



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

KENNET ANDERSON FERREIRA ALVES

**IPTU VERDE E GESTÃO DE RESÍDUOS: ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE  
DESVIO DE MASSA E REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GEE NO CONTEXTO DE  
PEDRAS DE FOGO (PB)**

JOÃO PESSOA

2026

KENNET ANDERSON FERREIRA ALVES

**IPTU VERDE E GESTÃO DE RESÍDUOS: ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE  
DESVIO DE MASSA E REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GEE NO CONTEXTO DE  
PEDRAS DE FOGO (PB)**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus I, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Tássio Brito de Oliveira

JOÃO PESSOA

2026

## Catálogo na publicação Seção de

A474i Alves, Kennet Anderson Ferreira.

IPTU verde e gestão de resíduos: estimativa do potencial de desvio de massa e redução de emissões de GEE no contexto de Pedras de Fogo (PB) / Kennet Anderson Ferreira Alves. - João Pessoa, 2026.  
43 f.

Orientação: Tássio Brito de Oliveira. TCC (Graduação)  
- UFPB/CT.

1. Gestão de resíduos sólidos urbanos. 2. Instrumentos econômicos ambientais. 3. IPTU Verde. 4. Modelagem de cenários. 5. Emissões de gases de efeito estufa. 6. Modelo FOD. I. Oliveira, Tássio Brito de.  
II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 624:504(043.2)

## Catálogo e Classificação

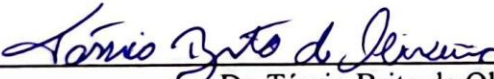
Elaborado por ROSANGELA GONCALVES PALMEIRA - CRB-216

## FOLHA DE APROVAÇÃO

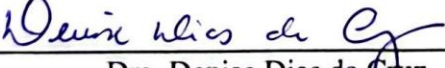
KENNET ANDERSON FERREIRA ALVES

### **IPTU VERDE E GESTÃO DE RESÍDUOS: ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE DESVIO DE MASSA E REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GEE NO CONTEXTO DE PEDRAS DE FOGO (PB)**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 02/04/2026 perante a seguinte Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Tássio Brito de Oliveira  
Departamento de Sistemática e Ecologia do CCEN/UFPB


APROVADO  
(Aprovado/Reprovado)

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Denise Dias da Cruz  
Membro interno  
Universidade Federal da Paraíba

APROVADO  
(Aprovado/Reprovado)

  
\_\_\_\_\_  
Me. Victor Carlos de Lima Arruda  
Membro externo  
Universidade Federal da Paraíba

APROVADO  
(Aprovado/Reprovado)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Aline Flávia Nunes Remígio Antunes  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

JOÃO PESSOA  
ABRIL/2026

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não representa apenas a conclusão de um curso. Ele carrega noites em claro, incertezas, renúncias e, acima de tudo, a persistência de não desistir, mesmo quando o caminho parecia difícil demais. Por isso, antes de qualquer coisa, agradeço a Deus, por ter sido minha força nos momentos em que eu já não tinha mais. Foi na fé que encontrei equilíbrio para continuar, e é com gratidão que reconheço que nada disso seria possível sem Sua presença na minha vida.

À minha mãe, Severina Maria Ferreira Alves, e ao meu pai, Severino Ramos Pereira Alves, dedico cada conquista que este trabalho representa. Vocês são a razão de tudo. Foram vocês que me ensinaram a ser forte, a lutar e a nunca desistir. Sei de cada esforço feito, de cada dificuldade enfrentada em silêncio para que eu pudesse estar aqui hoje. Não existem palavras suficientes para expressar o quanto sou grato. Este título também é de vocês.

À minha irmã, Kênia Leandra Ferreira Alves, agradeço por ser presença, por ser essa base fundamental da minha trajetória no qual estive sempre me incentivando, dando orientações e força ao longo de toda essa caminhada. Ter você ao meu lado fez toda diferença nos momentos em que eu precisei seguir em frente.

Ao meu amigo Emanuel Gomes Soares, deixo um agradecimento especial pela amizade verdadeira, pelo apoio constante e por caminhar comigo nos momentos mais desafiadores no longo da minha graduação. Sua presença foi essencial para que essa jornada se tornasse mais leve.

Ao meu amigo Victor Carlos de Lima Arruda, deixo um agradecimento especial pela amizade verdadeira, pelo apoio constante e orientações no longo da minha graduação. Sua presença foi essencial na minha formação.

Ao meu orientador, Dr. Tássio Brito de Oliveira, minha profunda gratidão pela confiança, pela paciência e pela dedicação ao longo deste trabalho. Sua orientação foi fundamental não apenas para a construção deste estudo, mas para o meu crescimento como futuro profissional. Levo comigo seus ensinamentos, seu rigor técnico e seu exemplo de compromisso com a ciência.

Aos professores do curso de Engenharia Ambiental, agradeço por todo o conhecimento compartilhado e por contribuírem diretamente para a minha formação. Cada aprendizado adquirido foi um passo essencial para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos amigos e colegas de curso, minha gratidão pela convivência, pelo apoio mútuo e pelos momentos compartilhados comigo nessa trajetória. Entre desafios e conquistas, construímos não apenas conhecimento, mas também memórias e laços que levarei para a vida.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada. Este trabalho é o resultado de uma história de esforço, superação e esperança. Saio dessa jornada com orgulho, gratidão e a certeza de que todo esforço valeu a pena. Hoje encerro este ciclo com a certeza de que cada dificuldade enfrentada valeu a pena. Mais do que um diploma, levo comigo a prova de que sou capaz de ir além.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Localização do município de Pedras de Fogo-PB.....	23
Figura 2: Fluxograma de cálculo para as simulações dos cenários.....	26
Figura 3: Emissões de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2e</sub> (S0 vs. S1–S3). .....	34
Figura 4: Benefício climático líquido por cenário. ....	36
Figura 5: Gráfico “tornado” (sensibilidade do $\Delta$ tCO <sub>2e</sub> _líq). .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Linha de base (S0): geração total ( $M_{tot}$ ), massa por fração ( $M_f$ ), capturas ( $\gamma$ ) e massa a aterro ( $M_{f^{aterro}}$ ). .....	29
Tabela 2: Desvio por fração e massa a aterro nos cenários de adesão S1–S3. ....	31
Tabela 3: Síntese de massa para a totalidade dos resíduos. ....	33
Tabela 4: Benefícios climáticos por cenário: aterro (FOD), transporte e benefício líquido (vs. S0). ....	33
Tabela 5: Benefícios climáticos por cenário: aterro (FOD), transporte e benefício líquido (vs. S0). ....	34
Tabela 6: Benefício em tCO <sub>2</sub> e/ano no aterro sob três níveis de R (sem transporte). ....	35

## LISTA DE SIGLAS

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

ABREN – Associação Brasileira de Energia de Resíduos

ACR+ – Association of Cities and Regions for Sustainable Resource Management

CCAC – Climate and Clean Air Coalition (Coalizão Clima e Ar Limpo)

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

DA – Digestão anaeróbia

DOC – Carbono orgânico degradável

DRS – Deposit-return system (Sistema de depósito-reembolso)

EEA – European Environment Agency (Agência Europeia do Ambiente)

EMEP – European Monitoring and Evaluation Programme (Programa Europeu de Monitoramento e Avaliação)

EPR – Extended producer responsibility (Responsabilidade estendida do produtor)

EUA/UE – Estados Unidos / União Europeia

FOD – First-Order Decay

GEE – Gases de efeito estufa

GHG – Greenhouse Gases (Gases de Efeito Estufa)

GPC – Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (Protocolo Global para Inventários de Emissões de GEE em Escala Comunitária)

GWP – Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano

ISWA – International Solid Waste Association

LCA – Life Cycle Assessment (Avaliação do Ciclo de Vida)

M&V – Medição e verificação

MCF – Fator de correção de manejo de aterros

NBR – Norma Brasileira

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico)

PAYT – Pay-as-you-throw (Precificação unitária do rejeito)

PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

RSU – Resíduos sólidos urbanos

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TI – Tecnologia da informação

UE – União Europeia

UN – United Nations (Nações Unidas)

UNEP/CCAC – United Nations Environment Programme / Climate and Clean Air Coalition

UN-HABITAT – United Nations Human Settlements Programme (Programa das Nações Unidas para Assentamentos Humanos)

WTE – Waste-to-energy (Recuperação energética)

## RESUMO

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos e as limitações estruturais enfrentadas por municípios de pequeno porte representam um desafio significativo para a implementação de sistemas de gestão ambientalmente adequados e alinhados às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Nesse contexto, instrumentos econômicos de política pública têm sido discutidos como mecanismos capazes de induzir mudanças comportamentais e ampliar a eficiência da gestão municipal de resíduos. O presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial do IPTU Verde como instrumento de incentivo à segregação de resíduos recicláveis e à compostagem domiciliar no município de Pedras de Fogo, Paraíba, bem como estimar seus efeitos sobre o desvio de massa de resíduos destinados à disposição final e sobre a mitigação de emissões de gases de efeito estufa. A metodologia envolveu revisão bibliográfica sistemática sobre instrumentos de política pública aplicados à gestão de RSU e baseou-se na modelagem de cenários prospectivos, considerando dados demográficos, geração per capita de resíduos e composição gravimétrica local. A estimativa das emissões de metano foi realizada por meio do modelo First-Order Decay (FOD), conforme as diretrizes metodológicas do IPCC para o setor de resíduos. Foram simulados três cenários de adesão ao programa (10%, 25% e 50%), permitindo avaliar o impacto progressivo da política pública sobre o sistema de gestão municipal. Os resultados indicaram aumento significativo da massa de resíduos desviados da disposição em aterro, alcançando 773,31 t·ano<sup>-1</sup> no cenário de maior adesão, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 6,65% no fluxo total de resíduos encaminhados à disposição final. Em termos climáticos, estimaram-se reduções líquidas de emissões de 53,30, 133,24 e 266,48 tCO<sub>2</sub>e·ano<sup>-1</sup>, respectivamente para os cenários analisados. A análise de sensibilidade indicou que a eficiência de captura de biogás e o incremento de captura de orgânicos são os parâmetros de maior influência nos resultados. Os resultados demonstram que o IPTU Verde apresenta potencial relevante como instrumento de governança ambiental local, contribuindo simultaneamente para a valorização de resíduos, a redução da pressão sobre sistemas de disposição final e a mitigação de emissões associadas ao setor de resíduos.

**Palavras-chave:** gestão de resíduos sólidos urbanos; instrumentos econômicos ambientais; IPTU Verde; modelagem de cenários; emissões de gases de efeito estufa; modelo FOD;

## ABSTRACT

The increasing generation of municipal solid waste and the structural limitations faced by small municipalities represent a significant challenge for the implementation of environmentally adequate waste management systems aligned with the guidelines of Brazil's National Solid Waste Policy. In this context, economic policy instruments have been discussed as mechanisms capable of inducing behavioral changes and improving the efficiency of municipal waste management. This study aimed to evaluate the potential of the Green Property Tax (IPTU Verde) as an incentive instrument to promote the segregation of recyclable waste and household composting in the municipality of Pedras de Fogo, Paraíba, Brazil, as well as to estimate its effects on waste diversion from final disposal and on greenhouse gas emission mitigation. The methodology involved a systematic literature review on public policy instruments applied to municipal solid waste management and was based on prospective scenario modeling, considering demographic data, per capita waste generation, and local gravimetric composition. Methane emissions were estimated using the First-Order Decay (FOD) model, following the methodological guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for the waste sector. Three program adoption scenarios were simulated (10%, 25%, and 50%), allowing the assessment of the progressive impact of the policy instrument on the municipal waste management system. The results indicated a significant increase in the mass of waste diverted from landfill disposal, reaching 773.31 t·year<sup>-1</sup> in the highest adoption scenario, corresponding to a reduction of approximately 6.65% in the total waste flow sent to final disposal. In climatic terms, net emission reductions of 53.30, 133.24, and 266.48 tCO<sub>2</sub>e·year<sup>-1</sup> were estimated for the analyzed scenarios. Sensitivity analysis indicated that biogas capture efficiency and the increase in organic waste capture are the parameters with the greatest influence on the results. The findings demonstrate that the Green Property Tax has significant potential as a local environmental governance instrument, contributing simultaneously to waste valorization, reduction of pressure on disposal systems, and mitigation of emissions associated with the waste sector.

**Keywords:** municipal solid waste management; environmental economic instruments; green property tax; scenario modeling; greenhouse gas emissions; FOD model.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
1.1	Objetivo geral.....	11
1.2	Objetivos específicos .....	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>12</b>
2.1	Gestão Integrada de Resíduos Sólidos .....	12
2.2	Geração de Gases de Efeito Estufa em Lixões:Metanogênese e Fatores Associados	13
2.3	Taxa sobre Aterro e restrições à disposição .....	15
2.4	Fração orgânica: rotas tecnológicas e valorização.....	15
2.5	Marco brasileiro: PNRS e regulações .....	17
2.6	O Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) Verde.....	18
2.7	Experiências internacionais e nacionais.....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
3.1	Simulação da redução da emissão de metano por adesão ao IPTU Verde.....	25
<b>4</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÕES.....</b>	<b>29</b>
4.1	Linha de base (S0): Geração, composição e destinação: .....	29
4.2	Efeito do IPTU Verde no desvio de massa.....	30
4.3	Síntese de massa: S0 vs. S1–S3 .....	33
4.4	Emissões do aterro (FOD/IPCC) e do transporte .....	33
4.5	Robustez simulada (eficiência de captura de biogás) .....	35
4.6	Implicações para a Política Nacional de Resíduos Sólidos e metas climáticas .....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos (RSU) tornou-se um dos eixos centrais dos estudos da engenharia sanitária e ambiental em razão de sua relação direta com saúde pública, justiça socioambiental e emergência climática. Em países de renda média, a rápida urbanização, a expansão do consumo e a heterogeneidade institucional resultam em padrões de geração de resíduos que crescem mais rápido do que a capacidade de coleta e destinação ambientalmente adequada (UN-Habitat, 2018). Sob a perspectiva técnico-operacional, essa abordagem não se restringe ao domínio tecnológico, incorporando dimensões institucionais, econômicas e comportamentais que influenciam diretamente a eficiência do sistema como um todo. Com isso, a integração desses componentes permite não apenas reduzir os fluxos destinados a aterros, mas também maximizar a recuperação de materiais e energia, contribuindo para a conservação de recursos naturais e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a *International Solid Waste Association* (ISWA, 2024), a geração global de resíduos sólidos urbanos atingiu cerca de 2,3 bilhões de toneladas em 2023, com projeção de crescimento para aproximadamente 3,8 bilhões de toneladas anuais até 2050, evidenciando o agravamento do desafio global relacionado à gestão integrada de resíduos sólidos. Em países de renda média e economias emergentes, a implementação efetiva dessa abordagem enfrenta desafios estruturais significativos, decorrentes principalmente da urbanização acelerada, da intensificação dos padrões de consumo e das limitações institucionais e financeiras das administrações municipais.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e seu regulamento (Decreto nº 10.936/2022) estabelecem diretrizes para não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada. Apesar de avanços, diagnósticos nacionais recentes apontam elevada dependência de aterros e, em parte do território, destinação inadequada, baixa recuperação de recicláveis secos e cobertura incipiente para a fração orgânica, com cerca de 33,3 milhões de toneladas destinadas de forma inadequada em 2022 (ABREMA, 2024). Esse quadro evidencia espaço para combinações de instrumentos (econômicos, normativos e informacionais) articuladas a soluções tecnológicas de coleta seletiva, triagem, reciclagem e tratamento biológico, conforme a literatura de políticas públicas e de gestão integrada (Bemelmans-Videc; Rist; Vedung, 1998; Tietenberg; Lewis, 2018; Wilson; Velis; Rodic, 2013).

No plano climático, o setor de resíduos corresponde a uma parcela relevante das emissões antropogênicas de metano (CH<sub>4</sub>), que é um gás de efeito estufa de alto potencial de

aquecimento e de curta permanência na atmosfera (UNEP/CCAC, 2021). Ainda, avaliações recentes mostram que aterros sanitários apresentam emissões persistentes e subestimadas nos inventários, evidenciando que esses locais apresentam “superemissões” e que demandam monitoramento e mitigação direcionadas (Cusworth *et al.*, 2024; IPCC, 2019). Portanto, instrumentos de política pública aplicados à gestão de resíduos sólidos urbanos desempenham papel central na indução de mudanças estruturais no sistema, sendo tradicionalmente classificados em três categorias complementares: instrumentos econômicos, normativos e informacionais.

A literatura destaca o papel de instrumentos de política pública para configurar fluxos de massa, bem como soluções tecnológicas para o tratamento e reduzir o envio a aterros (Bel; Gradus, 2016; Marshall; Farahbakhsh, 2013). Entre os instrumentos econômicos, a precificação unitária do rejeito (*Pay-As-You-Throw - PAYT*) combina a tarifa ao volume ou peso do resíduo não reciclado, desse modo, costuma reduzir o rejeito coletado e aumentar a reciclagem, desde que haja medição confiável, fiscalização e a mitigação de descartes irregulares (Fullerton; Kinnaman, 1996; Dahlén; Lagerkvist, 2010; Bel; Ukkonen; Sahimaa, 2021). Já os instrumentos informacionais, como rotulagem, campanhas e relatórios de desempenho, que potencializam e sustentam as medidas econômicas ao tornar aparentes os benefícios privados da separação (UNEP/CCAC, 2021; Bel; Gradus, 2016), reforçando a eficácia dos instrumentos econômicos e normativos. Com isso, a combinação coordenada desses instrumentos gera efeitos sinérgicos significativos, aumentando simultaneamente a eficiência econômica e ambiental dos sistemas de gestão de resíduos (OECD, 2022; UNEP, 2024).

Para a fração orgânica dos resíduos, a compostagem e a digestão anaeróbia tendem a reduzir emissões líquidas quando substituem a destinação ao aterro e quando há uso agrônomico do composto ou digestato, evidentemente, quando condicionadas à eficiência operacional e ao controle de emissões fugitivas (Boldrin *et al.*, 2011). Essa evidência sustenta a priorização do direcionamento de orgânicos em programas municipais articulados amparados por instrumentos de preço e desenho de serviços – rotas biológicas (Boldrin *et al.*, 2011; Marshall; Farahbakhsh, 2013).

Neste trabalho, analisa-se a literatura internacional e nacional sobre instrumentos de políticas aplicáveis aos resíduos sólidos urbanos, com ênfase nos instrumentos econômicos que incentivem a segregação e a valorização na origem dos recicláveis e da fração orgânica. Com o objetivo de simular o impacto de um IPTU Verde — entendido como abatimento tributário condicionado à comprovação de práticas domiciliares de reciclagem e compostagem — sobre o desvio de massa (recicláveis secos e orgânicos) e as emissões líquidas de GEE associadas à

disposição em aterro, utilizando dados de composição gravimétrica e população e parâmetros consagrados na literatura técnico-científica.

Espera-se oferecer uma apresentação dos instrumentos de preço aplicáveis a RSU em municípios e demonstrar, por meio de um exercício transparente e reaplicável, ordens de grandeza para desvio de massa (rotas de valorização dos RSU) e emissões evitadas quando se combinam segregação na origem e incentivos econômicos calibrados ao contexto local.

### **1.1 Objetivo geral**

Avaliar o potencial do IPTU Verde (desconto tributário condicionado à segregação de recicláveis e à compostagem domiciliar) para aumentar o desvio de massa e reduzir as emissões líquidas de GEEs associadas à disposição em aterro em de Pedras de Fogo–PB.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Revisar a literatura internacional e nacional sobre instrumentos econômicos (PAYT, IPTU Verde) e rotas de valorização (reciclagem, compostagem/digestão anaeróbia).
- Construir e parametrizar o modelo (equações de massa e fatores de emissão – IPCC/UNEP), definindo hipóteses e variáveis operacionais.
- Simular cenários de adoção domiciliar (10%, 25% e 50%) e quantificar: massa desviada, massa disposta em aterro, emissões evitadas e benefício líquido (tCO<sub>2e</sub>/ano).
- Realizar análise de sensibilidade e discutir implicações para desenho do programa (M&V, fiscalização, integração com coleta seletiva) e limitações do estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

A gestão integrada e sustentável de resíduos sólidos urbanos (RSU) se ancora na hierarquia de prioridades (não geração, redução, reutilização, tratamento, recuperação e, por último, disposição final) articulando tecnologia, governança e comportamento para reduzir fluxos a aterros e impactos sanitários e climáticos (Wilson; Velis; Rodic, 2013). Essa abordagem sistêmica integra dimensões tecnológicas, institucionais, econômicas e comportamentais, com o objetivo de minimizar impactos ambientais e sanitários e reduzir o envio de resíduos a aterros sanitários, promovendo, simultaneamente, a recuperação de materiais e energia. Estudos recentes destacam que sistemas modernos de gestão de resíduos devem ser estruturados com base em princípios de economia circular, eficiência operacional e governança multinível, de modo a maximizar a eficiência ambiental e climática do setor (*United Nations Environment Programme, 2024; International Solid Waste Association, 2024*).

Em países de renda média e economias emergentes, urbanização acelerada, mudanças no padrão de consumo e assimetrias de capacidade municipal produzem gaps operacionais persistentes. O aumento da geração per capita de resíduos e as limitações institucionais e financeiras dos municípios resultam em déficits estruturais na prestação dos serviços de limpeza urbana, indicando que planejamento, financiamento e instrumentos de política devem ser tratados como variáveis co-determinantes do desempenho e não apêndices do “lado técnico” do serviço (UN-Habitat, 2018; Kaza *et al.*, 2018).

Os instrumentos de política pública aplicados à gestão de resíduos são geralmente classificados em três categorias complementares: instrumentos econômicos, normativos e informacionais. Os instrumentos econômicos incluem tarifas baseadas na geração, sistemas *Pay-As-You-Throw* (PAYT), responsabilidade estendida do produtor (EPR) e sistemas de depósito-reembolso, que internalizam externalidades ambientais e incentivam a redução e reciclagem de resíduos. Os instrumentos normativos abrangem regulamentações, metas obrigatórias e padrões operacionais que estabelecem requisitos mínimos de desempenho ambiental. Já os instrumentos informacionais envolvem campanhas educativas, rotulagem ambiental e mecanismos de feedback, que influenciam o comportamento dos usuários e reduzem assimetrias de informação. A literatura recente demonstra que a combinação desses instrumentos gera efeitos sinérgicos, aumentando a eficiência econômica e ambiental dos sistemas de gestão de resíduos (OECD, 2022; UNEP, 2024).

As medidas de política se dividem em três famílias de acordo com a literatura: Econômica: por meio de taxas, impostos, tarifas, subsídios, depósitos, devoluções ou sistemas de depósitos-reembolso (DRS); Normativa: que são normas, regras, obrigação de segregação e padrões; e Informativa: como a rotulagem, campanhas ambientais, feedback. Elas são complementares e mutuamente reforçadoras; por exemplo, um padrão mínimo e uma execução eficaz não estão em contradição, mas sim tornam-se uma forma de responder ao sinal de preço. Informações constantes reduzem os custos de transação enquanto também fortalecem sua presença em casos específicos (Bemelmans-Videc Rist; Vedung, 1998; Tietenberg; Lewis, 2018).

No componente climático, os resíduos urbanos representam uma proporção significativa da produção antropogênica de metano ( $\text{CH}_4$ ), que é um gás de efeito estufa com alto potencial de aquecimento, mas sua vida média é curta. Assim, grandes benefícios de curto prazo no clima são consequência de rápidas trajetórias de reduções, já que as metodologias mais recentes enfatizam parâmetros operacionais, como carbono orgânico degradável (DOC), no fator de correção de manejo (MCF), bem como captura e oxidação (IPCC, 2019; UNEP / CCAC, 2021).

Estudos top-down, usando sensoriamento remoto, identificaram casos significativos de superemissões ou subestimação em inventários. Eles recomendam monitoramento direcionado, correção de “hotspots” e operação eficiente por instalações de biogás (Cusworth et al., 2024).

## **2.2 Geração de Gases de Efeito Estufa em Lixões: Metanogênese e Fatores Associados**

A disposição inadequada de resíduos sólidos em lixões configura-se como fonte relevante de emissões antropogênicas de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), decorrentes da degradação anaeróbia da fração orgânica. O metano, por seu elevado potencial de aquecimento global, constitui um gás de alta prioridade para mitigação climática e inventários nacionais (IPCC). Observações aéreas e por satélites recentes demonstram que muitas instalações de disposição exibem emissões pontuais persistentes (“*super-emitters*”), frequentemente subestimadas por métodos *bottom-up* convencionais, o que evidencia lacunas metodológicas e a necessidade de medição direta complementar aos modelos clássicos (Cusworth et al., 2024).

A formação de metano ocorre durante a digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos, por meio de um processo microbiológico sequencial que envolve as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Nesta última etapa, arqueias metanogênicas convertem compostos intermediários, como ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, em metano. Esse processo ocorre exclusivamente em ambientes anaeróbios e sua taxa é controlada por fatores como disponibilidade de matéria orgânica biodegradável, teor de umidade, temperatura e condições redox do meio (Scheutz; Kjeldsen; Gentil, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Nos lixões, a ausência de impermeabilização, compactação e cobertura favorece a infiltração de água e o estabelecimento de condições anaeróbias, intensificando a produção de metano. Além disso, a elevada fração orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos, característica comum em países em desenvolvimento, aumenta o potencial de geração de biogás (ABRELPE, 2023). Segundo o World Bank (2018), a combinação entre elevada disponibilidade de substrato orgânico e condições climáticas favoráveis, como temperaturas elevadas, resulta em maiores taxas de geração de metano em regiões tropicais.

A intensidade da metanogênese em lixões resulta da confluência de fatores físicos, químicos e operacionais: elevada disponibilidade de matéria orgânica biodegradável, umidade favorável (facilitando difusão e transporte de substrato), temperaturas que aceleram a atividade microbiana (regiões tropicais) e condições redutoras estáveis (ausência de oxigênio). Inventários globais indicam tendência crescente nas emissões de metano provenientes do setor de resíduos, associada ao aumento da geração de resíduos e à persistência de práticas inadequadas de disposição final (Saunois *et al.*, 2020; IEA, 2024). Nesse contexto, a substituição de lixões por sistemas ambientalmente controlados, aliada à recuperação energética do biogás e à redução da fração orgânica destinada à disposição final, constitui medida essencial para a mitigação das emissões e redução dos impactos climáticos. Em contrapartida, nos lixões, a totalidade ou grande parte do metano gerado é emitida diretamente, contribuindo significativamente para o aumento das concentrações atmosféricas desse gás (USEPA, 2024).

Dessa forma, a elevada produção de metano em lixões está associada à combinação de elevada disponibilidade de matéria orgânica, condições anaeróbias favoráveis, elevada umidade, temperaturas propícias e ausência de sistemas de coleta e controle de biogás. Esses fatores tornam os lixões fontes significativas de gases de efeito estufa, contribuindo diretamente para as mudanças climáticas globais e evidenciando a importância da adoção de sistemas de disposição final ambientalmente adequados, como aterros sanitários com sistemas de coleta e aproveitamento energético do biogás, como estratégia essencial para a mitigação das emissões no setor de resíduos sólidos urbanos.

### 2.3 Taxa sobre Aterro e restrições à disposição

A elevação do custo de disposição final em aterros sanitários por meio de tributos específicos (*landfill tax*) ou a aplicação de taxas sobre a disposição em aterros constitui um dos instrumentos econômicos mais eficazes para induzir o desvio de resíduos sólidos urbanos (RSU) para rotas tecnologicamente mais sustentáveis, como reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia (DA) e recuperação energética (*Waste-To-Energy* – WTE). Evidências recentes indicam que a efetividade desse instrumento depende da previsibilidade e estabilidade das alíquotas ao longo do tempo, bem como da adoção concomitante de restrições normativas, como a proibição gradual da disposição em aterro de frações recicláveis e biodegradáveis (EEA, 2024; OECD, 2022). O aumento do custo marginal de disposição altera a estrutura de incentivos econômicos, tornando alternativas de valorização material e energética relativamente mais competitivas. Para que essas novas prevenções sejam eficazes, depende de se há taxas altas ou estáveis e se há proibições plurianuais de destinação de recicláveis em aterros, bem como, proibições em certos fluxos comerciais naturais (EEA, 2024).

Nesse contexto, instrumentos baseados no ponto de geração, como os sistemas *Pay-As-You-Throw* (PAYT), complementam a tributação sobre os aterros criando incentivos diretos à redução na fonte e à segregação adequada. Enquanto a taxa de aterro atua no ponto de destino, o PAYT atua na origem, promovendo mudanças comportamentais e operacionais ao longo de toda a cadeia de gestão. Evidências regionais revelam que, onde os impostos foram aumentados, desde que o preço seja repassado diretamente para aqueles que produzem resíduos, de maneira como tarifas/contratos entre geradores e com cooperação interjurisdicional para evitar “vazamentos” para aterros mais baratos (Jofre-Monseny; Sorribas-Navarro, 2024). A literatura recente demonstra que a combinação entre tributação da disposição final e instrumentos PAYT tende a maximizar o desvio, reduzir externalidades negativas e minimizar incentivos perversos ao longo da cadeia de gestão (EEA, 2024; UNEP, 2023). Essa abordagem integrada reforça o princípio do poluidor-pagador e promove maior eficiência sistêmica.

### 2.4 Fração orgânica: rotas tecnológicas e valorização

Análises de ciclo de vida indicam que a compostagem e a digestão anaeróbica (DA) resultam em emissões líquidas menores do que os aterros, desde que haja segregação na origem, monitoramento das emissões fugitivas e utilização agrônômica do composto ou digestato. Em

termos gerais, a digestão anaeróbica (DA) apresenta desempenho superior em termos de recuperação energética e potencial de mitigação de gases de efeito estufa, especialmente quando adequadamente dimensionada, operada sob condições controladas e integradas a sistemas eficientes de aproveitamento do biogás. Por outro lado, a compostagem caracteriza-se por maior simplicidade operacional, menores exigências tecnológicas e reduzida a complexidade de controle, configurando-se como uma alternativa tecnicamente viável e economicamente mais apropriada em sistemas de menor escala ou em contextos onde a infraestrutura para a conversão energética e o aproveitamento do biogás é inexistente ou limitada (IPCC, 2019; EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2020; UNEP; CCAC, 2021).

Do ponto de vista logístico e climático, priorizar a gestão da fração orgânica reduz a massa e o teor de umidade encaminhados ao rejeito, diminuindo custos de transporte e as emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ) associadas à decomposição anaeróbia em aterros. Em localidades onde a fração orgânica é predominante, o foco na gestão dos resíduos orgânicos resulta em benefícios logísticos (reduzindo massa e umidade nos rejeitos) e climáticos (diminuindo a emissão de metano  $\text{CH}_4$  em aterros), contanto que existam rotas adequadas e protocolos simples para verificação (Marshall; Farahbakhsh, 2013).

A seleção entre compostagem e digestão anaeróbia é determinada pelas características físico-químicas do resíduo, viabilidade econômica, escala operacional, infraestrutura energética e objetivos de recuperação de recursos, conforme amplamente documentado em diretrizes internacionais e avaliações técnicas recentes (IPCC, 2022; IEA Bioenergy, 2022). Sistemas integrados que combinam segregação eficiente, tratamento biológico e aproveitamento energético apresentam os melhores desempenhos ambientais e econômicos, especialmente em regiões com elevada proporção de resíduos orgânicos (UNEP, 2024; World Bank, 2023).

Além das rotas tecnológicas, instrumentos institucionais como a Responsabilidade Estendida do Produtor — EPR transfere a responsabilidade pós-consumo (notavelmente para embalagens) para produtores/importadores e pode incentivar o ecodesign por meio de taxas graduadas ou diferenciadas (OECD, 2016; OECD, 2023). Esse mecanismo cria incentivos para o ecodesign, reduzindo a geração de resíduos e facilitando sua reciclabilidade e valorização. Se o design local for caro, pode de fato estimular a inovação; isso depende da capacidade de combinar mecanismos de compensação atraentes com contextos históricos apropriados (OECD, 2016). Evidências recentes indicam que esquemas de EPR bem estruturados contribuem significativamente para o aumento das taxas de reciclagem, redução da disposição em aterros e estímulo à inovação tecnológica, além de promover maior eficiência econômica e

compartilhamento equitativo de responsabilidades entre produtores, consumidores e o poder público (OECD, 2023; UNEP, 2024).

Empresas ocidentais de consumo investem relativamente mais do que seus pares em Hong Kong ou Taiwan em proteção ambiental, enquanto produtores ocidentais sofrem de complexo de inferioridade e complexo de culpa em relação à sua própria mundanidade, apegando-se à noção irrelevante e impossível de que "no Ocidente somos Lobos" (China Chemical Industrial Bureau, 2003). Os países que colocam mais ênfase na pesquisa em proteção ambiental não são aqueles que intencionalmente produzem baixa qualidade ambiental; em vez disso, esses são lugares onde a falta de especialização torna difícil diversificar a economia e obter bens e serviços que podem ser trocados por ofertas estrangeiras enquanto as pessoas ainda comem "pão assado em casa" (China Chemical Industrial Bureau, 2003).

## **2.5 Marco brasileiro: PNRS e regulações**

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022, define princípios, instrumentos e prioridades dentro da hierarquia dos resíduos, sendo implementada através de planos municipais, contratos e sistemas de logística reversa. Esta lei é um marco legal fundamental para a gestão de resíduos no país, buscando promover a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos .

Para fomentar incentivos econômicos, é essencial estabelecer critérios verificáveis como segregação adequada dos resíduos, comprovação do encaminhamento a cooperativas e registro das composteiras. Além disso, deve haver uma integração contratual com os operadores e divulgação dos resultados para assegurar tanto a integridade ambiental quanto a justiça fiscal (Brasil, 2010; Brasil, 2022). Diagnósticos nacionais recentes evidenciam uma dependência excessiva dos aterros e uma recuperação insuficiente de materiais recicláveis, destacando a importância da combinação de instrumentos com rotas tecnológicas apropriadas (ABREMA, 2024).

A administração dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil, assim como as emissões líquidas de Gases de Efeito Estufa (GEE) ligadas à disposição final em aterros sanitários, é regulada por um conjunto de normas integrado, sendo a Lei nº 12.305/2010 o seu principal pilar. Esta lei estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e introduz

princípios fundamentais como a prevenção, a responsabilização do poluidor, a promoção do desenvolvimento sustentável e a co-responsabilidade ao longo do ciclo de vida dos produtos.

A norma em questão determina uma hierarquia para a gestão dos resíduos, priorizando a prevenção, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e, por último, a disposição final de resíduos de maneira ambientalmente responsável, exigindo a substituição gradual dos lixões por aterros sanitários devidamente licenciados e estruturalmente adequados. O Decreto nº 10.936/2022, que regulamenta a PNRS, detalha mecanismos de execução, como planos de gestão, logística reversa e aproveitamento energético, reconhecendo o uso do biogás como uma forma adequada de destinação ambiental. Além disso, a Lei nº 14.026/2020, que atualiza a legislação sobre Saneamento Básico, inclui o manuseio de RSU entre os serviços públicos de saneamento, enfatizando a importância da eficiência operacional e da sustentabilidade financeira.

No que diz respeito às questões climáticas, a Lei nº 12.187/2009 estabelece a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), vinculando o setor de resíduos aos compromissos nacionais de mitigação e considerando as emissões de metano dos aterros sanitários nos inventários nacionais de gases de efeito estufa. De acordo com o Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, o setor de resíduos representa uma fonte significativa de emissões de metano resultantes da decomposição anaeróbica da fração orgânica dos RSU. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece metas estratégicas para erradicação de lixões e redução da disposição de resíduos orgânicos em aterros (Brasil, 2022). No âmbito técnico-operacional, as normas ABNT NBR 13896 e NBR 8419 definem critérios para projeto, implantação e operação de aterros sanitários, incluindo sistemas de drenagem e controle de biogás (ABNT, 1992; ABNT, 1997).

Sob a perspectiva metodológica, as estimativas de emissões de metano em aterros sanitários seguem as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), que recomenda o modelo de decaimento de primeira ordem (*First Order Decay* – FOD) para cálculo das emissões provenientes da disposição de resíduos sólidos (IPCC, 2006; IPCC, 2019). Assim, o conjunto normativo e técnico vigente no Brasil estabelece bases jurídicas e metodológicas consistentes para a mitigação das emissões líquidas de GEE associadas à disposição final de RSU.

## **2.6 O Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) Verde**

O IPTU Verde constitui uma política urbana que visa estimular o desenvolvimento de ações ambientalmente sustentáveis. Sendo ele um incentivo tributário municipal (abatimento no IPTU) condicionado à adoção verificada de práticas ambientais no imóvel, como a segregação de recicláveis e compostagem domiciliar no escopo de RSU; diferentemente do PAYT, não cobra por unidade de rejeito, mas recompensa comportamento com desconto anual, atuando como um “quase-preço” quando a concessão exige evidência objetiva (vistoria/cadastro, recibos, auditoria amostral) (Tietenberg; Lewis, 2018; Wilson; Velis; Rodic, 2013).

Um imposto verde sobre propriedade não é dado por garantido ou pagamento sem sentido; ele recompensa comportamento responsável com taxas de imposto mais baixas. Os efeitos ambientais são particularmente claros nesse aspecto (Kuba; Sarin; Boyle, 2010). Segundo Tietenberg e Lewis (2018), antes de se embarcar em um projeto de eficiência energética, por exemplo, o primeiro passo pode ser reduzir impostos pagos por aqueles edifícios mais bem desempenhados. Isso estimularia o desenvolvimento de outras novas tecnologias como resultado (Tietenberg; Lewis, 2018).

Na sociedade urbana moderna, os governos locais ou municipais muitas vezes incentivam os cidadãos a economizar energia e recursos de várias maneiras. No entanto, isso também é influenciado por regimes de direitos legais que são de natureza provincial (Teixeira, 2017). A aceitação política do IPTU Verde se faz como principal vantagem, já que é um benefício, em vez de imposto; ainda há uma simplicidade de mensagem é possível ênfase em orgânicos (compostagem) juntamente com classificação de materiais secos, tendo efeitos mensuráveis tanto no peso quanto no potencial de mudança climática (Bel; Gradus, 2016). Existem ressalvas adversas quanto ao "rótulo verde" sem M&V, sendo um sinal mais fraco (anual, não marginal) e a necessidade de interoperabilidade entre registro de propriedade, limpeza urbana e cooperativas/operadores para completar o ciclo de concessão e verificação (Tietenberg; Lewis, 2018).

Quando comparamos o IPTU Verde com o PAYT podemos apontar como vantagens: sinal marginal forte, indução a segregação de resíduos, evidência robusta de redução de rejeito e aumento de reciclagem. O PAYT também apresenta adversidades como custos de M&V e o risco de evasão de fiscalização. Essa forma de taxação exige uma coleta funcional, pesagem auditável e comunicação contínua (Bel; Gradus, 2016; Fullerton; Kinnaman, 1996; Ukkonen; Sahimaa, 2021). No que se refere ao imposto sobre o aterro, podemos apontar como vantagem a longa duração de seus efeitos, e, como ponto adverso, a sua transmissão ser sujeita ao gerador, assim como também, exigir cooperação interestadual. Para esse tipo de taxa, deve-se combinar

as proibições de exportação de recicláveis e orgânicos e estabelecer metas escalonadas (EEA, 2024; Jofre-Monseny; Sorribas-Navarro, 2024).

O modelo EPR tem como vantagem o alívio da remoção municipal, em contrapartida existe um foco setorial de sua atuação. Se faz necessário contratos com cooperativas e modulação de taxas para ecodesign (OECD 2016; OECD 2023; ACR+ 2023).

## 2.7 Experiências internacionais e nacionais.

A experiência internacional demonstra, de forma consistente, que os instrumentos econômicos baseados em sinalizações de preço, como o modelo *Pay-As-You-Throw* (PAYT), produzem efeitos mensuráveis e estruturalmente relevantes sobre o comportamento dos geradores de resíduos. Evidências empíricas em cidades da União Europeia e dos Estados Unidos, reportaram reduções de 10–40% no rejeito e aumentos de reciclagem, com maior efeito em peso-a-peso e em municípios com coleta seletiva porta-a-porta consolidada; a durabilidade depende de manter diferencial de preço, ampliar rotas e aplicar fiscalização proporcional (Bel; Gradus, 2016; Gradus *et al.*, 2019). Esses resultados podem ser interpretados à luz da teoria econômica das externalidades ambientais, segundo a qual a internalização parcial do custo da disposição final altera o comportamento dos domicílios ao tornar visíveis os custos marginais da geração de resíduos. Incrementos graduais e previsíveis da reciclagem estão associados a queda persistente do envio a aterros e crescimento de rotas de valorização; proibições à orgânicos aceleram o desvio em regiões com composição putrescível elevada (EEA, 2024; Jofre-Monseny; Sorribas-Navarro, 2024). Do ponto de vista ambiental, essa estratégia apresenta elevada eficiência climática, considerando que a fração orgânica constitui o principal substrato para geração de metano em condições anaeróbias. A redução de sua disposição em aterros impacta diretamente o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) e, conseqüentemente, as emissões cumulativas ao longo do tempo, conforme estabelecido nas diretrizes metodológicas do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2019).

No âmbito dos sistemas de responsabilidade compartilhada, esquemas de DRS alcançam >80–90% de retorno em embalagens de bebidas e melhoram a qualidade do material, reduzindo custos de triagem municipal; EPR com tarifas moduladas induz ecodesign e estabilidade de fluxo (OECD, 2016; OECD, 2023; ACR+, 2023).

No Brasil, programas municipais incluem segregação de recicláveis (comprovação de destinação à reciclagem) e compostagem domiciliar (cadastramento/vistoria) como critérios elegíveis a desconto, usualmente com percentuais escalonados e limites, cuja efetividade depende de

verificação periódica, integração com operador/cooperativas e comunicação clara ao contribuinte (Brasil, 2010; Brasil, 2022; ABREMA, 2024). Sem esses elementos, há risco de perda de credibilidade e redução da adesão ao longo do tempo.

O feedback sobre o desempenho em relação à rota de valorização tem baixo custo e oportuniza muitas melhorias; bem como, alertas sobre contaminação em recipientes/sacos e compromissos públicos (selo “casa que separa”) — aumentam a visibilidade e a continuidade do hábito de separar resíduos, resultando na diminuição da contaminação e potencializando os efeitos dos incentivos financeiros (PAYT/IPTU Verde) (UNEP/CCAC, 2021; Bel; Gradus, 2016). Em condomínios multifamiliares, síndicos ou zeladores podem atuar como facilitadores de mudança ao associar as normas do condomínio à prática da coleta seletiva e ao estabelecer metas visíveis (Wilson; Velis; Rodic, 2013).

Podemos apontar como indicadores relevantes a massa desviada por domicílio anualmente, a taxa de contaminação nas centrais (medida por meio de amostragem periódica) e a proporção de participação (número de domicílios ativos em relação ao total elegível) para os resíduos secos. No caso dos resíduos orgânicos, é aconselhável realizar um cadastro georreferenciado das composteiras, realizar vistorias rotativas utilizando checklists objetivos e comprovar o uso ou a entrega do composto sempre que aplicável (Boldrin *et al.*, 2011).

Em relação ao componente climático, devem ser utilizados fatores que estejam alinhados com as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) 2019. Isso inclui emissões de aterro parametrizadas com base na quantidade de orgânicos desviados, bem como a eficiência na captura e oxidação. É importante relatar o benefício líquido em toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano – tCO<sub>2</sub>e/ano, levando em conta a sensibilidade para parâmetros críticos (IPCC, 2019).

As evidências indicam que os sinais econômicos têm melhor eficácia quando: (i) existem rotas distintas para resíduos secos e orgânicos; (ii) a aplicação das regras é proporcional e previsível; e (iii) o desenho do sistema minimiza os custos de conformidade para os domicílios (como recipientes adequados, um calendário claro e atendimento eficiente) (Wilson; Velis; Rodic, 2013).

Em municípios onde o PAYT é uma questão politicamente delicada e onde as taxas de aterro dependem de arranjos regionais ou nacionais, um IPTU Verde focado na segregação e compostagem pode servir como uma introdução para melhorias significativas na massa desviada e nas emissões de gases de efeito estufa – GEE. Além disso, instrumentos como o IPTU Verde podem atuar como mecanismos de transição, promovendo ganhos progressivos na

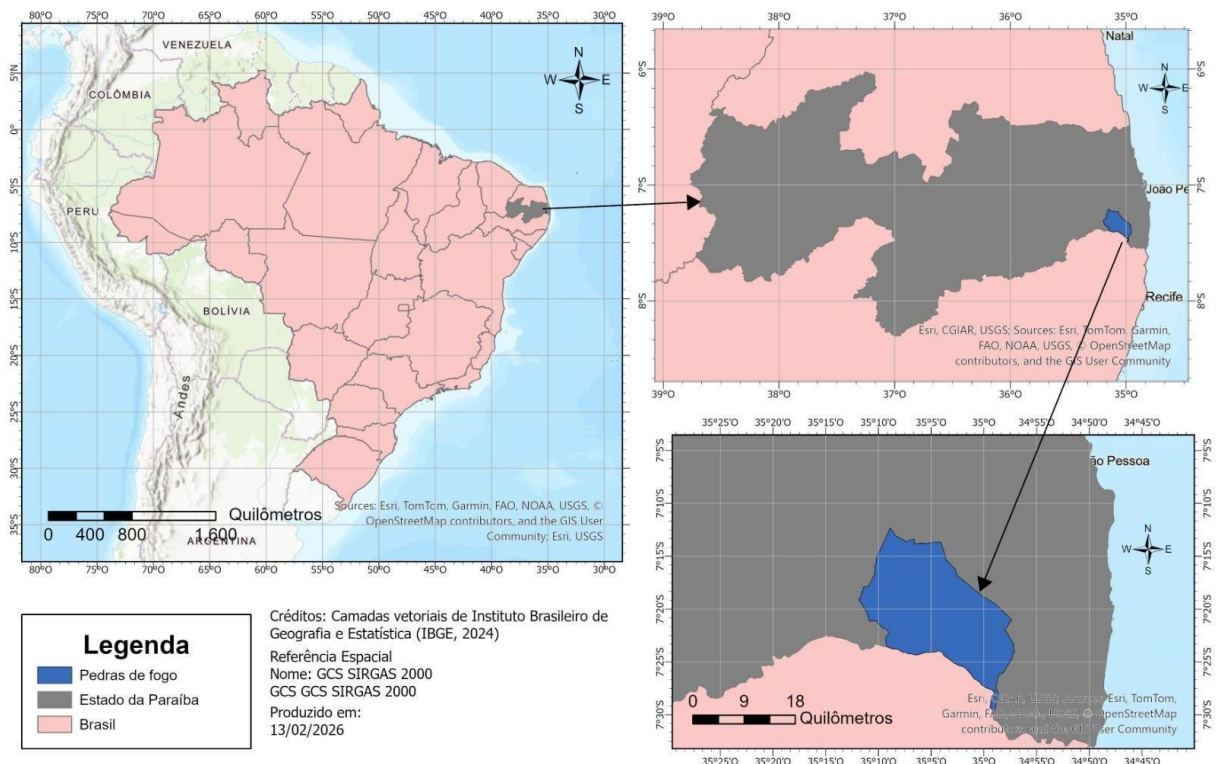
massa desviada e preparando o sistema para instrumentos mais sofisticados, como pilotos que medem peso por setor ou condomínio (Bel; Gradus, 2016).

### 3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho o município de Pedras de Fogo, localizado na região geográfica intermediária e imediata de João Pessoa no Estado da Paraíba (Figura 1), foi selecionado como área de estudo. O município possui uma área territorial de 406,729 km<sup>2</sup>, resultando em uma densidade demográfica de 72,93 hab./km<sup>2</sup> e uma população estimada para o ano de 2022 de 29.662 habitantes (IBGE, 2022).

Figura 1: Mapa de Localização do município de Pedras de Fogo-PB.

#### MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO MUNICÍPIO DE PEDRAS DE FOGO - PB



Fonte: Autoria Própria (2026).

A pesquisa teve sua metodologia estruturada em etapas complementares, visando garantir o embasamento técnico-científico necessário ao desenvolvimento e caracterização do estudo. Essa etapa teve como propósito subsidiar o julgamento de engenharia e a parametrização da simulação proposta para o Imposto Verde sobre a Propriedade, com foco na gestão de RSU. A questão orientadora que norteou a revisão foi definida como: quais instrumentos de política pública e parâmetros técnico-científicos estão disponíveis na literatura para contribuir com o aumento da segregação de resíduos por tipologia (secos e orgânicos), estimativa de emissões de gases de efeito estufa associadas à disposição em aterros sanitários e

ao transporte, bem como para subsidiar a concepção e operacionalização de incentivos municipais, como o IPTU Verde.

Para tal, foram realizadas buscas sistemáticas nas principais bases de dados científicas, incluindo Scopus, ScienceDirect e Google Acadêmico, selecionando artigos científicos revisados por pares, relatórios técnicos e documentos institucionais de relevância nacional e internacional. Entre os periódicos científicos consultados, destacam-se *Waste Management*, *Resource and Energy Economics* e *Environmental and Resource Economics*, reconhecidos pela relevância na área de gestão ambiental e economia dos recursos naturais. Adicionalmente, foram utilizadas diretrizes metodológicas e inventários internacionais consolidados, como os publicados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2019), pela *European Environment Agency* (EMEP/EEA, 2019), pelo *GHG Protocol* (GHG Protocol, 2014) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente em parceria com a *Climate and Clean Air Coalition* (UNEP/CCAC, 2021), os quais fornecem metodologias reconhecidas internacionalmente para estimativa de emissões de gases de efeito estufa no setor de resíduos sólidos.

No âmbito nacional, foram considerados instrumentos legais, normativos e bases de dados oficiais que estruturam a gestão de resíduos sólidos no Brasil, com destaque para a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022, bem como os diagnósticos e indicadores disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), além dos relatórios técnicos elaborados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais e pela Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, que fornecem dados atualizados sobre a geração, coleta, tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no país.

Dessa forma, a revisão bibliográfica permitiu consolidar os parâmetros técnicos, científicos e normativos necessários para fundamentar a modelagem proposta e garantir a consistência metodológica da pesquisa.

A estratégia de busca teve abordagem mista, incluindo:

(a) Artigos-semente (Bel; Gradus, 2016; Marshall; Farahbakhsh, 2013; Boldrin *et al.*, 2011; IPCC, 2019); além de *snowballing* em relação a referências citadas.

(b) Busca direcionada em português/inglês para combinações de palavras-chave “unit-based pricing”, “pay-as-you-throw”, “landfill methane IPCC FOD”, “composting LCA emissions”, “waste policy instruments”, “PNRS Brasil”, “green property tax recycling composting”.

(c) priorização de 2010–2025

Foram adotados como critério de inclusão:

- (1) Relevância para instrumentos econômicos (PAYT, taxas, EPR/DRS) e/ou caminhos tecnológicos (reciclagem seca; compostagem/digestão orgânica).
- (2) Abordagem metodológica evidente (artigos revisados por pares, guias oficiais).
- (3) Transferibilidade para o contexto municipal brasileiro (parâmetros como  $\Delta\gamma$ ; DOC\*; R; g).

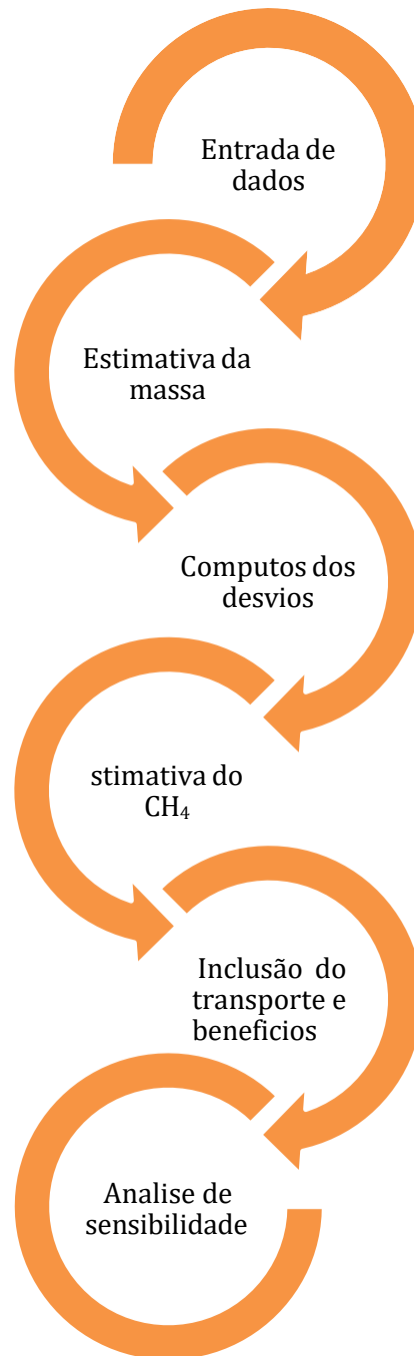
Foram adotados como critério de exclusão: opiniões não fundamentadas; melhorias marginais; materiais desatualizados onde há atualizações oficiais.

Foram para contribuição da síntese: o (i) Tipo de instrumento e valor de detecção (variação da rejeição e da reciclagem); (ii) Parâmetros para modelar o processo (DOC\*, GWP, R, OX, fatores de transporte; rendimento); e (iii) Condições de trabalho (procedimento de medição ou resultados de inspeção informados, riscos de descarte inadequado).

### **3.1 Simulação da redução da emissão de metano por adesão ao IPTU Verde**

Para simular o impacto de um incentivo tributário municipal (IPTU Verde – Imposto Predial e Territorial Urbano Verde) no desvio de massa (recicláveis secos e orgânicos) e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), foram comparados quatro cenários, sendo um cenário sem incentivo (S0) com cenários com adesão ao programa (S1, S2 e S3), por meio de um balanço de massa e de um cálculo de metano ( $\text{CH}_4$ ) em aterros sanitários, seguindo o método de balanço de massa anual (*First Order Decay* - abordagem simplificada) do IPCC (IPCC, 2019; UNEP/CCAC, 2021). No modelo FOD, a decomposição ocorre segundo uma cinética de primeira ordem, em que a taxa de geração de  $\text{CH}_4$  é proporcional à massa remanescente de carbono degradável no tempo. Sob a abordagem do modelo FOD, a decomposição da matéria orgânica segue uma cinética de primeira ordem, na qual a taxa instantânea de geração de metano é diretamente proporcional à massa remanescente de carbono degradável no sistema ao longo do tempo.

Figura 2: Fluxograma de cálculo para as simulações dos cenários.



Fonte: Autoria própria (2026).

### 1. Entrada de dados locais:

Os dados de entrada incluem: população estimada para o ano de 2025 em Pedras de Fogo (Pop = 31.356 hab, IBGE 2025); geração per capita (GPC =  $0,60 \text{ kg} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), valor compatível com municípios de pequeno porte no Brasil (SNIS, 2023).; composição gravimétrica (% em massa); taxas de captura baseline ( $\gamma_0$ ) por fração; parâmetros operacionais/logísticos (frequência, rotas); distância média ao aterro ( $d = 47,4 \text{ km}$ ), e

parâmetros do aterro (eficiência de captura de biogás - R, e fator de oxidação - OX) (ABREMA, 2024; IPCC, 2019)

## 2. Cálculo da massa por fração e aplicação das capturas

- Massa total anual:  $M_{tot} = Pop \times GPC \times 365$ .
- Massa por fração:  $M_f = M_{tot} \times (\% \text{ fração})$ .
- Aplicar  $\gamma$  por cenário:
  - Linha de base:  $\gamma = \gamma_0$  (capturas atuais).
  - com incentivo (IPTU Verde):  $\gamma = \gamma_1 = \gamma_0 + \Delta\gamma_f$  (incremento por fração induzido pelo programa).

Observa-se que para orgânicos, quando houver compostagem domiciliar, deve-se considerar a **eficiência g** (proporção efetivamente estabilizada).

## 3. Cômputo dos desvios e do envio a aterro

- $Desvio_f = M_f \times \gamma$  (reciclagem/compostagem).
- **Aterro\_f = M\_f × (1 - γ).**
- Somar por cenário (S0, S1, S2 e S3) e por tipo de fração para obter  $M_{desviada}$  e  $M_{aterro}$  do município.

## 4. Estimativa do CH<sub>4</sub> do aterro (FOD anual simplificado) e CO<sub>2e</sub>

- Carbono orgânico degradável efetivo:  $DOC_C = \sum_f (M_f^{aterro} \times DOC^*_f)$ .
- Geração de CH<sub>4</sub>:  $CH_4_{gen} = DOC_C \times DOC^{decomp} \times F \times (16/12)$ .
- Emissão líquida de CH<sub>4</sub>:  $CH_4_{emis} = CH_4_{gen} \times (1 - R) \times (1 - OX)$ .
- Conversão em CO<sub>2e</sub> (horizonte 100 anos):  $CO_{2e} = CH_4_{emis} \times GWP_{100}$ .  
(Parâmetros Tier 1 conforme IPCC, 2019;  $GWP_{100}(CH_4)=28$ )

## 5. Inclusão de emissões de transporte e benefício líquido

- Tonelada-quilômetro:  $t \cdot km = M_{aterro} \times d$ .
- Emissões de transporte:  $E_{transp} = t \cdot km \times FE_{(t \cdot km)}$  (fator de emissão por t·km).
- Benefício líquido do cenário S vs. base S0:  
 $\Delta CO_{2e\_líq} = (CO_{2e\_S0} - CO_{2e\_S}) + (E_{transp\_S0} - E_{transp\_S})$ .

## 6. Análise de sensibilidade (variáveis críticas)

Variou-se uma variável de cada vez (ou em faixas) e observou-se a resposta de  $\Delta\text{CO}_2\text{e}_{\text{líq}}$  e  $\Delta\text{M}_{\text{aterro}}$ .

### Glossário dos parâmetros:

- **a**: taxa de **adesão** dos domicílios ao IPTU Verde (0–100%).
- $\Delta\gamma_f$ : **incremento de captura** por fração (pontos percentuais) devido ao incentivo.
- **g**: **eficiência da compostagem** (0–1), porção do orgânico desviado que é efetivamente estabilizada.
- **R**: **eficiência de captura de biogás** no aterro (0–1).
- **OX**: **fator de oxidação** no aterro (0–1), fração do  $\text{CH}_4$  oxidada na cobertura.
- **DOC\*\_f**: **carbono orgânico degradável** da fração f (kg C/t), parâmetro IPCC (Tier 1) por material (ex.: orgânicos, papel).
- **d**: **distância média** de transporte até o aterro (km) — aqui **47,4 km**.
- **FE\_(t·km)**: **fator de emissão** do transporte por tonelada-quilômetro ( $\text{tCO}_2/\text{t}\cdot\text{km}$ ).
- **GPC**: **geração per capita** diária ( $\text{kg}\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$ ).
- **M\_tot**: **massa total** anual (t/ano).
- **M\_f**: **massa por fração** (t/ano).
- $\gamma$ : **taxa de captura** (baseline  $\gamma_0$ ; com incentivo  $\gamma_1$ ).
- **GWP<sub>100</sub>**: **potencial de aquecimento global** a 100 anos (adotado 28 para  $\text{CH}_4$ , salvo revisão).
- **F, DOC^decomp**: parâmetros do modelo **FOD** (IPCC) para fração que decompõe e fração do DOC que se decompõe.

## 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

A aplicação do método *First-Order Decay* (FOD), conforme diretrizes do IPCC (2019) e UNEP/CCAC (2021), permitiu modelar a dinâmica de geração de metano (CH<sub>4</sub>) a partir da fração de carbono orgânico degradável (DOC) efetivamente disposta no aterro sanitário. No modelo adotado, a geração de CH<sub>4</sub> é função direta da massa de resíduos biodegradáveis enviada ao aterro, do teor de DOC por fração (DOC\*\_f), da fração degradável (DOC^decomp), da fração de metano no biogás (F) e dos parâmetros operacionais de captura (R) e oxidação (OX).

### 4.1 Linha de base (S0): Geração, composição e destinação:

Estimando a Geração total anual (M\_tot):

$$\text{Pop} \times \text{GPC} \times 365 = 31.356 \times 0,60 \times 365 = 6.866,96 \text{ t/ano.}$$

Considerando uma composição gravimétrica e capturas S0: orgânicos 43% ( $\gamma_0=0$ ); papel/papelão ( $\gamma_0=25\%$ ); plásticos 10,9% ( $\gamma_0=25\%$ ); vidro 2,9% ( $\gamma_0=10\%$ ); metais 1,6% ( $\gamma_0=50\%$ ); outros 36,8% ( $\gamma_0=0$ ) (tabela 1).

Tabela 1: Linha de base (S0): geração total (M\_tot), massa por fração (M\_f), capturas ( $\gamma_0$ ) e massa a aterro (M\_f^aterro).

Fração	Massa (t/ano)	Captura $\gamma_0$	Desvio S0 (t)	Aterro S0 (t)
<b>Orgânicos</b>	2.933,584	0,00	0,000	2.933,584
<b>Papel/Papelão</b>	327,470	0,25	81,867	245,602
<b>Plásticos</b>	743,629	0,25	185,907	557,722
<b>Vidro</b>	197,846	0,10	19,785	178,062
<b>Metais</b>	109,157	0,50	54,578	54,578
<b>Outros</b>	2.510,602	0,00	0,000	2.510,602
<b>Total</b>	6.822,288	—	342,138	6.480,150

Fonte: ARRUDA (2021)

No cenário de referência (S0), a disposição anual de 2.933,58t de resíduos orgânicos representa a principal fonte de DOC disponível para decomposição anaeróbia. Considerando  $\text{DOC}^*_\text{Org} = 0,15\text{t C/t}$  e  $\text{DOC}^{\text{decomp}} = 0,5$ , a carga anual de carbono potencialmente degradável no aterro estabelece a base da curva de geração de metano.

Nos cenários S1, S2 e S3, o incremento de captura ( $\Delta\gamma_f = +20$  p.p.) aplicado às frações orgânicas e recicláveis secos, combinado à eficiência de compostagem  $g = 0,60$ , reduziu progressivamente o DOC\_C enviado ao aterro. Essa redução refletiu diretamente na diminuição do fluxo de carbono potencialmente degradável introduzido no sistema de aterro, alterando

estruturalmente o estoque de carbono passível de conversão em metano. Do ponto de vista da modelagem ambiental, essa modificação no termo de entrada do sistema repercute em toda a trajetória temporal de geração de metano, uma vez que o modelo FOD descreve um processo cumulativo e dependente das condições iniciais.

Embora o modelo simplificado tenha apresentado resultados anuais médios, é fundamental reconhecer que, no modelo FOD completo, as emissões são distribuídas ao longo de décadas. Nesse sentido, o desvio de resíduos orgânicos da disposição final não produz apenas um efeito imediato na redução das emissões, mas promove uma alteração estrutural no balanço de carbono do sistema, reduzindo o estoque total de carbono biodegradável disponível e, conseqüentemente, o potencial de emissões futuras. Esse efeito caracteriza um benefício climático de natureza persistente, uma vez que evita a formação de metano que seria progressivamente liberado ao longo de décadas.

Os resultados da simulação evidenciaram reduções líquidas anuais de emissões equivalentes a 53,30 tCO<sub>2</sub>e, 133,24 tCO<sub>2</sub>e e 266,48 tCO<sub>2</sub>e para os cenários S1, S2 e S3, respectivamente, considerando uma eficiência de recuperação de metano (R) de 0,50. Observa-se uma relação aproximadamente proporcional entre o aumento da taxa de adesão ao incentivo tributário e a magnitude da redução das emissões, indicando um comportamento característico de sistemas predominantemente controlados pela massa de entrada de substrato orgânico (*input-driven system*). Esse resultado demonstra que a variável mais sensível na determinação das emissões de metano é a quantidade de carbono orgânico biodegradável efetivamente destinada ao aterro, enquanto os parâmetros associados à eficiência de captura e recuperação de metano exercem influência secundária sobre o potencial total de geração. Tal comportamento reforça a relevância de estratégias focadas no desvio de resíduos orgânicos na fonte, como programas de incentivo tributário ambiental, os quais atuam diretamente sobre o principal determinante estrutural das emissões, promovendo reduções efetivas e duradouras no potencial de geração de gases de efeito estufa no setor de disposição final de resíduos sólidos urbanos.

#### **4.2 Efeito do IPTU Verde no desvio de massa**

A análise dos resultados obtidos demonstra que a implementação do IPTU Verde constitui um instrumento econômico ambiental eficaz na indução de alterações estruturais no fluxo de massa dos resíduos sólidos urbanos, promovendo melhorias objetivas no desempenho do sistema de gestão e contribuindo diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa associadas à disposição final. Sob a perspectiva do balanço de massa, verifica-se

que o incentivo tributário atua diretamente sobre a redução da massa de resíduos destinada ao aterro sanitário, por meio do aumento das taxas de desvio das frações recicláveis secas e, principalmente, da fração orgânica, que representa o principal componente responsável pelo potencial de geração de metano.

Partindo da hipótese de adesão ao programa em S1=10%, S2=25%, S3=50%; e um incremento de captura ( $\Delta\gamma_f$ ) de +20 p.p. (mais vinte pontos percentuais) em secos e +20 p.p. em orgânicos; e assumindo uma eficiência da compostagem ( $g$ ) em 0,60 para orgânicos, podemos apontar a tabela 2:

Tabela 2: Desvio por fração e massa a aterro nos cenários de adesão S1–S3.

<b>Fração</b>	<b>Desvio S1 (t)</b>	<b>Aterro S1 (t)</b>	<b>Desvio S2 (t)</b>	<b>Aterro S2 (t)</b>	<b>Desvio S3 (t)</b>	<b>Aterro S3 (t)</b>
Orgânicos	58,672	2.874,912	146,679	2.786,905	293,358	2.640,225
Papel/Papelão	88,417	239,053	98,241	229,229	114,614	212,855
Plásticos	200,780	542,849	223,089	520,541	260,270	483,359
Vidro	23,742	174,105	29,677	168,169	39,569	158,277
Metais	56,761	52,395	60,036	49,120	65,494	43,663
Outros	0,000	2.510,602	0,000	2.510,602	0,000	2.510,602
<b>Totais</b>	<b>428,371</b>	<b>6.393,917</b>	<b>557,722</b>	<b>6.264,566</b>	<b>773,306</b>	<b>6.048,982</b>

Fonte: ARRUDA (2021)

Os resultados quantitativos evidenciam um aumento significativo da massa total desviada, que passou de 342,14 t/ano no cenário de referência (S0) para 773,31 t/ano no cenário de maior adesão ao programa (S3), correspondendo a um incremento absoluto de 431,17 t/ano. Esse aumento resultou em uma redução de 6,65% na massa total destinada ao aterro sanitário, confirmando a existência de uma relação diretamente proporcional entre o nível de adesão ao incentivo tributário e a eficiência ambiental do sistema. Esse comportamento caracteriza um sistema predominantemente controlado pela massa de entrada (input-driven system), no qual a redução da carga de resíduos aterrados constitui o principal fator determinante na mitigação dos impactos ambientais associados à disposição final.

No cenário de referência, a disposição anual de 2.933,58t de resíduos orgânicos representa a principal fonte de carbono orgânico degradável (DOC) introduzido no aterro sanitário, constituindo o estoque inicial responsável pela geração de metano ao longo do tempo. Considerando um teor específico de carbono orgânico degradável (DOC\*\_Org) de 0,15 t C/t e uma fração efetivamente degradável (DOC\_decomp) de 0,5, observa-se que uma parcela significativa do carbono presente nos resíduos orgânicos permanece disponível para conversão em metano por meio da decomposição anaeróbia. De acordo com o modelo First-Order Decay (FOD), adotado nas diretrizes metodológicas do IPCC, a geração de metano ocorre segundo

uma cinética de primeira ordem, na qual a taxa de emissão é diretamente proporcional à massa remanescente de carbono degradável no sistema.

Nos cenários com incentivo tributário (S1, S2 e S3), o aumento da taxa de captura das frações orgânicas e recicláveis, associado à eficiência do processo de compostagem adotado ( $g=0,60$ ), resultou na redução progressiva da massa de carbono orgânico efetivamente destinada a disposição final. Essa redução implicou uma diminuição direta do fluxo de carbono potencialmente degradável (DOC\_C) introduzido no sistema, promovendo uma alteração estrutural no balanço de carbono do aterro sanitário e reduzindo o potencial de geração de metano ao longo do horizonte temporal de decomposição. Sob a perspectiva da modelagem ambiental, essa redução no termo de entrada do sistema resulta na diminuição tanto da taxa instantânea de geração de metano quanto do potencial acumulado de emissões, uma vez que o modelo FOD descreve um processo dependente das condições iniciais e caracterizado por emissões distribuídas ao longo de várias décadas.

Esse comportamento é confirmado pelos resultados de redução líquida das emissões, que atingiram valores de 53,30 tCO<sub>2</sub>e, 133,24 tCO<sub>2</sub>e e 266,48 tCO<sub>2</sub>e para os cenários S1, S2 e S3, respectivamente, considerando uma eficiência de recuperação de metano de 50%.

Sob a perspectiva da economia ambiental, os resultados obtidos estão em conformidade com os fundamentos teóricos associados à aplicação de instrumentos econômicos baseados em incentivos, os quais visam promover a internalização parcial das externalidades ambientais decorrentes da disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos. Nesse contexto, o IPTU Verde atua como um mecanismo de incentivo fiscal que reduz o custo marginal percebido pelos geradores para a adoção de práticas ambientalmente adequadas, tais como a segregação na fonte e a compostagem domiciliar. Esse comportamento encontra respaldo na literatura científica internacional, a qual aponta que instrumentos econômicos aplicados à gestão de resíduos sólidos urbanos são capazes de promover reduções significativas na massa destinada a aterros em faixas que variam entre 5% e 30%, dependendo do nível de adesão e das condições estruturais do sistema.

Nesse contexto, a redução de 6,65% observada no cenário de maior adesão encontra-se plenamente alinhada com os valores reportados, especialmente considerando o caráter inicial da implementação do programa, particularmente quando associados a ações complementares, como programas de educação ambiental e disponibilidade de infraestrutura adequada para tratamento e valorização de resíduos. Dessa forma, conclui-se que o IPTU Verde constitui uma ferramenta eficaz de política pública ambiental, capaz de induzir alterações estruturais no sistema de gestão de resíduos e contribuir de maneira mais consistente para a mitigação das

emissões de gases do efeito estufa, em consonância com as diretrizes internacionais voltadas à redução das emissões no setor.

#### 4.3 Síntese de massa: S0 vs. S1–S3

A tabela 3 sintetiza a comparação no balanço de massa entre o cenário estabelecido como referência (S0) e os cenários simulados (S1–S3). Também foram apontadas as reduções de envio a aterro ( $\Delta M_{\text{aterro}}$ ):

Tabela 3: Síntese de massa para a totalidade dos resíduos.

Cenário	Massa desviada (t/ano)	Massa a aterro (t/ano)	$\Delta M_{\text{aterro}}$ vs. S0 (t/ano)	Variação (%)
S0 (base)	342,138	6.480,150	—	—
S1 (10%)	428,371	6.393,917	–86,234	–1,33%
S2 (25%)	557,722	6.264,566	–215,584	–3,33%
S3 (50%)	773,306	6.048,982	–431,169	–6,65%

Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 4: Benefícios climáticos por cenário: aterro (FOD), transporte e benefício líquido (vs. S0).

Cenário	$\Delta tCO_2e$ (aterro) [t/ano]	$\Delta t \cdot km$ [t·km/ano]	$\Delta tCO_2e$ (transp.) [t/ano]	$\Delta tCO_2e$ líquido [t/ano]
S1 (10%)	53,30	4.087,49	0,409	53,71
S2 (25%)	133,24	10.218,68	1,022	134,26
S3 (50%)	266,48	20.437,41	2,044	268,52

Fonte: Autoria própria (2026).

#### 4.4 Emissões do aterro (FOD/IPCC) e do transporte

A análise indicou que as emissões associadas ao transporte apresentaram contribuição marginal em relação às emissões evitadas no aterro. A partir dos seguintes parâmetros adotados: IPCC Tier 1 ( $DOC^*_{Org}=0,15$ ;  $DOC^*_{Pap}=0,40$ ;  $DOC^{decomp}=0,5$ ;  $F=0,5$ ;  $MCF=1,0$ ;  $OX=0,0$ ),  $GWP100(CH_4) = 28$  e  $R=0,50$  (caso-base). Bem como a distância média entre a sede do município e o aterro: 47,4 km e os Fatores de transporte  $FE_{(t \cdot km)} = 0,10 \text{ kgCO}_2/t \cdot km$  ( $1,0 \times 10^{-4} \text{ tCO}_2/t \cdot km$ ), foi possível desenvolver a tabela 5 que indica os benefícios climáticos por cenário.

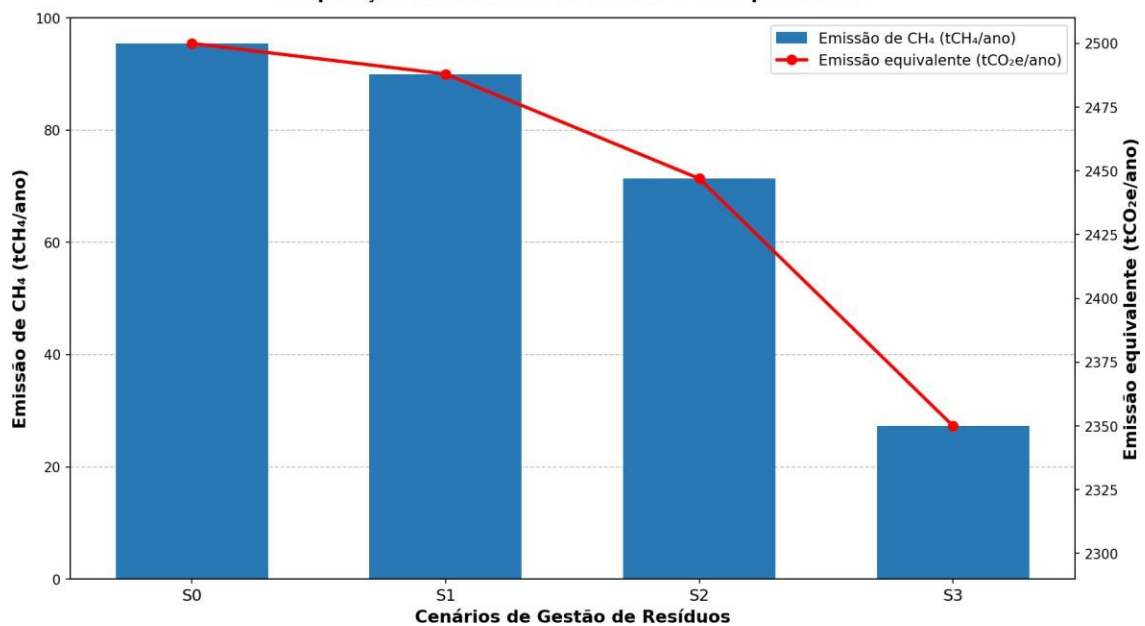
Tabela 5: Benefícios climáticos por cenário: aterro (FOD), transporte e benefício líquido (vs. S0).

Cenário	$\Delta$ tCO <sub>2</sub> e (aterro) [t/ano]	$\Delta$ t·km [t·km/ano]	$\Delta$ tCO <sub>2</sub> e (transp.) [t/ano]	$\Delta$ tCO <sub>2</sub> e líquido [t/ano]
S1 (10%)	53,30	4.087,49	0,409	53,71
S2 (25%)	133,24	10.218,68	1,022	134,26
S3 (50%)	266,48	20.437,41	2,044	268,52

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise dos resultados demonstrou que as emissões associadas ao transporte de resíduos sólidos urbanos apresentam contribuição marginal no balanço global de emissões de gases de efeito estufa quando comparadas às emissões evitadas no processo de disposição final em aterro sanitário. No cenário de maior adesão ao programa (S3), a redução das emissões decorrentes do transporte resultou em um benefício climático estimado de 2,04 tCO<sub>2</sub>e·ano<sup>-1</sup>, enquanto a mitigação associada à disposição final atingiu 266,48 tCO<sub>2</sub>e·ano<sup>-1</sup>. Esse resultado indica que aproximadamente 99% do benefício climático total está diretamente relacionado à redução da decomposição anaeróbia da fração orgânica no aterro, evidenciando que o principal mecanismo de mitigação está associado à diminuição do fluxo de carbono orgânico degradável destinado à disposição final.

A figura 3 mostra que as emissões do aterro caem de S0 para S3. Isso decorre, principalmente, do menor DOC (carbono orgânico degradável) que chega ao aterro quando orgânicos e papel/papelão são desviados.

Figura 3: Emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>e (S0 vs. S1–S3).  
Comparação das Emissões de Metano e CO<sub>2</sub>e por Cenário

Fonte: Autoria própria (2026).

Mesmo adotando  $R=0,50$  (captura média de biogás), a redução é substancial — sinal de que “atacar a entrada” (desvio na fonte) é eficaz mesmo quando a captura no aterro é razoável.

São implicações operacionais:

- (i) priorizar ações que aumentem  $\Delta\gamma$  de orgânicos (compostagem) e secos (reciclagem) nas áreas com maior adesão;
- (ii) manter monitoramento de  $R$  junto ao operador do aterro para documentar o benefício adicional do programa;
- (iii) recordar que a curva de  $\text{CH}_4$  do FOD real é difusa no tempo, mas o ganho anual médio já orienta a tomada de decisão.

Do ponto de vista técnico, esse comportamento decorre da elevada relevância da fração orgânica no balanço de emissões do setor de resíduos urbanos, uma vez que a decomposição anaeróbia constitui a principal fonte de geração de metano ( $\text{CH}_4$ ), gás que apresenta elevado potencial de aquecimento global. Em contraste, as emissões associadas ao transporte estão limitadas ao consumo de combustíveis fósseis e possuem magnitude significativamente inferior em relação às emissões biogênicas geradas no aterro sanitário.

Esse resultado está em conformidade com as diretrizes metodológicas do IPCC e com a literatura técnica internacional, que identificam a disposição final em aterros sanitários como a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa no setor de resíduos sólidos urbanos.

#### 4.5 Robustez simulada (eficiência de captura de biogás)

Desenvolveu-se a tabela 6, que aponta a variação do benefício do aterro para diferentes eficiências de captura ( $R$ ), mantendo demais parâmetros constantes ( $\text{GWP}=28$ ;  $\text{OX}=0,0$ ).

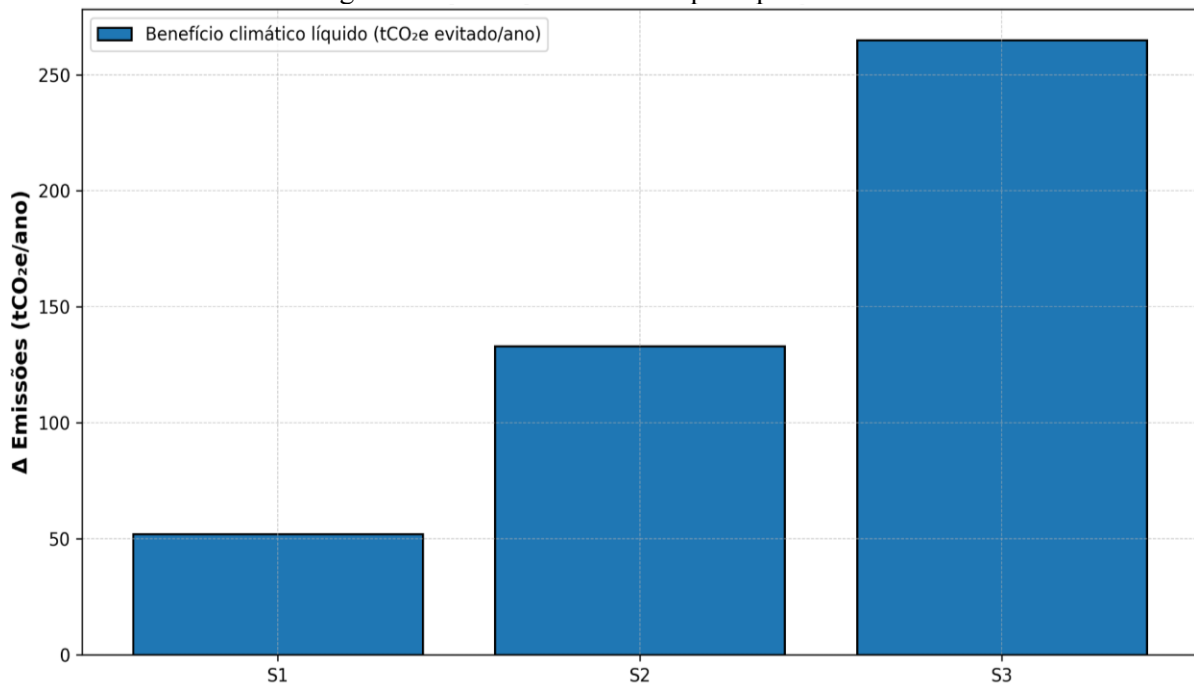
Tabela 6: Benefício em  $\text{tCO}_2\text{e/ano}$  no aterro sob três níveis de  $R$  (sem transporte).

Cenário	$\Delta \text{tCO}_2\text{e} (R=0,0)$	$\Delta \text{tCO}_2\text{e} (R=0,5)$	$\Delta \text{tCO}_2\text{e} (R=0,7)$
S1 (10%)	106,60	53,30	32,00
S2 (25%)	266,50	133,24	79,90
S3 (50%)	533,00	266,48	159,90

Fonte: Autoria própria (2026).

Pode-se observar, a partir da figura 4, que o benefício líquido ( $\text{tCO}_2\text{e/ano}$  evitadas) cresce com a adesão ( $S1 < S2 < S3$ ): Como o componente de transporte é pequeno frente ao metano evitado, reforça-se que a alavanca dominante é o desvio de orgânicos.

Figura 4: Benefício climático líquido por cenário.



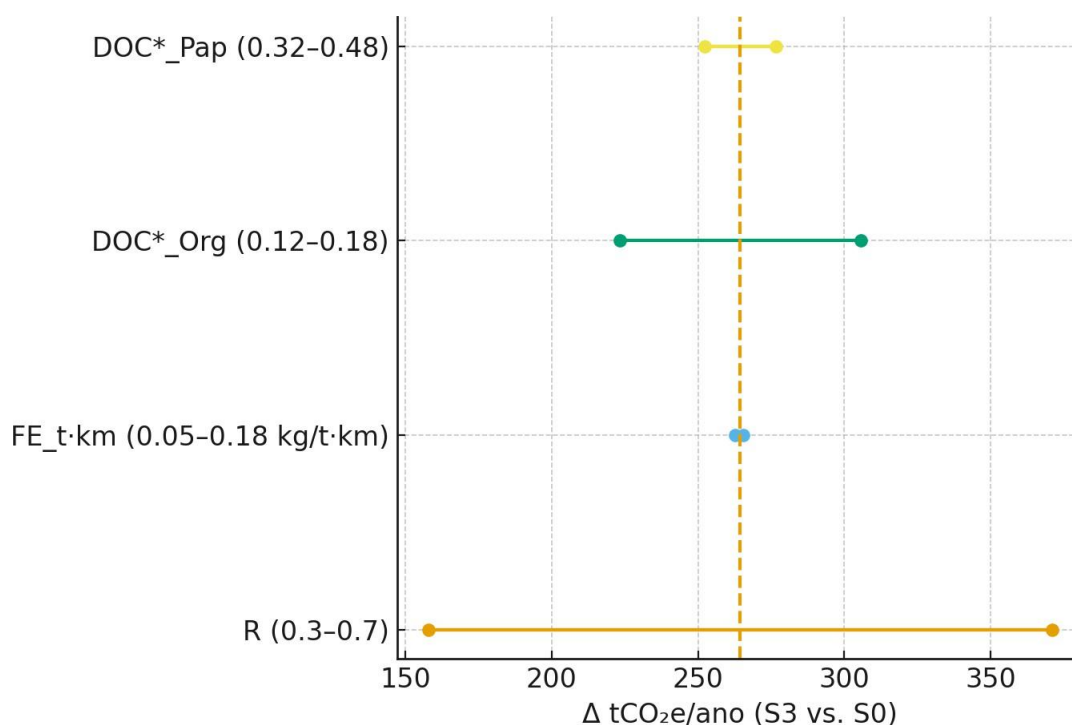
Fonte: Autoria própria (2026).

Em termos de priorização, elevar a adesão e assegurar serviço disponível (coleta seletiva/triagem somado ao apoio à compostagem) geram o maior retorno climático por esforço operacional.

Considerando o S2 (em aproximadamente 25% de adesão) já se entrega ganhos expressivos com complexidade gerenciável; em S3 (cerca de 50%) pode se exigir escala de triagem e logística. A curva sugere retornos crescentes no intervalo analisado, justificando expansão por agrupamentos de bairros com melhor propensão à adesão.

Na figura 4.3 Observa-se o quanto o benefício líquido de S3 pode variar quando mudamos parâmetros-chave.

Figura 5: Gráfico “tornado” (sensibilidade do  $\Delta tCO_2e\_l\acute{i}q$ ).



Fonte: Autoria própria (2026).

A análise de sensibilidade evidenciou que a eficiência de captura de biogás (R) é o parâmetro mais influente na magnitude das emissões líquidas. O R (eficiência de captura de biogás) é o que mais “puxa” o resultado: R = 0,0, o benefício climático praticamente dobra o benefício do programa; R = 0,7, reduz-se significativamente, porém permanece positivo e não anula o benefício do desvio de DOC. Isso demonstra que o desvio na fonte é estratégia estruturalmente robusta, pois:

- Independe de eficiência tecnológica do aterro;
- Atua diretamente na redução do potencial máximo de geração de metano;
- Reduz risco associado a falhas operacionais de captura.

Em seguida, fatores como  $\Delta\gamma\_org$  (incremento de captura de orgânicos), DOC\* e (em menor grau) o fator de transporte explicam a dispersão.

O uso prático desta informação se dá em:

- planejar M&V para sustentar  $\Delta\gamma\_org$  (visitas rotativas, material simples, canais de suporte);
- negociar rotina de comprovação de R com o operador do aterro (relatórios e/ou auditorias), porque R muda a magnitude, mas a direção do benefício se mantém;

- (iii) rodar a sensibilidade anual com dados atualizados para ajuste fino de metas e orçamentos.

Parâmetros como  $DOC^*_{Org}$  e  $\Delta\gamma_{org}$  também apresentaram elevada sensibilidade, indicando que campanhas focadas em orgânicos produzem maior retorno climático marginal.

#### **4.6 Implicações para a Política Nacional de Resíduos Sólidos e metas climáticas**

Os resultados obtidos apresentam elevada relevância no contexto contemporâneo da gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos, especialmente considerando o papel crítico da fração orgânica na geração de emissões de metano em aterros sanitários. Sob a perspectiva climática, a mitigação das emissões de metano provenientes da disposição final de resíduos assume importância estratégica, considerando que os aterros sanitários representam uma das principais fontes antropogênicas desse gás no setor de resíduos. Estudos recentes indicam que as atividades relacionadas à disposição de resíduos sólidos podem representar uma parcela significativa das emissões globais de metano, com destaque para os aterros sanitários como uma das principais fontes urbanas desse poluente climático de vida curta, porém de elevado potencial de aquecimento global (Saunois *et al.*, 2020; EEA, 2024). Além disso, pesquisas recentes demonstram que os aterros permanecem entre as principais fontes de metano, sendo superados apenas por setores como agricultura e energia, reforçando a necessidade de implementação de estratégias eficazes de mitigação nesse setor (Toha; Rahman, 2023; UNEP, 2024).

Estudos recentes conduzidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos indicam que o desvio de resíduos orgânicos para alternativas como compostagem ou digestão anaeróbia controlada pode reduzir significativamente as emissões de metano ao longo do ciclo de vida dos resíduos, contribuindo diretamente para a mitigação climática e para o fortalecimento de sistemas de gestão sustentável (USEPA, 2023; USEPA, 2025). Além disso, estratégias como a captura e aproveitamento energético do biogás representam medidas complementares eficazes, capazes de reduzir substancialmente as emissões líquidas de metano e promover a recuperação energética, contribuindo simultaneamente para a transição energética e para a redução da pegada de carbono do setor de resíduos (ABREN, 2025).

No contexto brasileiro, essa problemática assume ainda maior relevância, considerando os desafios estruturais associados à gestão de resíduos sólidos urbanos e as metas nacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa. Dados recentes indicam que o Brasil gerou mais de 77 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, sendo que uma parcela

significativa ainda apresenta destinação inadequada, o que contribui para a geração contínua de emissões de metano e outros impactos ambientais associados (ABREMA, 2024) .

Esse cenário evidencia a necessidade de implementação de instrumentos econômicos e políticas públicas capazes de incentivar a redução da geração de resíduos, a segregação na fonte e a adoção de práticas sustentáveis de gerenciamento.

Nesse sentido, instrumentos econômicos como o IPTU Verde configuram-se como mecanismos eficazes de indução de mudanças comportamentais e estruturais na gestão de resíduos, ao promover incentivos financeiros associados à adoção de práticas ambientalmente adequadas. Ao estimular a segregação de resíduos e o desvio da fração orgânica para rotas alternativas de tratamento, esse instrumento contribui diretamente para a redução do potencial de geração de metano e, conseqüentemente, para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem está alinhada com diretrizes internacionais que destacam a necessidade de integração entre políticas públicas, instrumentos econômicos e estratégias de gestão sustentável como elementos fundamentais para a redução das emissões no setor de resíduos e para o alcance das metas climáticas globais (UNEP, 2024). Por fim, para garantir tanto a integridade ambiental quanto a justiça social, recomenda-se estabelecer critérios objetivos para elegibilidade, realizar auditorias amostrais com sanções graduais e promover interoperabilidade entre bases de dados (cadastro imobiliário, limpeza urbana e cooperativas), além da transparência anual dos resultados obtidos (Tietenberg; Lewis, 2018; Brasil, 2010; Brasil, 2022).

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, analisou-se o potencial de um instrumento tributário municipal — o IPTU Verde — para induzir a segregação na origem e o desvio de resíduos sólidos urbanos (RSU) do aterro, com ênfase nas frações recicláveis secas e na fração orgânica. O estudo combinou uma revisão teórico-conceitual de instrumentos de política (econômicos, normativos e informacionais) e de soluções tecnológicas de gestão; e realizou uma simulação de cenários para o município de Pedras de Fogo-PB, empregando balanço de massa e estimativa de emissões de metano (CH<sub>4</sub>) via método FOD (First-Order Decay) do IPCC, além das emissões logísticas por t\*km. Os resultados indicam que instrumentos econômicos locais podem gerar benefícios climáticos mensuráveis ao promover a valorização de recicláveis e da fração orgânica, reduzindo o estoque de carbono sujeito à degradação anaeróbia.

Sob a perspectiva da política pública ambiental, os resultados indicam que o IPTU Verde apresenta elevada capacidade de induzir mudanças estruturais no fluxo de resíduos, atuando como mecanismo de internalização de externalidades ambientais e promovendo maior eficiência sistêmica na gestão de resíduos sólidos urbanos. Essa abordagem revela-se particularmente relevante para municípios de pequeno e médio porte, nos quais instrumentos econômicos podem representar alternativas tecnicamente viáveis e economicamente eficientes para a mitigação das emissões. Em síntese, embora existam incertezas associadas à variabilidade dos parâmetros adotados e às taxas reais de adesão populacional, os resultados obtidos demonstram, de forma consistente, que a implementação do IPTU Verde pode contribuir para a redução simultânea da massa destinada à disposição final e das emissões associadas, fortalecendo a sustentabilidade ambiental do sistema municipal de gestão de resíduos.

Portanto, o IPTU Verde constitui um instrumento tecnicamente eficaz e ambientalmente relevante para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor de resíduos sólidos urbanos, representando uma estratégia viável para o aprimoramento da gestão municipal e para o alinhamento das políticas públicas locais com os objetivos de mitigação climática e sustentabilidade ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABRELPE, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br>. Acesso em: 1 mar. 2026.
- ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024.
- ABREN. **Waste-to-energy and methane mitigation strategies**. Brasília: ABREN, 2025.
- ARRUDA, Victor Carlos de Lima. **Análise sobre a gestão de resíduos sólidos no município de Pedras de Fogo - PB**. 2021. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- BEL, G.; GRADUS, R. Effects of unit-based pricing on household waste collection demand: a meta-regression analysis. **Resource and Energy Economics**, [S.l.], v. 44, p. 169–182, 2016.
- BEMELMANS-VIDEC, M.L.; RIST, R. C.; VEDUNG, E. (org.). **Carrots, sticks, and sermons**: policy instruments and their evaluation. New Brunswick: Transaction Publishers, 1998.
- BOLDRIN, A. *et al.* Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. **Waste Management**, [S.l.], v. 31, n. 4, p. 619–630, 2011.
- BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305/2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, 13 jan. 2022.
- BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, 30 dez. 2009.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, 3 ago. 2010.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, 16 jul. 2020.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Inventário nacional de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**: setor resíduos. Brasília, DF: MCTI, 2022.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos (PLANares)**. Brasília, DF: MMA, 2022.
- COASE, R. H. The problem of social cost. **Journal of Law and Economics**, [S.l.], v. 3, p. 1–44, 1960.
- CUSWORTH, D. H. *et al.* Methane super-emitters from municipal solid waste detected using satellite observations. **Nature Climate Change**, [S.l.], v. 14, p. 45–53, 2024.

CUSWORTH, D. H. *et al.* Quantifying methane emissions from United States landfills. **Science**, [S.l.], v. 384, n. 6692, p. eadi7735, 2024.

DAHLÉN, L.; LAGERKVIST, A. Pay-as-you-throw: strengths and weaknesses of weight-based billing in household waste collection. **Waste Management**, [S.l.], v. 30, n. 1, p. 23–31, 2010.

EMEP/EEA. **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Municipal waste management across European countries: trends and policy instruments**. Copenhagen: EEA, 2024.

FULLERTON, D.; KINNAMAN, T. C. Garbage, recycling, and illicit burning or dumping. **Journal of Environmental Economics and Management**, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 78–91, 1995.

GHG PROTOCOL; WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Technical guidance for calculating scope 3 emissions**. Washington, DC: WRI; WBCSD, 2014.

GRADUS, R. *et al.* The effects of unit-based pricing systems on household waste and recycling. **Environmental and Resource Economics**, [S.l.], v. 73, p. 773–802, 2019.

IEA. **Global methane tracker 2024**. Paris: IEA, 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 5: waste**. Hayama: IPCC, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva: IPCC, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2021: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JOFRE-MONSENY, J.; SORRIBAS-NAVARRO, P. Landfill taxes and waste diversion. **Fiscal Studies**, [S.l.], v. 45, p. 483-500, 2024.

KAZA, S. *et al.* **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018.

KIM, R. H. *et al.* Methane parameters in IPCC first-order decay model. **Waste Management**, [S.l.], v. 169, p. 232–242, 2023.

MARSHALL, R. E.; FARAHBAKHS, K. Systems approaches to integrated solid waste management. **Waste Management**, [S.l.], v. 33, n. 4, p. 988–1003, 2013.

OECD. **Environment at a glance 2022**. Paris: OECD Publishing, 2022.

OECD. **Extended producer responsibility: updated guidance**. Paris: OECD Publishing, 2023.

PAGE, M. J. *et al.* PRISMA 2020 statement. **BMJ**, [S.l.], v. 372, n. 71, 2021.

SAUNOIS, M. *et al.* The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, [S.l.], v. 12, p. 1561–1623, 2020.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P.; GENTIL, E. Greenhouse gases and waste management. *Waste Management*, [S.l.], v. 144, p. 169–180, 2022.

SNIS. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2023**. Brasília: Ministério das Cidades, 2024.

STAVINS, R. N. Market-based environmental policy instruments. *In*: MÄLER, K.-G.; VINCENT, J. R. (org.). **Handbook of environmental economics**. Amsterdam: Elsevier, 2003.

THALER, R. H.; SUNSTEIN, C. R. **Nudge: improving decisions about health, wealth, and happiness**. New Haven: Yale University Press, 2008.

TIETENBERG, T.; LEWIS, L. **Environmental and natural resource economics**. 11. ed. New York: Routledge, 2018.

TRICCO, A. C. *et al.* PRISMA extension for scoping reviews. **Annals of Internal Medicine**, [S.l.], v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018.

UNEP. **Global methane assessment**. Nairobi: UNEP, 2021.

UNEP. **Global waste management outlook 2024**. Nairobi: UNEP, 2024.

USEPA. **Basic information about landfill gas**. Washington, DC: USEPA, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>. Acesso em: 01 mar. 2026.

WORLD BANK. **Solid waste management and climate mitigation strategies**. Washington, DC: World Bank, 2023.

WORLD BANK. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018.

ZHANG, C. *et al.* Microbial mechanisms of methane generation. **Science of the Total Environment**, [S.l.], v. 857, p. 1-11, 2023.