, com regras explícitas de incremento e de número de subamostras; o quarteamento normativo permanece um procedimento prescritivo sem esse lastro. O estudo do CIEB deu forma empírica à fragilidade: na escala de fração específica, a

NBR 10.007 e a ASTM D5231 produziram perfis divergentes a partir do mesmo resíduo, o que indica que a operação de redução, e não apenas a composição do lote, condiciona o resultado.

Essa fragilidade tem uma consequência que o dimensionamento estatístico do número de amostras não alcança. Wasserman, Anshassi e Townsend (2022) e Gerassimidou, Velis e Komilis (2020b) mostram como estimar o número de amostras necessário para conter a incerteza das estimativas de composição, o que aumenta a precisão, entendida como a redução da dispersão entre réplicas. O viés documentado nesta tese é de outra ordem, pois afeta a acurácia, o afastamento sistemático entre o valor medido e o valor real, que não diminui com o aumento do número de amostras porque desloca todas as réplicas na mesma direção. Ampliar a amostragem sobre um procedimento enviesado estreita o intervalo em torno de um valor deslocado, e a distinção entre precisão e acurácia, central na teoria da amostragem, raramente é explicitada nas normas de caracterização de RSU. Soma-se a isso o fato de que nem a NBR 10.007 nem a ASTM D5231 exigem o registro da massa efetivamente triada, de modo que a intensidade da redução amostral, e, portanto, a exposição de cada estudo ao fenômeno, permanece invisível nos dados reportados e impede, na prática, que a comparabilidade entre estudos seja avaliada.

A segunda fragilidade é a premissa de neutralidade da homogeneização quanto às propriedades físicas dos materiais, premissa que as revisões recentes não alcançaram: a ASTM D5231 foi reaprovada em 2024 sem revisão do texto de 1992, e a ABNT NBR 10.007 permanece na edição de 2004, ainda que a norma de classificação da mesma família tenha sido revista e publicada em duas partes em 2024. As normas justificam a mistura como meio de reduzir a heterogeneidade de distribuição e tratam a amostra homogeneizada como equivalente à original quanto à composição de cada fração, mas o experimento pareado mostrou que essa equivalência não se sustenta para o teor de umidade. Estudos recentes de caracterização mantêm a premissa sem a examinar: Mota e Silva (2024), ao caracterizar resíduos em lixão na Amazônia, e Silva Martínez *et al*. (2024), ao avaliar o potencial de recuperação de biocombustíveis no Nordeste do México, aplicam a redução amostral e reportam a composição em massa úmida sem discutir o efeito do preparo sobre a umidade das frações. A recorrência dessa omissão em contextos geográficos e finalidades distintas indica que a fragilidade não é particularidade de um estudo, e sim uma lacuna do referencial normativo compartilhado. A sua origem está no modelo de heterogeneidade sob o qual as normas foram redigidas, que trata a variabilidade como propriedade de composição e de tamanho de partícula e não inclui a umidade como propriedade redistribuível entre frações em contato.

8.5.5 Alternativas de correção e proposição de ajuste normativo

As evidências reunidas apontam três caminhos de correção, que se distinguem pelo compromisso que cada um estabelece entre o viés hídrico e o erro de segregação que a homogeneização pretendia atenuar. A supressão da homogeneização, por triagem da massa integral no estado em que a amostra foi recebida, ataca o fenômeno na origem, porque não submete a matriz ao estresse mecânico que promove a transferência de água. O seu custo é duplo: operacional, uma vez que, sem a redução por quarteamento, tria-se o volume completo, o que restringe a medida a lotes compatíveis com a triagem manual; e teórico, porque a supressão da mistura pode reintroduzir o erro de segregação que a homogeneização buscava reduzir. A evidência do CIEB delimita esse compromisso, ao mostrar que, na escala de macrogrupos, o método sem homogeneização preservou o perfil de referência, o que sugere que, para essa finalidade, o ganho em fidelidade composicional supera a perda em controle de segregação; a transposição desse balanço a lotes maiores e a perfis de geração distintos permanece uma questão empírica em aberto.

O reporte da composição em base seca, ao lado da base úmida, é a segunda via, e a de maior comparabilidade entre estudos. A base seca é invariante à transferência de água, porque a massa de matéria sólida de cada fração não migra durante a homogeneização, apenas o lixiviado o faz, e reportar a composição também em massa seca neutraliza o viés para as finalidades de caracterização material, ao custo da determinação do teor de umidade por fração. Essa medida aproxima a caracterização gravimétrica de RSU de uma prática já consolidada na caracterização físico-química de frações de resíduos, na qual o reporte em base seca é padrão (Götze *et al*., 2016; Dahlén; Lagerkvist, 2008). A defasagem entre as duas tradições é reveladora: a caracterização físico-química, voltada a propriedades como poder calorífico e teor de carbono, incorporou a base seca porque a umidade interfere diretamente nas grandezas de interesse, ao passo que a caracterização gravimétrica se manteve na base úmida porque a sua grandeza, a massa por categoria, parecia dispensá-la. O experimento pareado mostra que essa dispensa é indevida, pois a base úmida isolada carrega, na massa das frações secas, um componente hídrico que não lhes é próprio.

A aplicação dos fatores de correção às frações obtidas em massa úmida sob protocolo normativo é a terceira via, a de menor ruptura com a prática instalada e a de maior dependência da estabilidade dos fatores. Ela mantém o procedimento vigente e corrige o resultado a posteriori, mediante a medida da umidade nativa das frações a partir de uma amostra sem homogeneização e a renormalização exigida pela estrutura de soma fixa dos dados, e é a via

mais compatível com séries históricas obtidas sob a norma. Poderia parecer circular exigir uma amostra sem homogeneização para corrigir um resultado obtido com homogeneização, já que, dispondo daquela amostra, seria possível triá-la diretamente e dispensar a correção. A via distingue-se, porém, em duas situações em que a supressão não está disponível: na reinterpretação de séries históricas já coletadas sob a norma, para as quais não há mais como refazer a triagem, e em rotinas nas quais a umidade nativa é estimada a partir de um subconjunto reduzido de material, sem triar integralmente o lote. Nesses casos, a correção a posteriori é a única via aplicável.

A articulação dessas três medidas fundamenta a proposta de ajuste à ABNT NBR 10.007, extensível por analogia à ASTM D5231, formulada em quatro elementos: o reconhecimento, no texto normativo, de que o RSU é material higroscópico para o qual a homogeneização redistribui umidade entre frações; a recomendação condicional de triagem no estado recebido, quando o lote e a finalidade o permitirem; a exigência de reporte da composição em base seca por fração, ao lado da base úmida, quando a caracterização se destinar ao planejamento de reciclagem, compostagem ou biodigestão; e o registro das condições que modulam a magnitude do fenômeno, o teor de umidade global, o tempo entre a homogeneização e a pesagem e a exposição da amostra ao ambiente. Nenhum dos elementos exige instrumentação além da balança e da estufa já previstas na rotina, e nenhum invalida os dados obtidos sob os protocolos atuais, que permanecem interpretáveis à luz do viés documentado.

8.5.6 Consequências para a gestão de resíduos

O viés hídrico tem consequências que ultrapassam a acurácia da caracterização e atingem o dimensionamento de infraestrutura e a decisão de investimento. A subestimação da fração orgânica biodegradável, que cede água durante o preparo, afeta o dimensionamento de unidades de compostagem e de biodigestão, cujo insumo é justamente a matéria orgânica cuja massa aparente foi reduzida, com risco de subdimensionamento de pátios e de reatores de digestão anaeróbia. No sentido inverso, a superestimação de plásticos e papel/papelão, que absorvem a água cedida, infla as projeções de recuperação e a avaliação de viabilidade econômica da triagem, porque parte da massa contabilizada como reciclável corresponde a água que escoa ou evapora antes da comercialização. Magrinho e Semião (2008) haviam mostrado que o teor de umidade dos resíduos condiciona o cumprimento de metas de reciclagem expressas em massa; o mecanismo aqui documentado acrescenta que parte dessa umidade é atribuída à fração errada pelo próprio procedimento de caracterização, o que desloca a origem do problema da balança para o protocolo. Cabe a ressalva de que a massa não é o único

parâmetro de dimensionamento dessas unidades: o teor de umidade é variável de projeto em compostagem, em digestão anaeróbia e na estimativa de geração de lixiviado. É precisamente por isso que a atribuição da água à fração errada importa. Onde a caracterização reporta apenas massa úmida por fração, sem registro de umidade, como prevê hoje a rotina normativa, o viés hídrico não é apenas um erro de composição: é a supressão de um dado de projeto que a própria medida da umidade por fração, aqui proposta, restitui.

A relevância dessas consequências é maior onde a margem técnica para corrigir decisões é estreita. Marino, Chaves e dos Santos Junior (2018) documentaram que parte expressiva dos municípios brasileiros não dispõe de capacidade técnica instalada para implementar a gestão de resíduos no nível local, e Alfaia, Costa e Campos (2017) descreveram um cenário nacional de dados de composição escassos e heterogêneos. Nesse contexto, um plano municipal assentado em caracterização enviesada não tem folga para absorver o erro, e a predominância da fração orgânica biodegradável nos resíduos de países de renda média e baixa (Kaza et al., 2018) agrava o quadro, porque é justamente a fração doadora de água a mais representativa e a mais sujeita à subestimação pelo mecanismo descrito.

A dinâmica hídrica entre frações tem, ainda, implicação para a gestão de lixiviado. A água que migra da fração orgânica para os recicláveis durante o preparo é a mesma que, em unidades de triagem e em aterros, condiciona a geração e a carga orgânica do lixiviado. Um diagnóstico que registre o teor de umidade por fração, além de corrigir a composição, fornece um dado de entrada para a estimativa de geração de lixiviado e para a definição de rotas de tratamento, de modo que a caracterização deixa de ser um inventário estático de composição e passa a informar o comportamento hídrico do resíduo ao longo do sistema de manejo.

8.5.7 Limitações e agenda de validação

A proposição normativa depende de validação prévia em contextos distintos do que a originou, e as limitações do conjunto empírico delimitam o alcance atual dos fatores de correção. Os fatores derivam de uma única instituição, com predomínio de fração orgânica biodegradável, o que recomenda cautela na transposição dos valores numéricos para outros perfis de geração; instituições com menor fração orgânica biodegradável, ou com maior variabilidade sazonal de umidade, podem apresentar fatores diferentes, e é possível que a própria intensidade da transferência se atenue quando a fração doadora é menos representativa. O balanço de massa hídrica não se fechou por completo com a medida de umidade em três frações, o que indica que parte da água transferida provém de componentes não medidos da matriz, como rejeitos sanitários e finos orgânicos; a conservação da água total, sustentada pela

ausência de diferença na umidade total entre métodos, permanece o alicerce do diagnóstico, mas a sua verificação por fração é, nesse aspecto, indireta. Esse não fechamento, contudo, é interpretável e não fragiliza o diagnóstico: a umidade da fração orgânica permaneceu praticamente constante entre os métodos, de modo que a água incorporada pelos recicláveis secos não pôde originar-se dela, e sim da matriz úmida difusa, o que localiza a origem da água sem exigir a medida individual de cada componente. A verificação direta por fração da totalidade da matriz é um refinamento desejável, não uma condição de validade do achado. A condição de massa constante na secagem foi verificada por pesagens sucessivas, e não por curvas de secagem sistemáticas, o que deixa em aberto a distinção fina entre a água removida e eventuais perdas de compostos voláteis a 110 °C, ainda que tais perdas, por serem comuns aos três métodos secos em condições idênticas, se cancelem no contraste entre eles. Soma-se a esses limites a distinção entre a componente hídrica e a componente sólida do ganho de massa dos recicláveis. A homogeneização promove, além da transferência de água, a aderência de matéria orgânica sólida à superfície de plásticos e papel/papelão, fenômeno observado em campo e não quantificado neste estudo, uma vez que a matéria sólida aderida não é removida na secagem e escapa à medida de umidade. Os fatores de correção aqui propostos, por corrigirem apenas a parcela hídrica, estabelecem um limite inferior do viés total de massa. A quantificação separada das duas componentes, água transferida e sólidos aderidos, constitui uma quarta direção de pesquisa, que completa a caracterização do viés de preparo iniciada nesta tese.

A agenda de validação que decorre desses limites tem três direções, e cada uma dialoga com uma linha já estabelecida na literatura de amostragem de resíduos. A primeira é a replicação do delineamento pareado em múltiplos sítios e ao longo de diferentes estações, para verificar se os fatores convergem para valores estáveis ou variam de modo sistemático com o clima e o perfil de geração; essa direção responde ao chamado de Esbensen e Velis (2016) por quantificação e controle confiáveis da incerteza e da variabilidade em resíduos, e a comparação entre sítios pode apoiar-se nos métodos de distância multivariada cuja aplicação a composições de RSU ao longo do tempo e do espaço foi demonstrada por Tonjes *et al*. (2025). A segunda é a medida da umidade nativa de todas as frações, e não apenas das três avaliadas, para fechar o balanço de massa hídrica e localizar a origem da água transferida. A terceira é o teste do compromisso entre viés hídrico e erro de segregação em lotes de tamanho crescente, articulado ao dimensionamento do número de amostras proposto por Wasserman, Anshassi e Townsend (2022) e por Gerassimidou, Velis e Komilis (2020b), de modo que a decisão sobre suprimir ou manter a homogeneização seja tomada com controle simultâneo do viés e da precisão. Essa

validação é o que distingue um fator de correção específico de um sítio de um parâmetro de referência aplicável à prática nacional de caracterização, e é a condição para que a proposição aqui formulada passe de recomendação técnica a emenda de norma.

8.6 CONCLUSÃO

A homogeneização mecânica prevista pelas normas de caracterização gravimétrica de RSU não é neutra. Isolada da redução de massa, ela redistribui umidade das frações úmidas para as secas, sem alterar a massa hídrica total da amostra, e infla a massa aparente dos recicláveis secos em proporção que alcança um quarto da massa reportada. O fenômeno constitui uma classe de erro de preparo que a teoria da amostragem, formulada para materiais inertes, não modela, e que só é neutralizável pela medida da umidade por fração ou pela supressão da etapa que o gera.

A leitura conjunta dos três estudos que compõem esta tese cumpre os objetivos específicos propostos. O primeiro, comparar os métodos de caracterização e avaliar a representatividade das frações, foi atendido pelo estudo do CIEB, que demonstrou a dependência de escala da fidelidade composicional e identificou a superestimação de papel/papelão como distorção associada à homogeneização. O segundo, quantificar a transferência de umidade entre as frações orgânica biodegradável, plástica e de papel/papelão, foi atendido pelo experimento pareado, que mediu ganhos de umidade entre vinte e um e vinte e sete pontos percentuais nas frações secas e caracterizou a fração orgânica biodegradável como reservatório, sob conservação da massa hídrica total. O terceiro, avaliar os efeitos da homogeneização sobre a caracterização, com foco na precisão dos recicláveis, foi atendido pela articulação dos dois estudos empíricos, que localizou o efeito na etapa de preparo e o converteu em fatores de correção. O quarto, propor ajustes à NBR 10.007, foi atendido pela proposição de ajuste normativo em quatro elementos formulada neste capítulo.

A contribuição da tese converte um efeito antes descrito de forma dispersa em um diagnóstico quantificado, localizado na etapa de preparo e traduzido em instrumento de correção. A proposição de ajuste normativo dele decorrente é modesta em exigência operacional e condicionada a validação multicontexto, mas altera o estatuto da etapa de homogeneização, de operação presumidamente neutra a fonte de erro sistemático que a norma deve reconhecer, medir e corrigir.

8.7 REFERÊNCIAS

ALFAIA, R. G. de S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: a review. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 12, p. 1195-1209, 2017. https://doi.org/10.1177/0734242X17735375

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 21 p.

ASTM INTERNATIONAL. **D5231-92(2016)**: standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

DAHLÉN, L.; LAGERKVIST, A. Methods for household waste composition studies. **Waste Management**, v. 28, n. 7, p. 1100-1112, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.014

EDJABOU, M. E.; JENSEN, M. B.; GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; PETERSEN, C.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Municipal solid waste composition: sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. **Waste Management**, v. 36, p. 12-23, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.009

EDJABOU, M. E.; MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Statistical analysis of solid waste composition data: arithmetic mean, standard deviation and correlation coefficients. **Waste Management**, v. 69, p. 13-23, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.036

ESBENSEN, K. H.; VELIS, C. Transition to circular economy requires reliable statistical quantification and control of uncertainty and variability in waste. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 12, p. 1197-1200, 2016. https://doi.org/10.1177/0734242X16674573

GERASSIMIDOU, S.; VELIS, C. A.; BOURNE, R. A.; KOMILIS, D.; GARCIA-TAENGUA, E.; WILLIAMS, P. T. Statistical quantification of sub-sampling representativeness and uncertainty for waste-derived solid recovered fuel (SRF): comparison with theory of sampling (ToS). **Journal of Hazardous Materials**, v. 388, p. 122013, 2020a. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.122013

GERASSIMIDOU, S.; VELIS, C. A.; KOMILIS, D. Establishing a sub-sampling plan for waste-derived solid recovered fuel (SRF). **Detritus**, v. 12, p. 3-15, 2020b. https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13991

GERLACH, R. W.; DOBB, D. E.; RAAB, G. A.; NOCERINO, J. M. Gy sampling theory in environmental studies. 1. Assessing soil splitting protocols. **Journal of Chemometrics**, v. 16, n. 7, p. 321-328, 2002. https://doi.org/10.1002/cem.720

GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; BOLDRIN, A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F. Physico-chemical characterisation of material fractions in residual and source-segregated household waste in Denmark. **Waste Management**, v. 54, p. 13-26, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.009

GY, P. M.; MARIN, L. Unbiased sampling from a falling stream of particulate material. **International Journal of Mineral Processing**, v. 5, n. 4, p. 297-315, 1978. https://doi.org/10.1016/0301-7516(78)90045-6

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a waste 2.0**: a global snapshot of solid waste management to 2050. Washington: World Bank, 2018. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

LEVERENZ, D.; SOUZA, R. G. de; CHRISTENSEN, T. H. Water losses during household waste characterization: an overlooked issue? **Waste Management**, v. 216, p. 115442, 2026. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115442

MAGRINHO, A.; SEMIÃO, V. On the effect of MSW moisture content on meeting target recycling rates. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 310-317, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.008

MARINO, A. L.; CHAVES, G. L. D.; DOS SANTOS JUNIOR, J. L. Do Brazilian municipalities have the technical capacity to implement solid waste management at the local level? **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 378-386, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.324

MOTA, A. R. S. da; SILVA, N. M. da. Gravimetric characterization of solid waste in the dump of the municipality of Coari, Amazonas, Brazil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 11, e09540, 2024. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-123

PITARD, F. F. **Theory of sampling and sampling practice**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2019.

SILVA MARTÍNEZ, R. D.; DÍAZ JIMÉNEZ, L.; AGUILAR JUÁREZ, O.; CARLOS HERNÁNDEZ, S. Characterization of municipal solid waste with the perspective of biofuels and bioproducts recovery in Northeast Mexico. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 26, n. 6, p. 3665-3680, 2024. https://doi.org/10.1007/s10163-024-02036-4

TONJES, D. J.; AGUILAR-VILLANUEVA, M.; ROY, E. D. Similarities and differences in waste composition over time and space determined by multivariate distance analyses. **PLoS ONE**, v. 20, n. 1, e0308367, 2025. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308367

WASSERMAN, M.; ANSHASSI, M.; TOWNSEND, T. G. Assessing sample number requirements for municipal solid waste composition studies. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 26, n. 4, 2022. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000652

WAVRER, P. Theory of sampling (TOS) applied to characterisation of municipal solid waste (MSW): a case study from France. **TOS Forum**, n. 9, p. 3-14, 2018. https://doi.org/10.1255/tosf.101

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese partiu de uma pergunta sobre uma etapa que a prática de caracterização gravimétrica de resíduos sólidos urbanos trata como rotina sem consequência: a homogeneização mecânica da amostra, prescrita pelos protocolos de amostragem antes da redução de massa. O percurso dos quatro capítulos mostrou que essa etapa não é neutra e que o seu efeito, até então não isolado, tem magnitude suficiente para comprometer decisões de gestão fundadas em dados gravimétricos.

A revisão integrativa da literatura estabeleceu o ponto de partida. O corpo consolidado de estudos de caracterização e o arcabouço teórico da amostragem de resíduos tratam a heterogeneidade como propriedade de composição e de tamanho de partícula, e não registram o efeito da homogeneização sobre a distribuição de umidade entre as frações. A mistura entre componentes de teor de água distinto havia sido descrita em nível de sistema de coleta, ao longo de dias, mas não como consequência do procedimento de amostragem aplicado a uma amostra já coletada. A lacuna assim identificada orientou os dois estudos empíricos.

O estudo comparativo conduzido no CIEB revelou dois resultados de ordens distintas. A massa efetivamente triada governa a detecção de categorias: a 21,53 kg, quatro das dez microcategorias desapareceram do registro, convertidas em ausências aparentes pela redução amostral prescrita na norma. A agregação em macrogrupos reduziu as distâncias composicionais entre protocolos de 1,4 a 2,6 vezes sob dimensão constante, mascarando divergência interna em vez de eliminá-la. O capítulo estabeleceu, ainda, o resultado metodológico que fundamenta o delineamento seguinte: com um protocolo por dia, método e dia de coleta ficam confundidos, e nenhuma divergência observada pode ser atribuída ao protocolo.

O experimento pareado isolou e quantificou o mecanismo. Ao submeter a mesma massa de resíduos a três métodos no mesmo dia, separou o efeito da homogeneização do efeito da redução de massa. A massa hídrica total da amostra não variou entre os métodos, enquanto plásticos e papel/papelão, originalmente secos, ganharam água e a fração orgânica biodegradável atuou como reservatório. A constância da água total combinada à variação por fração caracterizou uma redistribuição interna, distinta de uma perda por evaporação, e localizou o fenômeno na etapa de homogeneização. Dessa transferência derivaram-se fatores de correção específicos por fração e método, que indicam que parcela expressiva da massa aparente dos recicláveis secos, próxima de um quarto, corresponde a lixiviado absorvido, e não a material adicional.

A consolidação desses achados sustentou a contribuição central da tese. O viés hídrico documentado é uma classe de erro de preparo que a teoria da amostragem, formulada para materiais inertes cujas partículas permanecem invariantes ao manuseio, não modela. Em RSU, material higroscópico, a homogeneização transfere massa entre constituintes por um mecanismo físico que o arcabouço clássico não prevê. A tese propôs tratar essa redistribuição como categoria específica de erro de preparo e traduziu o diagnóstico em uma proposição de ajuste às normas de amostragem, articulada em quatro elementos, que reconhece o resíduo como material higroscópico, recomenda a triagem sem homogeneização quando o lote e a finalidade o permitirem, exige o reporte da composição em base seca por fração e determina o registro das condições que modulam o fenômeno. A proposição preserva os protocolos vigentes, mantém a comparabilidade das séries históricas e não exige instrumentação além da já empregada na rotina de caracterização.

As contribuições da tese situam-se em três planos. No plano teórico, estende o domínio de aplicação da teoria da amostragem a materiais que violam a premissa de invariância das partículas, ao nomear um erro de preparo não previsto. No plano metodológico, oferece fatores de correção que permitem retificar dados obtidos sob os protocolos normativos e uma alternativa de triagem que evita o viés em sua origem; demonstra, ainda, que o delineamento convencional de caracterização, um protocolo por campanha em dias distintos, é estruturalmente incapaz de testar a hipótese central, pois o confundimento entre protocolo e dia de coleta absorve o sinal buscado, demonstração que delimita a classe de delineamentos capaz de identificar o viés e explica por que a literatura técnica não o identificou anteriormente. No plano aplicado, alerta que o dimensionamento de unidades de triagem e de compostagem a partir de dados não corrigidos incorpora um erro sistemático, com custo direto onde a capacidade técnica instalada para a gestão de resíduos é limitada.

Os achados devem ser lidos à luz de seus limites. Os fatores de correção derivam de uma única instituição, com predomínio de fração orgânica biodegradável, e de campanhas realizadas em intervalo curto, o que recomenda cautela na transposição dos valores numéricos a outros perfis de geração. O balanço de massa hídrica não se fechou por completo com a medida de umidade em três frações, mas esse limite é interpretável: como a umidade da fração orgânica biodegradável permaneceu praticamente constante entre os métodos, a água incorporada pelos recicláveis secos não pôde originar-se dela, e sim da matriz úmida difusa, o que localiza a origem da água transferida sem comprometer o diagnóstico. Esses limites não comprometem o achado central, sustentado pela convergência entre a revisão, o estudo comparativo e o experimento pareado, mas delimitam o alcance da generalização.

Decorrem daí três direções de pesquisa. A primeira é a replicação do delineamento pareado em múltiplos sítios e ao longo de diferentes estações, para verificar se os fatores de correção convergem para valores estáveis ou variam de modo sistemático com o clima e o perfil de geração. A segunda é a medida da umidade nativa de todas as frações, e não apenas das três avaliadas, para fechar o balanço de massa hídrica e localizar a origem da água transferida. A terceira é o teste do compromisso entre o viés hídrico e o erro de segregação em lotes de tamanho crescente, para delimitar as condições em que a triagem integral sem homogeneização é operacionalmente viável e estatisticamente preferível ao quarteamento normativo. Esse conjunto de investigações é o que pode converter os fatores obtidos em um estudo de caso em parâmetros de referência aplicáveis à prática nacional de caracterização, e o que dará à proposição normativa aqui formulada a base empírica necessária para uma eventual revisão das normas ABNT NBR 10.007 e ASTM D5231.

10 DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Durante a elaboração desta tese, o autor utilizou ferramenta de inteligência artificial (Claude, Anthropic) como apoio à revisão e à organização de referências bibliográficas, à verificação de metadados e da consistência interna de dados, e ao aprimoramento da redação e da coesão do texto. As ferramentas não substituíram o delineamento da pesquisa, a coleta de dados em campo, a análise estatística original, nem a interpretação dos resultados e a formulação das conclusões, que são de responsabilidade do autor. Todo o conteúdo produzido com esse apoio foi revisado e validado pelo autor, que assume integral responsabilidade pela originalidade, pela integridade e pelo conteúdo final do trabalho.