UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

THAMIRIS OLIVEIRA BALCONE

EMISSÕES E POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE SOROCABA-SP

Sorocaba
2026

THAMIRIS OLIVEIRA BALCONE

EMISSÕES E POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE SOROCABA-SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Liliane Moreira Nery

Coorientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

Sorocaba

2026

B174e

Balcone, Thamiris Oliveira

Emissões e potencial de mitigação de gases de efeito estufa na gestão de resíduos sólidos urbanos de Sorocaba-SP / Thamiris Oliveira Balcone. -- Sorocaba, 2026

72 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientadora: Liliane Moreira Nery

Coorientador: Sandro Donnini Mancini

1. Gerenciamento de resíduos. 2. Gases estufa. 3. Mudanças climáticas - Influência do homem. 4. Reaproveitamento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

THAMIRIS OLIVEIRA BALCONE

EMISSÕES E POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE SOROCABA - SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Data da defesa: 26/06/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
LILIANE MOREIRA NERY
Data: 29/06/2026 10:18:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Dra. Liliane Moreira Nery
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

Documento assinado digitalmente
RENAN ANGRIZANI DE OLIVEIRA
Data: 26/06/2026 16:32:21-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. Renan Angrizani de Oliveira
Universidade de Sorocaba - UNISO

Documento assinado digitalmente
ALBINA SANTOS COSTA
Data: 26/06/2026 23:12:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Ma. Albina Santos Costa
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Zetinha e Zezinho, por estarem sempre ao meu lado e me motivarem em todas as etapas dessa jornada.

Ao meu irmão, Du, à minha cunhada, Nina, e à minha sobrinha, Clarinha, por me apoiarem e me inspirarem a buscar sempre novos horizontes.

Ao meu amado Fe, pela cumplicidade constante e por sempre enxergar o meu potencial, me incentivando em todos os momentos.

Aos meus amigos Ana Bia, Nicols, Tardio, Beicinho e Cota, à minha prima Ste, e à República Operação, por toda ajuda, conselhos e acolhimento oferecidos nos momentos difíceis.

À minha orientadora, Profa. Dra. Liliane Moreira Nery, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini, pela paciência, pela dedicação e por todo o suporte fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, tornaram essa conquista possível e estiveram comigo nesta jornada, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

No Brasil, o setor de resíduos constitui uma das principais fontes emissoras de gases de efeito estufa (GEE), dada a alta dependência da disposição final em aterros sanitários e a baixa taxa de valorização de resíduos sólidos urbanos (RSU). O município de Sorocaba - SP reflete este quadro nacional, destinando 98% dos RSU gerados para aterro sanitário e apenas 2% para a reciclagem. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo estimar as emissões de GEE da disposição final de RSU de Sorocaba em 2023 e mensurar o potencial de emissões evitadas em cenários alternativos de gestão (reciclagem e compostagem). Verificou-se que as emissões da disposição final em 2023 cresceram 31,4% em comparação com 2013, ultrapassando as metas climáticas locais. Embora a reciclagem no ano-base tenha evitado 11.101,93 tCO2eq, o município deixou de incorporar benefícios da compostagem. Com a modelagem dos cenários alternativos, observou-se que mesmo a menor taxa de desvio de aterro (12%) poderia triplicar as emissões evitadas em 2023 pela reciclagem, enquanto o cenário de 24% de desvio poderia evitar o equivalente a 21,4% das emissões brutas de 2023. A integração entre os protocolos GPC e RC permitiu identificar que a gestão atual distancia Sorocaba da mitigação de emissões de GEE, ressaltando também a necessidade de revisão das metas e políticas atuais. Ademais, destaca-se que o aumento da valorização de resíduos e do desvio de aterro poderia ser atingido por intervenções na educação ambiental municipal, infraestrutura e coleta seletiva, além do fortalecimento de mecanismos já existentes, contribuindo para a redução das emissões de GEE.

Palavras-chave: GEE; inventário de emissões; valorização de resíduos; emissões evitadas.

ABSTRACT

In Brazil, the waste sector is one of the main sources of greenhouse gas (GHG) emissions, given the high dependence on final disposal in landfills and the low rate of recovery of municipal solid waste (MSW). The city of Sorocaba - SP reflects this national scenario, directing 98% of the MSW generated to landfills and only 2% to recycling facilities. In this context, this paper aimed to estimate GHG emissions from final disposal of MSW in Sorocaba in 2023 and to quantify the potential of avoided emissions in alternative management scenarios (recycling and composting). It was found that emissions from final disposal in 2023 grew by 31.4% compared to 2013, exceeding local climate goals. Although recycling in the base year avoided 11,101.93 tCO_2eq, Sorocaba did not incorporate benefits from organic waste composting. By modeling alternative scenarios, it was observed that even the lowest landfill diversion rate (12%) could triple the avoided emissions in 2023 through recycling, while the 24% diversion scenario could avoid the equivalent of 21.4% of gross emissions in 2023. The integration of the GPC and RC protocols showed that the current waste management distances Sorocaba from mitigating GHG emissions, also highlighting the need to review current goals and public policies. Furthermore, it is worth noting that increased waste recovery and diversion from landfills could be achieved through interventions in municipal environmental education, infrastructure and selective waste collection, as well as by strengthening existing mechanisms, thereby contributing to the reduction of GHG emissions.

Keywords: GHG; emission inventory; waste valorization; avoided emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões per capita do subsetor de disposição de resíduos sólidos em Sorocaba..... 44

Figura 2 – Emissões de disposição de RS versus metas do Plano de Redução de Emissões de Sorocaba..... 45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas da digestão anaeróbia em aterros sanitários..... 22

Quadro 2 – Caracterização dos limites considerados para aplicação do GPC neste trabalho..... 31

Quadro 3 – Fontes de emissão avaliadas para caracterização do cenário-base..... 32

.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição proposta dos cenários de gestão de recicláveis…..... 39

Tabela 2 – Distribuição proposta dos cenários de gestão de resíduos orgânicos..... 39

Tabela 3 – Definição da fração de cada material no montante enviado ao CGR Iperó em 2023 para estimativa de emissões da disposição de RSU..... 41

Tabela 4 – Definição da fração de cada material no montante enviado ao CGR Iperó em 2023 para estimativa de emissões da disposição de resíduos de poda..... 42

Tabela 5 – Aplicação das Equações 1, 2 e 3 para estimativa de emissões de CH4 decorrentes da disposição de RSU em 2023..... 42

Tabela 6 – Aplicação das Equações 1, 2 e 3 para estimativa de emissões de CH4 decorrentes da disposição de resíduos de poda em 2023..... 43

Tabela 7 – Emissões totais do subsetor de disposição RS em 2023..... 43

Tabela 8 – Massa de resíduos recicláveis considerada no cenário-base, a partir dos dados de destinação das cooperativas atuantes em Sorocaba..... 46

Tabela 9 – Emissões evitadas pela reciclagem em 2023 para o município de Sorocaba..... 47

Tabela 10 – Massas de resíduos recicláveis consideradas em cada cenário alternativo, baseado na composição gravimétrica em relação ao total enviado ao CGR Iperó em 2023..... 48

Tabela 11 – Massas de resíduos compostáveis consideradas em cada cenário alternativo, baseado na composição gravimétrica em relação ao total enviado ao CGR Iperó em 2023..... 49

Tabela 12 – Emissões evitadas pela reciclagem nos cenários alternativos de gestão de resíduos..... 50

Tabela 13 – Emissões evitadas pela compostagem nos cenários alternativos de gestão de resíduos..... 50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 OBJETIVOS 15

2.1 Objetivo geral 15

2.2 Objetivos específicos 15

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

3.1 Emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas 16

3.2 Gerenciamento de resíduos sólidos e panorama legal brasileiro 19

3.3 Aterros sanitários e emissão de GEE 21

3.3.1 Contabilização e reporte de emissões de GEE 23

3.4 Tecnologias de valorização de resíduos e emissões evitadas 26

3.4.1 Protocolo RC: estimativa de emissões evitadas 27

4 MATERIAL E MÉTODOS 29

4.1 Aquisição de dados e definição da metodologia 29

4.2 Estimativa de emissões de GEE do setor de resíduos sólidos em 2023 30

4.2.1 Delimitação e caracterização do escopo para aplicação do GPC 30

4.2.2 Cálculo das emissões de GEE para o ano de 2023 (cenário-base) 33

4.3 Estimativas de benefícios da reciclagem e compostagem de resíduos 36

4.3.1 Aplicação em cenários alternativos de gestão de resíduos 39

5 RESULTADOS 41

5.1 Emissões de GEE decorrentes da disposição de resíduos sólidos no cenário-base 41

5.2 Emissões evitadas pela reciclagem e compostagem no cenário-base 46

5.3 Projeção de emissões evitadas nos cenários alternativos 47

6 CONCLUSÃO 54

REFERÊNCIAS 56

ANEXO I - DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE SOROCABA PARA ATERRO SANITÁRIO EM 2023 65

ANEXO II – RESÍDUOS DESTINADOS PELAS COOPERATIVAS DE

SOROCABA EM 2023.....66

ANEXO III – FONTES DE EMISSÃO E NOTAÇÕES ADOTADAS NO 2º INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE DE SOROCABA..... 67

ANEXO IV – CARACTERIZAÇÃO DOS LIMITES DO 2º INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE DE SOROCABA.....69

ANEXO V – FATORES DE EMISSÃO DE GEE PARA O CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS RECICLÁVEIS..... 70

ANEXO VI – FATORES DE EMISSÃO DE GEE PARA O CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS COMPOSTÁVEIS..... 72

1 INTRODUÇÃO

A humanidade enfrenta atualmente uma tripla crise planetária: as mudanças climáticas, a perda de biodiversidade e a poluição ambiental (UNFCCC, 2022). As mudanças climáticas, causadas pela emissão desenfreada de gases que intensificam o efeito estufa e o aquecimento global, são responsáveis por eventos climáticos extremos por todo o globo. O relatório *State of the Global Climate 2024*, publicado pela *World Meteorological Organization* (WMO), aponta como as queimadas, enchentes, secas e ciclones tropicais foram responsáveis por milhares de mortes e pela maior taxa de migração forçada registrada desde 2008 (WMO, 2025).

Em referência ao ano de 2023, a WMO estimou que existiria 80% de chance de que, em algum momento entre 2024 e 2028, a temperatura média global anual ultrapasse o limite de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (WMO, 2024). Ainda que este aumento seja temporário, a possibilidade de ultrapassagem configuraria um alerta severo quanto ao avanço das mudanças climáticas. Isto porque o aumento de 1,5°C representa a meta de limitação da temperatura definida no Acordo de Paris, vigente desde 2016, quando a probabilidade de que esta faixa fosse ultrapassada era próxima a zero (WMO, 2024).

Já no reporte seguinte da organização, constatou-se que a temperatura média global em 2024 foi de 1,55ºC ± 0,13ºC acima dos níveis pré-industriais, caracterizando-se como o ano mais quente na série histórica de 175 anos e confirmando a estimativa anterior em um curto período de tempo (WMO, 2025).

Ainda mais alarmante, a WMO aponta que cada um dos anos da última década (2015 a 2024), superaram individualmente as médias de temperatura dos anos anteriores (WMO, 2025). Este cenário é reflexo da emissão desenfreada e crescente de GEE, que em 2024 totalizaram 57,7 bilhões de toneladas de gás carbônico equivalente ($GtCO_2eq$) provenientes de diferentes atividades (como uso de energia, processos industriais, agricultura, mudanças no uso da terra e resíduos) (UNEP, 2025).

Ainda que o setor de resíduos tenha a menor representatividade em termos percentuais (apenas 4%), este foi responsável pela emissão de cerca de 2,31

$GtCO_2eq$. Para mais, o setor de resíduos foi classificado como fonte emissora significativa pela UNEP, visto os impactos climáticos significativos a curto prazo associados às emissões de metano (UNEP, 2025). Tais constatações destacam a urgência no controle das emissões atmosféricas em âmbito global, de forma a preservar a saúde e bem estar, a economia, a agricultura e o equilíbrio dos ecossistemas (Szigethy; Antenor, 2020).

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) em referência ao ano de 2024, o Brasil se posicionou como o quinto maior emissor de gases do efeito estufa (GEE). Em 2024, as emissões brutas de GEE foram de 2,145 $GtCO_2eq$, medidas em potencial de aquecimento global em cem anos (GWP_{100}) conforme o 5º Relatório de Avaliação (AR5) do *Intergovernamental Panel on Climate Change* (IPCC) (SEEG, 2025).

Tal cenário ressalta não só os desafios enfrentados nacionalmente no que tange o controle ambiental, mas também a importância da ação governamental nas respostas climáticas, visto seu papel imprescindível na definição e implementação eficiente de normas e diretrizes apropriadas de governança para a ação em diferentes setores da sociedade (Artaxo, 2020).

Do total emitido pelo Brasil em 2024, 95,7 milhões de toneladas de CO2eq (cerca de 5%) foram do setor de resíduos urbanos (RSU) e industriais, sendo que 65,9% (63,1 $MtCO_2eq$) foram provenientes da disposição final em aterros sanitários, lixões e aterros controlados. Desde 1970, este setor tem participação crescente nas emissões de GEE no país, com certa estabilização a partir de 2020, principalmente pelo aumento populacional e a expansão da cobertura dos serviços de saneamento básico (SEEG, 2025).

Ainda que o Brasil tenha tido avanços significativos na gestão de RSU e erradicação de lixões, a ampla aplicação da disposição final em aterros sanitários implica que 53% das emissões totais do setor são provenientes desta lógica de tratamento. Isto relaciona-se com a baixa taxa de reciclagem e compostagem dos resíduos brasileiros: apenas 2% dos resíduos orgânicos e secos são recuperados (SEEG, 2025). Assim, percebe-se que ainda há desafios latentes no reaproveitamento de resíduos sólidos no país (ABREMA, 2024).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, em 2023 foram geradas 80.957.467 toneladas de resíduos sólidos no país, o que equivale a cerca

de 382 kg de RSU gerados por habitante no ano (ABREMA, 2024). Regionalmente, o sudeste apresenta-se como o maior gerador, tendo gerado 49,3% do total nacional (39.949.760 toneladas). Em termos per capita, a região também lidera a geração, apresentando ainda um aumento de 0,6% em 2023 em relação ao ano anterior: de 1,230 para 1,237 kg/(hab.dia) (ABREMA, 2024).

Nesta região localiza-se a cidade de Sorocaba, no interior do Estado de São Paulo. Com uma população de 723.576 habitantes, de acordo com o censo de 2022, Sorocaba é o 27º município mais populoso do Brasil e o 12º do sudeste (IBGE, 2022). A cidade também é signatária do Programa Cidades Sustentáveis (período de 2025 a 2028), cuja agenda visa incorporar princípios sustentáveis no planejamento urbano municipal (Instituto Cidades Sustentáveis, 2023).

Entre marcos importantes no avanço da sustentabilidade local, há a Política Municipal sobre Mudanças Climáticas, instituída pela Lei n° 11.477 de 20 de dezembro de 2016. Por meio dela, o município definiu princípios e diretrizes para a contribuição na mitigação e adaptação às mudanças climáticas, visando orientar a tomada de decisões e promoção de políticas públicas ambientalmente responsáveis, inclusive mediante a criação do Comitê Intersecretarial sobre Mudança do Clima em seu Art. 47, inc. XVI (Sorocaba, 2016a). Sorocaba também aderiu em 2026 ao projeto AdaptaCidades proposto pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), que oferece suporte técnico e estratégico a estados e municípios na elaboração de planos de adaptação climática (SEMA-DF, 2026; ReDUS, 2026).

Em consonância aos compromisso assumidos, em dezembro de 2020 Sorocaba publicou seu 2º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa para os anos-base de 2013 a 2017, que englobou as emissões provenientes dos setores de energia estacionária, transporte e resíduos (Sorocaba, 2020).

No período de análise, nota-se que houve uma diminuição expressiva no total emitido pelos três setores: de 2.166.628 tCO2eq em 2013 para 1.492.421 tCO2eq em 2017, equivalente a uma redução de 31,12%. No entanto, a representatividade da disposição de resíduos cresceu em 6,14%: em 2013, esta foi responsável pela emissão de 247.788 tCO_2eq (11,44% do total) e em 2017 passou para 262.848 tCO2eq (17,61%) (Sorocaba, 2020). Faz-se necessário, portanto, a intensificação na busca por destinações de resíduos que reduzam as emissões de GEE (Kobiyama, 2022).

Sorocaba vivencia um cenário que reflete tanto os desafios enfrentados nacionalmente, quanto as oportunidades para uma gestão municipal sustentável, especialmente no que tange a gestão de RSU. Segundo dados disponibilizados pela Secretaria de Meio Ambiente de Sorocaba (SEMA), em 2023 a coleta domiciliar/comercial recolheu 219.234,03 toneladas de RSU, o equivalente a uma geração per capita de aproximadamente 0,83 kg/(hab.dia). Ainda que a média seja inferior à da região sudeste, 98% dos resíduos são destinados a aterros sanitários, tendo uma taxa de reciclagem de apenas 2% e evidenciando a grande capacidade de reaproveitamento ainda não explorada (SEMA, 2024).

Assim, embora Sorocaba apresente avanços relevantes em sustentabilidade urbana e redução geral de emissões, a gestão de RSU ainda se caracteriza como um problema árduo. A alta dependência de aterros sanitários e a baixa taxa de reciclagem demonstram um potencial significativo de mitigação de emissões de gases de efeito estufa através de estratégias alternativas de destinação e reaproveitamento, como a reciclagem e a compostagem (Szigethy; Antenor, 2020).

Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise acerca do gerenciamento dos RSU da cidade de Sorocaba - SP, através de um estudo de caso, a fim de explorar alternativas de tratamento e disposição final de RSU que possam reduzir as emissões locais de GEE. Assim, almeja-se contribuir para o aprofundamento das discussões acerca do papel da gestão urbana local na desaceleração das mudanças climáticas e do cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (sobretudo ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima) (ONU, 2015).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar e analisar as emissões de GEE decorrentes da disposição e tratamento de RSU em Sorocaba - SP, avaliando o potencial de mitigação mediante a expansão da reciclagem e compostagem como cenários alternativos de gestão.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a gestão de RSU de Sorocaba, identificando o cenário-base do estudo;
- Estimar as emissões de GEE decorrentes da disposição de RSU de Sorocaba em aterros sanitários no ano de 2023, utilizando o Protocolo Global para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Escala Comunitária (GPC);
- Mensurar o impacto nas emissões de GEE das atividades de reciclagem e compostagem existentes no município a partir do Protocolo de Reciclagem e Compostagem para a Contabilidade das Emissões de GEE (Protocolo RC);
- Propor cenários alternativos de gestão com metas progressivas de desvio de aterro para compostagem e reciclagem, analisando e comparando o potencial de redução de emissões em relação ao cenário-base e à inventários de GEE de anos anteriores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas

O efeito estufa é um fenômeno natural essencial para a existência de vida no planeta Terra. Ele acontece através dos chamados gases de efeito estufa (como o metano (CH_4), o vapor de água, óxido nitroso (N_2O) e dióxido de carbono (CO_2)), os quais estão presentes na atmosfera terrestre (Silva; Paula, 2009). Estes gases atuam a partir da incidência de energia solar na atmosfera, sendo que parte da radiação é refletida para o espaço em forma de ondas infravermelhas, enquanto o restante é retido naturalmente pelos gases da atmosfera, proporcionando a manutenção da temperatura média do planeta (Silva, 2008).

A emissão de gases pela ação antrópica, porém, tem tornado a atmosfera mais densa, levando à retenção de uma parcela maior da radiação solar que deveria ser irradiada de volta ao espaço e, por conseguinte, ao aumento da temperatura da atmosfera terrestre e dos oceanos (Silva, 2008).

O dióxido de carbono é o componente mais abundante no balanço de emissões globais, sendo responsável por cerca de 80% dos GEE antropogênicos gerados. Sua emissão se dá, majoritariamente, através da queima de combustíveis fósseis como carvão, gás natural e petróleo. O CO_2 também é adotado como gás de referência na mensuração do Potencial de Aquecimento Global para 100 anos, medido pelo coeficiente GWP_{100}, sigla para *100-year Global Warming Potential* (IPCC, 2014). Ainda que apresente o menor valor nessa escala (GWP_{100} = 1), o dióxido de carbono é continuamente emitido por diferentes fontes, como os setores de transporte e residencial, usinas elétricas, queimadas florestais e processos industriais. Este volume de emissão caracteriza o CO_2 como um dos principais responsáveis pelo aquecimento global (Dalcin; Mangini; Godoi, 2021; Silva, 2008).

O metano, por sua vez, tem GWP_{100} 28 vezes maior que o dióxido de carbono, sendo que 60% do CH_4 presente na atmosfera atualmente é de origem antrópica (IPCC, 2014; Silva, 2008). Este gás é gerado em diferentes atividades humanas, como na pecuária, queima de combustíveis fósseis, tratamento de efluentes e decomposição anaeróbia de matéria orgânica em aterros sanitários (Dalcin; Mangini; Godoi, 2021).

O óxido nitroso, assim como o metano e o dióxido de carbono, já existia na atmosfera, mas sua concentração aumentou em função de processos de uso de fertilizantes na agricultura, na geração de energia, processos industriais e queima de biomassa (Dalcin; Mangini; Godoi, 2021). Em paralelo, o vapor de água, também natural, acaba por intensificar o impacto de GEEs artificiais, dado que este cresce em volume conforme a temperatura do planeta aumenta. Por fim, outros gases-estufa, como hexafluoreto de enxofre (SF_6), PFCs (perfluorcarbonos) e HFCs (hidrofluorcarbonetos), são necessariamente antropogênicos, podendo ser emitidos por processos industriais e pelas redes elétricas (Silva, 2008).

Segundo o Relatório Síntese de Mudança do Clima 2023 do IPCC, 58% das emissões líquidas acumuladas de CO_2 de 1850 a 2019 ocorreram nos primeiros 139 anos do período, enquanto 42% ocorreram nos 29 anos restantes (1990 a 2019) (IPCC, 2023). O alto volume de emissões atribuídas às atividades humanas em um curto período tem acelerado o aquecimento global e contribuído para as mudanças climáticas, que compreendem variações de longo prazo no comportamento do clima de determinada região (Silva, 2008). Estas mudanças implicam em grandes desafios socioeconômicos e ambientais, afetando a saúde e o saneamento, a segurança e a qualidade de vida da população, além da disponibilidade e qualidade de recursos naturais (Tranjan *et al.,* 2024).

As alterações no padrão climático global estão associadas à ocorrência de fenômenos naturais extremos, como secas e ondas de calor, precipitações intensas, ciclones tropicais, inundações e deslizamentos de terra (Tranjan *et al.,* 2024). A pressão sobre os ecossistemas tem se intensificado, sendo constatadas centenas de perdas locais de biodiversidade e eventos de mortandade em massa em função de eventos meteorológicos extremos. Alguns ambientes aproximam-se da irreversibilidade destes impactos, como no caso dos impactos hidrológicos causados pelo derretimento de geleiras ou das mudanças de ecossistemas montanhosos e do Ártico em razão do degelo do permafrost (IPCC, 2023).

O Relatório 2023 do IPCC aponta ainda como “a vulnerabilidade humana e dos ecossistemas são interdependentes” (IPCC, 2023, p. 21), visto que os eventos climáticos extremos afetam a disponibilidade de alimento e água, além de comprometer meios de subsistência e causar a mortalidade humana. Tais efeitos expõem também as desigualdades sociais, forçando o deslocamento e colocando

milhões de pessoas em situação de insegurança alimentar aguda e insegurança hídrica, sendo que os maiores impactos foram observados em “locais e/ou comunidades da África, Ásia, América Central e do Sul, LDCs, Pequenas Ilhas e Ártico, e globalmente para os povos indígenas, pequenos produtores de alimentos e famílias de baixa renda” (IPCC, 2023, p. 21).

Diante da urgência climática enfrentada, surge a necessidade de ação global para o controle de emissões e impactos ambientais. O Acordo de Paris, firmado em 2015 com participação quase universal, foi um dos principais compromissos assumidos, proporcionando o desenvolvimento de políticas e instrumentos regulatórios e econômicos, bem como a definição de metas nacionais e subnacionais. Neste sentido, os países signatários do Acordo devem apresentar suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, sigla para Nationally Determined Contributions), visando a redução das emissões e o aumento de transparência na ação climática (IPCC, 2023; Silva; Silva, 2025).

O Brasil, por sua vez, apresentou sua nova NDC em novembro de 2024, estabelecendo a meta de redução de GEE até 2035 de, no mínimo 59% e idealmente de 67% das emissões em referência ao ano de 2005 (Brasil, 2024). O cumprimento destas metas, no entanto, é condicionado à ação conjunta enquanto país. Assim, o Decreto Nº 11.550 de 5 de junho de 2023 estabelece, em seu Art. 5º-G, que o desenvolvimento e implementação de estratégias de mitigação e adaptação climática devem incluir a participação dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios (Brasil, 2023).

Em consonância com o inc. III do decreto supracitado, Sorocaba foi um dos municípios brasileiros a elaborar seu Plano de Redução de Emissões de GEE (Brasil, 2023; Sorocaba, 2016b). Como meta, o plano definiu a redução de 20% das emissões até 2030 em comparação ao ano de 2012 e estabeleceu também ações de mitigação nos setores de energia, transporte e resíduos. Como ferramenta, o plano determina a utilização e atualização de inventários de emissões, de modo que estes norteiem as estratégias climáticas a serem implementadas (Sorocaba, 2016b).

3.2 Gerenciamento de resíduos sólidos e panorama legal brasileiro

No Brasil, a Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), representando um marco regulatório essencial para a adoção de práticas sustentáveis e promoção da responsabilidade ambiental no manejo de materiais descartados (Cosenza; Andrade; Assunção, 2020). A legislação estabelece objetivos, instrumentos e diretrizes a serem considerados na gestão de resíduos sólidos no país (Brasil, 2010).

Segundo seu texto, resíduos sólidos compreendem materiais, substâncias, objetos ou bens descartados, nos estados sólido ou semissólido, resultantes das atividades humanas (Brasil, 2010). Além disso, a Resolução CONAMA nº 005, de 05 de agosto de 1993, já definia que estes materiais podem ter origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (Brasil, 1993).

Em paralelo, conceituam-se os rejeitos: resíduos sólidos que não possuem possibilidades de tratamento ou recuperação, apenas de disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). Tais materiais, uma vez descartados ou dispostos de maneira incorreta, podem resultar em danos à saúde e à qualidade de vida de pessoas e ambientes (Silva, 2007, *apud* Nogueira; Martina; Silva, 2020).

Para cumprir seus objetivos, a PNRS define princípios importantes. Dentre eles, destaca-se o reconhecimento do resíduo sólido passível de reciclagem ou reaproveitamento como um bem de valor econômico e social. Este entendimento reforça que as diferentes etapas do gerenciamento ambientalmente correto de resíduos sólidos promovem a cidadania e geram empregos, além de mitigar impactos ambientais (Brasil, 2010).

Neste sentido, a PNRS especifica no Art. 9º uma hierarquia de prioridade para o gerenciamento de resíduos, sendo ela: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (Brasil, 2010, tít. III, cap. I, Art. 9º). Por meio desta lógica de gestão, aplicam-se os princípios de prevenção e precaução, minimizando impactos ambientais adversos (Brasil, 2010).

Esta estrutura, portanto, categoriza o manejo em dois conceitos. A destinação ambientalmente correta consiste na valorização dos materiais descartados através da reinserção na cadeia produtiva, podendo incluir a reutilização, a reciclagem, a

compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético. Já a disposição final ambientalmente adequada, preferencialmente empregada para rejeitos, refere-se à alocação ordenada dos rejeitos em aterros sanitários de acordo com as normas técnicas específicas, de forma a prevenir danos ou riscos à saúde pública, à segurança e ao meio ambiente (Brasil, 2010).

Diante desta diferenciação, a ampliação do uso de aterros sanitários como disposição final correta de rejeitos alinha-se não só com a hierarquia determinada para gestão, mas também às metas de erradicação e recuperação de lixões instalados no país, conforme o Art. 54 da PNRS (Brasil, 2010).

Originalmente, previa-se que a desativação deveria ocorrer em etapas de acordo com o tamanho do município, sendo o prazo final em 2014 (Brasil, 2010). Em 2015, diante das dificuldades na implantação por parte dos municípios, o prazo final foi prorrogado até 2021 (Torres, 2015). No entanto, com o Novo Marco do Saneamento Básico, instaurado pela Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020, o prazo foi novamente estendido, desta vez até 02 de agosto de 2024 (Brasil, 2020).

Com o fim do prazo, a desativação dos lixões não foi plenamente alcançada. De acordo com o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento Básico (SINISA), 1.606 lixões e 317 aterros controlados ainda operavam em 2023, representando 31,1% do total de unidades de processamento de resíduos do país. As unidades receberam ainda, respectivamente, 12,18% e 8,7% da massa de resíduos sólidos destinados no país no mesmo ano (SINISA, 2024).

Em contrapartida, os aterros (de inertes e sanitários) representavam 21,9% do total de unidades de processamento e receberam 62,14% da massa de resíduos destinada em 2023. As chamadas unidades de tratamento contemplam unidades de triagem (galpão ou usina), unidades de compostagem, unidade de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e volumosos (ATT), unidade de manejo de resíduos de áreas verdes (galhadas e podas) e unidades de coprocessamento. Por sua vez, estas representam 40,6% do total de instalações, mas receberam apenas 3,71% da massa de resíduos coletada em 2023 (SINISA, 2024).

Segundo a PNRS, a gestão integrada de resíduos sólidos gerados nos respectivos territórios é de responsabilidade dos municípios, os quais devem incorporar a hierarquia de prioridade estabelecida no Art. 9º (Brasil, 2010). Neste contexto, ainda que o tratamento e a disposição ambientalmente correta em aterros

tenham participação significativa, o panorama de gestão de resíduos sólidos do país evidencia grandes desafios a serem superados pelos entes federativos.

São necessários avanços não apenas na eliminação dos lixões, mas também na expansão das práticas de reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos, preferencialmente à disposição final em aterros, que, conforme determinado pela PNRS, deveria limitar-se ao recebimento de rejeitos (Brasil, 2010).

Tais princípios são observados também na Política Estadual de Resíduos Sólidos de São Paulo, estabelecida pela Lei Nº 12.300 de 16 de março de 2006, que determina o incentivo à valorização de resíduos levando em consideração as variáveis ambientais, sociais, culturais, econômicas, tecnológicas e de saúde pública (São Paulo, 2006). O Programa Integra Resíduos é uma das iniciativas paulistas que visam aumentar a eficiência da gestão de resíduos nos municípios. Para isso, o projeto adota o modelo de regionalização, de forma a reduzir custos e viabilizar o acesso a tecnologias de valorização de resíduos, além de fortalecer o planejamento e oferecer apoio técnico e institucional aos municípios (ABREMA, 2026).

Em municípios como Sorocaba, que possuem metas locais de mitigação e adaptação climática, o aumento da valorização de resíduos sólidos e consequente desvio de aterro torna-se um importante pilar estratégico na redução de emissões. Para tanto, faz-se necessário o monitoramento quantitativo destes impactos, visando compreender os processos biológicos de emissão associados ao gerenciamento de resíduos e implementar políticas públicas de redução.

3.3 Aterros sanitários e emissão de GEE

O aterro sanitário é a principal forma de disposição final de resíduos sólidos empregada atualmente no Brasil, conforme abordado na seção 3.2. Fernandes (2009) descreve estas instalações como análogas a um reator bioquímico, onde as principais entradas são os resíduos sólidos e água; e os biogases e líquidos percolados (chorume) são as saídas do processo.

De acordo com a ABNT NBR 8.419, os aterros sanitários são obras de engenharia feitas para enclausurar resíduos sólidos na menor área possível, sendo ela impermeabilizada, e com o menor volume permissível, cobrindo-os periodicamente com uma camada de terra (ABNT, 1992). Devem estar equipados,

também, com sistemas de drenagem de lixiviados e de biogás, visando o controle de odores, minimização do risco de incêndios, prevenção de contaminação do solo e controle de proliferação de vetores de doença (Sousa, 2022; Borges, 2025).

Os resíduos sólidos urbanos, frequentemente destinados aos aterros, possuem composição heterogênea, influenciada por fatores climáticos, contexto socioeconômico, hábitos e cultura (Sousa, 2022). Com isso, o teor de umidade e a quantidade de matéria orgânica também variam em função do material, interferindo na decomposição dos resíduos aterrados (Borges, 2025).

Por conta da cobertura e compactação dos resíduos sólidos, a decomposição da matéria orgânica presente acontece predominantemente em ausência de oxigênio (ambiente anaeróbio) pela ação de mecanismos biológicos e físico-químicos. As etapas, descritas no Quadro 1, podem ser afetadas também pela temperatura, pH e tempo de residência dos resíduos (Borges, 2025).

Quadro 1 – Etapas da digestão anaeróbia em aterros sanitários.

Etapa da digestão anaeróbia	**Descrição**
1. Hidrólise	Macromoléculas orgânicas (carboidratos, proteínas e lipídios) são convertidas por bactérias hidrolíticas em monômeros solúveis (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos).
2. Acidogênese	Bactérias acidogênicas transformam os produtos da hidrólise em ácidos orgânicos voláteis, álcool, hidrogênio e dióxido de carbono.
3. Acetogênese	Bactérias acetogênicas agem na conversão de ácidos graxos e álcoois em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono
4. Metanogênese	Bactérias acetoclásticas e hidrogenotróficas transformam os produtos da acetogênese em metano e dióxido de carbono.

Fonte: Adaptado de Borges, 2025; Santi, 2013.

Como produto da digestão anaeróbia em aterros sanitários, há a geração de biogás. Este é uma mistura gasosa, constituída por metano (CH_4, entre 45% a 75%); dióxido de carbono (CO_2, entre 25% e 50%); vapor de água (H_2O, de 2% a 7%) e outros gases traço (Boarati; Castro, 2024).

Apesar de contar com captura e queima de biogás, os aterros sanitários estão sujeitos à eficiência destes sistemas e da cobertura utilizada, podendo também apresentar emissões fugitivas de GEE pela movimentação de gases no solo (Fernandes, 2009; Schirmer *et al.*, 2023). Reflexo disso é que 53% das emissões

totais do setor de resíduos no Brasil são provenientes desta lógica de tratamento (SEEG, 2025).

Outro fator contribuinte para a emissão de GEE é o transporte de resíduos. Visto que a maioria dos municípios brasileiros não conta com aterros sanitários em seus territórios, os resíduos são transportados por longas distâncias até sua disposição final. No caso do estado de São Paulo, com a redução no número de aterros, as distâncias percorridas entre áreas urbanas e os locais de destinação final têm aumentado. Esta dinâmica favorece o aumento de consumo de combustível nos veículos, gerando maiores emissões de dióxido de carbono (Morais *et al*., 2021).

Neste contexto, e considerando o potencial de geração de metano nos aterros sanitários, torna-se imprescindível a quantificação das emissões ocorridas no âmbito da destinação final. Estas devem ser estimadas com base em metodologias padronizadas e que considerem a decomposição da fração orgânica dos resíduos, conforme detalhado na seção 3.3.1 a seguir (Borges, 2025).

3.3.1 Contabilização e reporte de emissões de GEE

Atualmente, mais da metade da população mundial reside em áreas urbanas: cerca de 4,69 bilhões de pessoas (Ritchie; Samborska; Roser, 2025). No Brasil esta taxa é ainda maior, com 87,4% da população em áreas urbanas (IBGE, 2022). Tendo em vista que as cidades são responsáveis por 70% das emissões globais de GEE, estas se tornam agentes centrais na ação climática (ICLEI, 2021).

Desenvolver políticas públicas de mitigação, no entanto, demanda a compreensão do padrão de emissões para que então sejam propostos planos de ação eficazes para a realidade local (Arioli, 2020). Para isso, são empregados inventários de emissões de acordo com metodologias padronizadas, de forma a estabelecer um panorama de emissões totais e por setor. Inventários são considerados ferramentas de monitoramento histórico de emissões, bem como de criação de bases de dados para a tomada de decisão estratégica (Wilmsen; Gesing, 2016).

Um dos principais métodos de estimativa de emissões adotados por cidades é o Protocolo Global para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Escala Comunitária (GPC), desenvolvido numa parceria entre *World Resources*

Institute (WRI), *C40 Cities Climate Leadership Group* e *Local Governments for Sustainability* (ICLEI). Este protocolo foi desenvolvido a partir das diretrizes do IPCC, propondo a padronização de estimativas e reportes locais de emissão de GEE (Arioli, 2020).

A aplicação do GPC se inicia com a definição dos limites do inventário, para que então as emissões sejam categorizadas de acordo com o seu local de ocorrência. Esta classificação é feita em escopos, diferenciando emissões que ocorrem fisicamente dentro dos limites geográficos da cidade (escopo 1); emissões indiretas da geração de energia elétrica e térmica consumidas dentro dos limites da cidade (escopo 2); e outras emissões geradas fora dos limites geográficos, mas em decorrência de atividades realizadas dentro da cidade (escopo 3) (WRI; C40; ICLEI, 2014).

Dentre as fontes emissoras a serem analisadas, o GPC classifica-as em 6 setores: energia estacionária; transporte; resíduos; processos industriais e uso de produtos (IPPU); agricultura, silvicultura e outros usos da terra (AFOLU); e outros de escopo 3. Os setores dividem-se ainda em subsetores, cujas atividades devem ser avaliadas a fim de determinar sua ocorrência, se suas emissões serão estimadas ou confidenciais, ou se serão incluídas em outro setor (WRI; C40; ICLEI, 2014).

O reporte das informações pode acontecer em dois níveis de acordo com a disponibilidade de dados. O primeiro é o *BASIC*, que o GPC entende como abrangente de fontes de emissão comuns à maioria das cidades (escopo 1 e 2 de Energia Estacionária e Transportes, além de resíduos gerados dentro dos limites geográficos) e, portanto, requer metodologias e dados menos complexos. O nível *BASIC+*, em contrapartida, possui uma maior cobertura de fontes emissoras, somando as atividades do nível *BASIC* com IPPU, AFOLU, transporte transfronteiriço, transmissão de energia e perdas na distribuição (WRI; C40; ICLEI, 2014; Arioli, 2020).

Em relação ao setor de Resíduos, o GPC propõe a análise dos subsetores de tratamento de efluentes, tratamento biológico, incineração e disposição final de resíduos sólidos. Neste último subsetor, foco do presente trabalho, são calculadas as emissões de metano (CH_4) e sua respectiva conversão para dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) de acordo com o GWP100 correspondente (WRI; C40; ICLEI, 2014).

No que tange a mensuração das emissões de GEE decorrentes da disposição final ou tratamento, os modelos matemáticos do GPC consideram a massa de resíduos sólidos dispostos no período de referência e a fração de carbono orgânico degradável (COD) contida neste montante (WRI; C40; ICLEI, 2014).

O valor de COD refere-se à parcela de carbono disponível nos resíduos para decomposição bioquímica e transformação em metano, sendo calculado como um produto entre a composição gravimétrica dos resíduos e a massa de carbono associada a cada tipo de material. (Santos *et al.*, 2018). Assim, a COD influencia diretamente as emissões totais do setor.

Resíduos sólidos dispostos em aterros podem contribuir para as emissões de GEE mesmo séculos após seu descarte, visto que continuam a produzir metano ao longo de sua decomposição. Desta forma, o GPC disponibiliza dois métodos para a estimativa destas emissões (WRI; C40; ICLEI, 2014).

O primeiro é o método de Decaimento de Primeira Ordem (DPO), que contabiliza emissões de GEE no ano de referência independentemente do ano de disposição dos resíduos, admitindo que a COD degrada-se lentamente ao longo dos anos. Apesar de obter estimativas mais precisas em relação ao ano de referência, possui maior complexidade visto a necessidade de um maior histórico acerca da disposição de resíduos (WRI; C40; ICLEI, 2014).

O segundo método sugerido pelo GPC é o Comprometimento de Metano (MC). Esta abordagem baseia-se no ciclo de vida e no balanço de massa para quantificar as emissões geradas por um montante de resíduos dispostos em determinado período, a despeito de quando as emissões de fato ocorrem, e assumindo que todo o COD dos resíduos dispostos irá se degradar e liberar metano imediatamente. Por se tratar de um modelo menos complexo que o DPO, o MC é amplamente utilizado por municípios que possuam limitações quanto a obtenção de dados quantitativos (WRI; C40; ICLEI, 2014).

Além da massa de resíduos e o COD, o cálculo por Comprometimento de Metano demanda ainda a definição do potencial de geração de metano (L_0), que corresponde ao fator de emissão relacionado à quantia de metano (CH_4) gerada por tonelada de resíduos sólidos (WRI; C40; ICLEI, 2014).

Este valor é influenciado pelo COD e pode variar conforme as condições do local de disposição: aterros gerenciados geram mais CH_4 que aterros não

gerenciados (como lixões a céu aberto), visto que, em função do aterramento e compactação, a decomposição dos resíduos ocorre de forma anaeróbia. De maneira análoga, resíduos úmidos ou afetados pela precipitação apresentam menor COD.

3.4 Tecnologias de valorização de resíduos e emissões evitadas

A valorização de resíduos sólidos compreende o uso de tecnologias para agregar valor a materiais descartados, de forma a aproveitá-los antes que estes cheguem aos aterros. Dentre os processos, é possível citar a reciclagem e a compostagem, mas também o aproveitamento energético em aterros, coprocessamento, uso de biodigestores, entre outros (Brandão, 2006; Szigethy; Antenor, 2020).

Tratando das abordagens de interesse ao presente estudo, conceitua-se a reciclagem como a aplicação de processos físicos e/ou químicos para a transformação de resíduos, de forma a torná-los aproveitáveis como matéria-prima secundária e reintroduzi-los na cadeia produtiva (Diniz; Arraes, 2000). De maneira análoga, a compostagem é o método pelo qual a decomposição biológica transforma a matéria orgânica dos resíduos. A degradação aeróbia converte os resíduos em composto orgânico, um produto utilizado como condicionador de solo na agricultura (Zanta; Ferreira, 2003).

A reciclagem de resíduos secos representa uma oportunidade na ação climática. A substituição de matéria-prima virgem pela reciclada preserva recursos naturais ao reduzir sua exploração, além de demandar menos energia elétrica e combustíveis fósseis para a produção de novos bens de consumo. Por consequência, a reciclagem reduz as emissões de GEE quando comparada à produção primária, além de evitar emissões associadas à disposição final caso estes materiais tivessem sido aterrados (Luiz; Suski, 2019).

A compostagem de resíduos orgânicos também traz diversos benefícios ambientais. Considerando que a fração orgânica dos RSU é a principal fonte de geração de metano em aterros sanitários, a compostagem evita emissões associadas à disposição final. Ademais, o uso do composto final na agricultura melhora a retenção de água do solo e estimula a redução de uso de fertilizantes

sintéticos. Por consequência, a compostagem evita emissões decorrentes do processo de fabricação destes fertilizantes (Kobiyama, 2022).

Para além das emissões de GEE evitadas, esta cadeia de valorização de resíduos proporciona a geração de empregos e a economia em custos públicos com aterros sanitários, ampliando os benefícios da gestão eficiente de resíduos sólidos (Freitas; Pires; Benincá, 2024).

As emissões evitadas no ciclo de vida com a adoção da reciclagem e compostagem, no entanto, não são calculadas da mesma forma que as emissões efetivas reportadas conforme o GPC. Assim, os benefícios destes processos requerem metodologias específicas de mensuração, permitindo uma maior compreensão acerca do potencial de mitigação local.

3.4.1 Protocolo RC: estimativa de emissões evitadas

Uma das metodologias disponíveis para mensuração de emissões evitadas com a valorização de resíduos é o *Recycling and Composting Emissions Protocol For Estimating Greenhouse Gas Emissions and Emissions Reductions Associated with Community Level Recycling and Composting*, aqui referido como Protocolo RC. O documento foi elaborado pelo ICLEI USA frente ao reconhecimento de que a reciclagem e compostagem são aliados na ação contra as mudanças climáticas, e que governos locais possuem alta influência na ampliação de programas de valorização de resíduos (ICLEI USA, 2013).

Segundo o Protocolo RC, a reciclagem e compostagem podem contribuir tanto para a emissão de GEE quanto para sua redução. Processos como uso de veículos para coleta, consumo de energia na separação e processamento de material reciclável, a operação de equipamentos para compostagem e o transporte dos produtos finais (material reciclado e composto orgânico) são responsáveis pela emissão de GEE. Em contrapartida, as emissões são evitadas na aquisição, produção e transporte de matéria-prima virgem; com o aumento de estoques de carbono em florestas pela reciclagem de produtos de papel e madeira; e com o desvio de resíduos de aterros sanitários (ICLEI USA, 2013).

Assim, a metodologia estima as emissões ou reduções por meio de fatores de emissão associados ao ciclo de vida de cada material. Para os benefícios da

reciclagem, somam-se os créditos correspondentes ao uso de material reciclado em substituição à matéria-prima virgem com os créditos relacionados à disposição final evitada. Já para a compostagem, além dos créditos da disposição final, são considerados créditos de substituição de produção de fertilizantes (ICLEI USA, 2013).

O Protocolo RC pode ser aplicado individualmente ou em conjunto com o GPC, o que motivou sua seleção como parte da metodologia do presente trabalho. Embora seja recomendado para comunicar localmente os benefícios climáticos da compostagem e reciclagem, o Protocolo RC ressalta que as emissões evitadas não devem ser subtraídas do valor bruto de emissões inventariadas e sim reportadas separadamente (ICLEI USA, 2013).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Aquisição de dados e definição da metodologia

Inicialmente, a estimativa de emissões associadas à disposição final em aterros sanitários foi desenvolvida sob as diretrizes do Protocolo Global para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Escala Comunitária (GPC), em consonância ao 2º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Sorocaba, 2020). Esta base metodológica foi selecionada visando a necessidade de garantir a comparabilidade com o histórico local e a coerência com instrumentos de gestão climática já empregados pelo município. O potencial de redução de emissões de GEE por reciclagem e compostagem, por sua vez, foi obtido pela aplicação do Protocolo RC, em função de sua compatibilidade com o GPC.

As informações acerca da gestão de resíduos foram disponibilizadas em 2024 pela Secretaria de Meio Ambiente, Proteção e Bem-Estar Animal de Sorocaba (SEMA) e utilizadas para a caracterização da gestão de RSU no município e das condições do cenário-base (2023). Este levantamento descreve quantitativamente a geração e disposição final de resíduos sólidos, bem como a coleta de recicláveis por cooperativas e a presença de compostagem no município. A partir dos dados consolidados nos Anexos I e II, o trabalho estimou as emissões de GEE relativas à disposição em aterro sanitário e as emissões evitadas pela compostagem e reciclagem no cenário-base.

Em complemento, foram utilizadas informações do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) para a caracterização inicial (Sorocaba, 2014). Na ausência de estudos gravimétricos mais recentes, optou-se pela utilização do estudo gravimétrico desenvolvido pela empresa Sanex em 2011, considerando que este é o levantamento oficial referenciado no PMGIRS vigente e no Inventário municipal de GEE (Sorocaba, 2014; Sorocaba, 2020).

Os cenários alternativos de desvio de aterro basearam-se nas metas e estratégias de mitigação do Plano de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Sorocaba (Sorocaba, 2016b), visando a quantificação dos benefícios decorrentes da reciclagem e compostagem no que tange as emissões de GEE. Por fim, os fatores de emissão e demais parâmetros de cálculo foram selecionados em

consonância com o inventário municipal, o Protocolo GPC, o Protocolo RC e o *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (WRI; C40; ICLEI, 2014; ICLEI, 2013; IPCC, 2019).

4.2 Estimativa de emissões de GEE do setor de resíduos sólidos em 2023

No 2º inventário de emissões, o município optou pelo nível *BASIC* de reporte do GPC, que, no que tange o setor de resíduos, engloba o inventário dos escopos 1 (emissões geradas dentro dos limites da cidade) e 3 (emissões que ocorrem fora dos limites da cidade, mas que sejam decorrentes da geração de resíduos dentro do município) (Sorocaba, 2020).

As atividades foram avaliadas a fim de determinar quais fontes de emissão seriam inventariadas, categorizando as demais de acordo com as notações exigidas pelo GPC: NO, para aquelas que não ocorrem; NE, para aquelas que não foram estimadas; e IE, quando foram incluídas no inventário de outro setor. O Anexo III relaciona os registros considerados no inventário municipal, assim como a justificativa para aqueles que não foram incluídos.

Estas informações, bem como a definição dos limites do inventário municipal (Anexo IV), fundamentaram a caracterização das fontes de emissão consideradas no presente estudo, conforme é apresentado na seção 4.2.1.

4.2.1 Delimitação e caracterização do escopo para aplicação do GPC

Conforme requerido pelo GPC, foram definidos os limites de aplicação da metodologia no Quadro 2.

Quadro 2 – Caracterização dos limites considerados para aplicação do GPC neste trabalho.

Limites - aplicação GPC	Informações
Nome do município	Sorocaba
Estado	São Paulo (SP)
País	Brasil
Ano do inventário	2023
Limites geográficos	Alumínio, Araçoiaba da Serra, Iperó, Itu, Mairinque, Porto Feliz, Salto de Pirapora, Votorantim.
Área (KM²)	449,872 km² (IBGE, 2022)
População	723.576 habitantes (IBGE, 2023)
PIB per capita	R$ 81.273,66 (IBGE, 2022)
Clima	Subtropical
Bioma	Mata Atlântica

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 3, por sua vez, contempla as fontes de emissão avaliadas, bem como as notações atribuídas àquelas não compreendidas neste trabalho. Tratando das atividades abordadas nas estimativas, optou-se pelo recorte do subsetor “Disposição RS”, o qual abrange a disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários ou lixões. Não foram incluídas as emissões decorrentes de processos de incineração ou tratamento biológico, visto sua inexpressividade em relação à gestão integrada de resíduos no município (Sorocaba, 2020). Além disso, não foram encontrados dados suficientes acerca do tratamento de efluentes no ano de 2023, o que impossibilitou o cálculo das emissões provenientes desta atividade.

Ademais, tendo em vista que os resíduos sólidos gerados em Sorocaba são dispostos no aterro sanitário CGR Iperó (SEMA, 2024), ou seja, fora dos limites geográficos da cidade, esta etapa do trabalho restringiu-se às emissões do escopo Escopo 3 no setor de resíduos e subsetor de disposição, não abrangendo os subsetores de efluentes, incineração e tratamento biológico.

Quadro 3 – Fontes de emissão avaliadas para caracterização do cenário-base (NO: não ocorre; NE: não estimado; IE: incluído em outro setor).

(continua)

Setor	Escopo GPC	Ref. GPC	Atividade	Subsetor	Notação (NE; NO; IE)	Justificativa
Resíduos	1	III.1.1	Emissões de resíduos sólidos gerados dentro do limite da cidade e descartados em aterros ou lixões dentro do limite da cidade	Disposição RS	NO	Os resíduos sólidos de Sorocaba foram encaminhados para o CGR Iperó (Sorocaba, 2020; SEMA, 2024). Há aterro de inertes no município, mas este não dispõe resíduos biodegradáveis (Sorocaba, 2014).
	3	III.1.2	Emissões de resíduos sólidos gerados dentro do limite da cidade, mas descartados em aterros ou lixões fora do limite da cidade	Disposição RS	-	Estimativa realizada neste trabalho (Sorocaba destinou para o CGR Iperó, fora dos limites geográficos) (SEMA, 2024)
	1	III.1.3	Emissões de resíduos gerados fora do limite da cidade e descartados em aterros ou lixões dentro do limite da cidade	Disposição RS	NO	Não havia aterro sanitário em operação no município (SEMA, 2024).
	1	III.2.1	Emissões de resíduos sólidos gerados dentro do limite da cidade que são tratados biologicamente dentro do limite da cidade	Tratamento biológico RS	NE	Não havia tratamento expressivo (Sorocaba, 2020; SEMA, 2024).
	3	III.2.2	Emissões de resíduos sólidos gerados dentro do limite da cidade, mas tratados biologicamente fora do limite da cidade	Tratamento biológico RS	NE	Não havia tratamento expressivo (Sorocaba, 2020; SEMA, 2024).
	1	III.2.3	Emissões de resíduos gerados fora do limite da cidade, mas tratados biologicamente dentro do limite da cidade	Tratamento biológico RS	NE	Não havia tratamento expressivo (Sorocaba, 2020; SEMA, 2024).
	1	III.3.1	Emissões de resíduos sólidos gerados e tratados dentro do limite da cidade	Incineração RS	NO	Não havia incineração dos resíduos gerados e tratados no município (SEMA, 2024).

Quadro 3 – Fontes de emissão avaliadas para caracterização do cenário-base (NO: não ocorre; NE: não estimado; IE: incluído em outro setor).

(conclusão)

Setor	Escopo GPC	Ref. GPC	Atividade	Subsetor	Notação (NE; NO; IE)	Justificativa
Resíduos	3	III.3.2	Emissões de resíduos sólidos gerados dentro do limite da cidade, mas tratados fora do limite da cidade	Incineração RS	NE	Sorocaba destinou resíduos para incineração em Mauá - SP em anos anteriores (Sorocaba, 2020), mas não havia informações sobre envio em 2023 (SEMA, 2024).
	1	III.3.3	Emissões de resíduos gerados fora do limite da cidade, mas tratados dentro do limite da cidade	Incineração RS	NE	A cidade conta com empresas que realizam o processo (Sorocaba, 2020), mas não foram obtidos dados da esfera privada.
	1	III.4.1	Emissões de efluentes gerados e tratados dentro do limite da cidade	Efluentes	NE	Insuficiência de dados disponíveis para estimativa de emissões.
	3	III.4.2	Emissões de efluentes gerados dentro do limite da cidade, mas tratados fora do limite da cidade	Efluentes	NE	Insuficiência de dados disponíveis para estimativa de emissões.
	1	III.4.3	Emissões de efluentes gerados fora do limite da cidade, mas tratados dentro do limite da cidade	Efluentes	NE	Insuficiência de dados disponíveis para estimativa de emissões.

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Cálculo das emissões de GEE para o ano de 2023 (cenário-base)

Em função dos dados disponíveis e visando a consistência com o 2º inventário municipal, priorizou-se a utilização do método de Comprometimento de Metano proposto pelo GPC. A Equação 1 apresenta a estimativa por Comprometimento de Metano para resíduos sólidos enviados ao aterro (WRI; C40; ICLEI, 2014). O método foi empregado individualmente para a estimativa de emissões da disposição de RSU e da disposição de resíduos de poda provenientes de manutenções em áreas públicas.

$$Emissões\ CH_4 = MRS \times L_0 \times (1 - f_{rec}) \times (1 - OX) \quad (1)$$

Onde:

- Emissões CH_4 = total de emissões de metano (CH_4) em toneladas métricas;
- MRS = massa de resíduos sólidos enviada ao aterro no ano de referência, em toneladas métricas;
- L_0 = Potencial de geração de metano, obtido pela Equação 3;
- f_{rec} = Fração de metano recuperado no aterro por sistema flare ou recuperação de energia (em abordagem conservadora e conforme considerado pelo 2º inventário municipal, assumiu-se que 100% do biogás gerado é liberado para a atmosfera (f_{rec} = 0));
- OX = fator de oxidação (assumiu-se 0,1, correspondente a aterros bem gerenciados).

A fração de carbono orgânico degradável COD foi obtida através da Equação 2, que incorpora coeficientes padronizados de teor de carbono de acordo com o tipo de material (WRI; C40; ICLEI, 2014).

$$COD = (0.15 \times A) + (0.2 \times B) + (0.4 \times C) + (0.43 \times D) + (0.24 \times E) + (0.15 \times F)$$
(2)

Onde:

- COD = carbono orgânico degradável (toneladas de Carbono);
- A = fração de comida no resíduo sólido (toneladas);
- B = fração de resíduos de poda no resíduo sólido (toneladas);
- C = fração de papel no resíduo sólido (toneladas);
- D = fração de madeira no resíduo sólido (toneladas);
- E = fração de têxteis no resíduo sólido (toneladas);
- F = fração de resíduo industrial no resíduo sólido (toneladas).

A partir do estudo gravimétrico empregado no PMGIRS e no 2º inventário municipal (Sanex, 2011, *apud* Sorocaba, 2014; Sorocaba, 2020), os materiais foram

agrupados conforme as categorias dos coeficientes da Equação 2 (comida, resíduos de poda/jardim, papel, madeira, têxteis e resíduo industrial). Posteriormente, os índices da composição gravimétrica obtidos foram aplicados sobre o montante de resíduos sólidos destinados ao aterro em 2023 de forma a determinar a massa de cada um no período de referência. Ressalta-se ainda que, em consonância ao inventário municipal, resíduos industriais não foram contabilizados para o cálculo, pois não há especificação no estudo gravimétrico ou dados conclusivos sobre a esfera privada (Sorocaba, 2020).

Especificamente na estimativa de emissões da disposição de resíduos de poda, a definição da fração destes resíduos para o cálculo do COD não considerou o estudo gravimétrico, visto que o Anexo I especifica a massa aterrada em 2023 desse material. Os demais coeficientes da Equação 2 não foram considerados nesta estimativa, dado que estes materiais foram incluídos na estimativa para a disposição de RSU.

Posteriormente, aplicou-se a Equação 3 a seguir para obtenção do fator L_0 (WRI; C40; ICLEI, 2014).

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (3)$$

Onde:

- L_0 = Potencial de geração de metano;
- FCM = Fator de correção de Metano baseado no tipo de aterro para o ano de deposição (em consonância com o 2º inventário municipal, assumiu-se o valor 1,0 para aterros gerenciados);
- COD = Carbono orgânico degradável no ano de deposição, fração (toneladas de Carbono/tonelada de resíduos; obtido pela Equação 2);
- COD_f = Fração de COD efetivamente degradado (considera que parte do carbono orgânico não se degrada; assumiu-se o valor de 0,6, conforme GPC);
- F = Fração em volume de metano no biogás (assumiu-se o valor padrão do GPC de 0,5);
- 16/12 = relação estequiométrica entre metano e carbono.

Por fim, as emissões de metano estimadas em toneladas de CH_4 foram transformadas em toneladas de Dióxido de Carbono equivalente (CO_2eq), que engloba o potencial de aquecimento global (GWP) na medição e permite comparação entre emissões de GEE. A conversão foi feita utilizando GWP de 100 anos detalhado no 5º Relatório do IPCC para o metano, multiplicando as emissões em toneladas de CH_4 por 28 e obtendo as emissões em tCO_2eq (WRI; C40; ICLEI, 2014).

4.3 Estimativas de benefícios da reciclagem e compostagem de resíduos

A estimativa dos benefícios da reciclagem e compostagem foi realizada mediante a aplicação do Protocolo RC ao cenário-base e aos cenários alternativos de gestão de resíduos. Para contabilizar as emissões evitadas por meio da reciclagem, para cada tipologia de disposição final aplicada, caso o material não seja reaproveitado, deve-se multiplicar a massa de resíduos reciclados durante o ano inventariado pelo fator de emissão decorrente da substituição de matéria-prima virgem por insumos reciclados (ICLEI USA, 2013).

Subsequentemente, computa-se o benefício do desvio da destinação final, multiplicando-se a massa de resíduos reciclados no período inventariado pelo fator de emissão correspondente à destinação que o resíduo receberia originalmente. O somatório das duas etapas, aplicadas para cada tipo de material, define as emissões totais evitadas pela reciclagem no ano de referência (ICLEI USA, 2013).

Visto que os fatores de emissão fornecidos pelo protocolo são expressos em toneladas métricas de CO_2 equivalente por tonelada curta de resíduos sólidos (MTCO_2eq/short ton), aplicou-se o fator de conversão de unidades de 1,10231 sobre a massa de resíduos sólidos de Sorocaba, já que o dado foi reportado originalmente em toneladas métricas.

A Equação 4 consolida os passos expressos pelo Protocolo RC para a contabilização de emissões evitadas pela reciclagem de resíduos sólidos, enquanto os fatores de emissão podem ser verificados no Anexo V (Adaptado de ICLEI USA, 2013).

$$EE_{rec,\,total} = \sum_{i=1}^{n} [1.10231 \times MRS_i \times (FE_{ciclo,i} + FE_{disp.\,i,j})] \quad (4)$$

Onde:

- $EE_{rec,total}$ = Emissões totais evitadas pela reciclagem (tCO_2eq);
- 1,10231 = Fator de conversão de toneladas métricas para toneladas curtas;
- MRS_i = Massa do material *i* coletada para reciclagem no ano de referência (toneladas);
- $FE_{ciclo,i}$ = Fator de emissão para o uso de recicláveis em detrimento de insumos virgens para o material *i* (conforme Anexo V);
- $FE_{disp.i,j}$ = Fator de emissão da disposição evitada para o material *i* na instalação de tipo *j*;
- *i* = Categoria do material (papel, plástico, metal, etc.);
- *j* = Tipo de instalação de destino final (aterro com ou sem recuperação de energia, central de incineração, etc.).

A massa de resíduos recicláveis (MRS_i) foi obtida através da soma entre as quantias coletadas em 2023 pelas cooperativas Coreso e Coopereso, segundo dados da SEMA (2024). No entanto, para aplicação da Equação 4, fez-se necessário o agrupamento dos materiais coletados de acordo com as categorias de materiais recicláveis expressas pelo Protocolo RC, conforme a coluna “Material” do Anexo V (Adaptado de ICLEI USA, 2013).

De forma análoga à reciclagem, os benefícios da compostagem foram quantificados com base no Protocolo RC a partir do impacto do desvio de resíduos orgânicos da disposição final e dos créditos de ciclo de vida associados. Tendo em vista que o município de Sorocaba não possui taxa de compostagem significativa, foram identificados os resíduos que seriam passíveis desse tratamento, como restos de comida e resíduos de poda (SEMA, 2024; ICLEI USA, 2013).

Os fatores de emissão empregados nesta etapa (Anexo VI) integram não só as emissões evitadas pela disposição final, mas também os créditos por substituição de fertilizantes sintéticos pelo composto orgânico potencialmente gerado. Ademais, assim como no cálculo dos benefícios da reciclagem, aplicou-se a constante de 1,10231 visando a conversão dos dados de massa de resíduos para toneladas

curtas, conforme requerido pelo protocolo. O procedimento de cálculo foi consolidado na Equação 5 (Adaptado de ICLEI USA, 2013).

$$EE_{comp,\,total} = \sum_{i=1}^{n} [1.10231 \times MRS_i \times (FE_{fert,i} + FE_{disp.\,i,j})] \quad (5)$$

Onde:

- $EE_{comp,total}$ = Emissões totais evitadas pela compostagem (tCO_2eq);
- 1,10231 = Fator de conversão de toneladas métricas para toneladas curtas;
- MRS_i = Massa do material orgânico *i* coletada no ano de referência (toneladas);
- $FE_{fert,i}$ = Fator de emissão para o crédito de substituição na produção de fertilizantes (*Fertilizer production displacement credit*) para o material *i* (conforme Anexo VI);
- $FE_{disp.i,j}$ = Fator de emissão da disposição evitada para o material *i* na instalação de tipo *j*;
- *i* = Categoria do material (papel, plástico, metal, etc.);
- *j* = Tipo de instalação de destino final (aterro com ou sem recuperação de energia, central de incineração, etc.).

A quantificação dos benefícios da reciclagem no ano de 2023, estabelecido como cenário-base, integrou premissas relevantes associadas à gestão de resíduos no município. Segundo a SEMA (2024), os resíduos sólidos domiciliares gerados em Sorocaba são destinados pela coleta comum ao CGR Iperó. Portanto, adotou-se o aterro sanitário como disposição evitada na reciclagem e compostagem. Assumiu-se também, como forma de conservadorismo conforme explicitado pelo 2º Inventário Municipal, que não há recuperação de biogás na instalação (Sorocaba, 2020).

Por sua vez, os benefícios da compostagem no cenário-base não foram contabilizados, visto que não houve compostagem significativa de resíduos no ano de 2023 (SEMA, 2024).

4.3.1 Aplicação em cenários alternativos de gestão de resíduos

Visando compreender o potencial de redução de emissões de GEE a partir do desvio de resíduos de aterro sanitário, a metodologia do Protocolo RC foi aplicada a diferentes cenários de gestão de resíduos em Sorocaba. Os cenários alternativos foram definidos com base nas metas de reciclagem estabelecidas no Plano de Redução de Emissões de GEE de Sorocaba e são especificados nas Tabelas 1 e 2. Na ausência de metas específicas para a compostagem, adotou-se as mesmas taxas usadas para a reciclagem de resíduos (Sorocaba, 2016b).

Tabela 1 – Distribuição proposta dos cenários de gestão de recicláveis.

Destinação	**Porcentagens em relação aos resíduos passíveis de reciclagem**				
	Cenário-base (2023)	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Cenário 4**
Aterro sanitário sem recuperação de biogás ou energia	98%	88%	76%	25%	0%
Reciclagem	2%	12%	24%	75%	100%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Distribuição proposta dos cenários de gestão de resíduos orgânicos.

Destinação	**Porcentagens em relação aos resíduos passíveis de compostagem**				
	Cenário-base (2023)	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Cenário 4**
Aterro sanitário sem recuperação de biogás ou energia	100%	88%	76%	25%	0%
Compostagem	0%	12%	24%	75%	100%

Fonte: Autoria própria.

O volume de referência considerado para os cálculos refere-se à massa enviada para aterro em 2023 (SEMA, 2024). Sobre esse valor, aplicaram-se os índices gravimétricos para determinar a massa de cada material destinado que seria passível de reciclagem ou compostagem. Para os resíduos de poda na contabilização de benefícios da compostagem, somou-se o valor indicado na gravimetria com o total de resíduos de poda aterrados em 2023. Por fim, verificou-se

a massa correspondente à taxa sugerida em cada cenário, para cada material reciclável/compostável, e determinou-se o potencial de emissões evitadas por esses processos através das etapas da seção 4.3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Emissões de GEE decorrentes da disposição de resíduos sólidos no cenário-base

Para a quantificação das emissões decorrentes da disposição de RSU, constatou-se que foram encaminhadas 220.260,59 toneladas de RSU ao CGR Iperó em 2023 a partir dos dados disponibilizados pela SEMA (2024). A composição gravimétrica descrita em Sorocaba (2014) está disposta na coluna "Especificação no estudo gravimétrico", sendo a nomenclatura readequada para as categorias exigidas pelo COD, conforme observado na Tabela 3. A gravimetria foi aplicada sobre a quantidade total de resíduos aterrados para definir a fração de cada tipo de material pertinente ao cálculo do COD, como também pode ser verificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Definição da fração de cada material no montante enviado ao CGR Iperó em 2023 para estimativa de emissões da disposição de RSU.

Categorias exigidas para o cálculo da COD	Especificação no estudo gravimétrico	Composição gravimétrica total (%)	Fração enviada ao aterro em 2023 (t)
Comida (coef. A)	Restos de comida	41,42	91.231,94
Resíduos de poda (coef. B)	Lixo de jardim	6,76	14.889,62
Papel (coef. C)	Papel em bom estado + papel em mau estado + papel kraft + papelão	15,40	33.920,13
Madeira (coef. D)	Madeira	0,02	44,05
Têxteis (coef. E)	Tecido em bom estado + tecido em mau estado	2,76	6.079,19
Resíduo industrial (coef. F)	NA	NA	0,00

Fonte: Autoria própria.

A composição gravimétrica indica uma predominância de resíduos orgânicos, o que é característico de cidades brasileiras, onde a fração orgânica corresponde a cerca de 45,3% (ABRELPE, 2020). No entanto, isto representa um desafio na mitigação de GEE do município tendo em vista que, quanto mais matéria orgânica, maior é o potencial de geração de metano nos aterros sanitários (Landi, 2013).

Os parâmetros do cálculo do COD para a disposição de resíduos de poda provenientes de manutenção pública em aterros sanitários foram obtidos através do Anexo I, e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Definição da fração de cada material no montante enviado ao CGR Iperó em 2023 para estimativa de emissões da disposição de resíduos de poda.

Categorias exigidas para o cálculo da COD	Especificação no Anexo I	Fração enviada ao aterro em 2023 (t)
Comida (coef. A)	NA	0,00
Resíduos de poda (coef. B)	Disp. final Resíduos públicos (podas)	25.830,81
Papel (coef. C)	NA	0,00
Madeira (coef. D)	NA	0,00
Têxteis (coef. E)	NA	0,00
Resíduo industrial (coef. F)	NA	0,00

Fonte: Autoria própria.

Os valores da Tabela 3 e 4 foram aplicados nas Equações de 1 a 3 em duas etapas. Os coeficientes adotados e seus respectivos resultados são apresentados nas Tabela 5 (disposição de RSU) e Tabela 6 (disposição de resíduos de poda).

Tabela 5 – Aplicação das Equações 1, 2 e 3 para estimativa de emissões de CH_4 decorrentes da disposição de RSU em 2023.

Equação 1					
Emissões CH_4 (t) - disposição de RSU	11.415,14				
MRS (t)	**L0**	**f(rec)**	**OX**		
220.260,59	0,06	0,00	0,10		
Equação 2					
COD (t)	31.708,71				
A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
91.231,94	14.889,62	33.920,13	44,05	6.079,19	0,00
Equação 3					
L0	0,06				
FCM	**t COD/t RS**	**COD(f)**	**F**		
1,00	0,14	0,60	0,50		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Aplicação das Equações 1, 2 e 3 para estimativa de emissões de CH_4 decorrentes da disposição de resíduos de poda em 2023.

Equação 1					
Emissões CH_4 (t) - Disposição de resíduos de poda	218,11				
MRS (t)	**L0**	**f(rec)**	**OX**		
25.830,81	0,01	0,00	0,10		
Equação 2					
COD (t)	5.166,16				
A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
0,00	25.830,81	0,00	0,00	0,00	0,00
Equação 3					
L0	0,01				
FCM	**t COD/t RS**	**COD(f)**	**F**		
1,00	0,02	0,60	0,50		

Fonte: Autoria própria.

Realizada a conversão, verifica-se que a disposição de resíduos sólidos em aterro no ano de 2023 resultou em uma emissão total de 325.730,87 tCO_2eq, conforme Tabela 7.

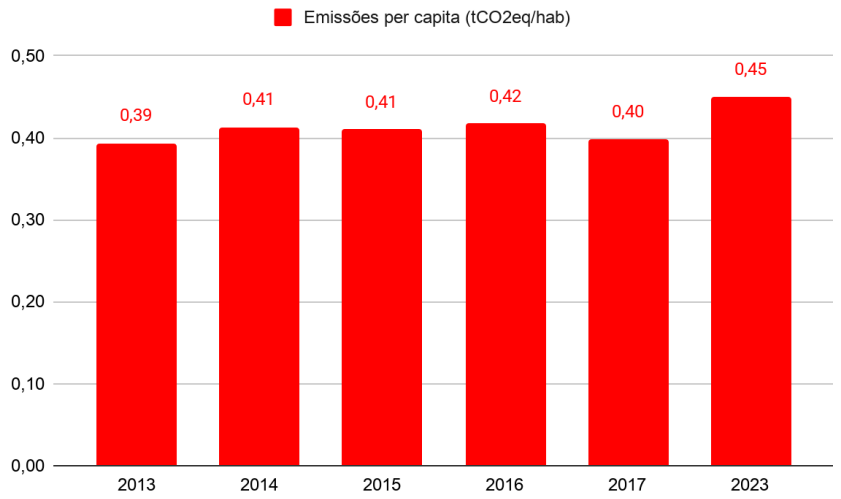
Tabela 7 – Emissões totais do subsetor de disposição RS em 2023.

Resíduo	**Emissões (tCH_4)**	**Emissões (tCO_2eq)**
Disposição de RSU	11.415,14	319.623,84
Disposição de resíduos de poda	218,11	6.107,03
Total	**11.633,25**	**325.730,87**

Fonte: Autoria própria.

Em comparação a 2013, observa-se um incremento de 31,4% nas emissões brutas da disposição final de resíduos em aterro sanitário no ano de 2023. Aliado a um aumento de 14,3% nas emissões per capita no mesmo período (Figura 1), tais resultados sugerem que o crescimento das emissões não deriva apenas de fatores demográficos. Este pode estar associado também a alterações no padrão de consumo e geração/descarte de resíduos no município que, historicamente, são processos que acompanham o desenvolvimento econômico e aumento de renda (Bacciotti; Torres, 2024).

Figura 1 – Emissões per capita do subsetor de disposição de resíduos sólidos em Sorocaba.



Fonte: Autoria própria.

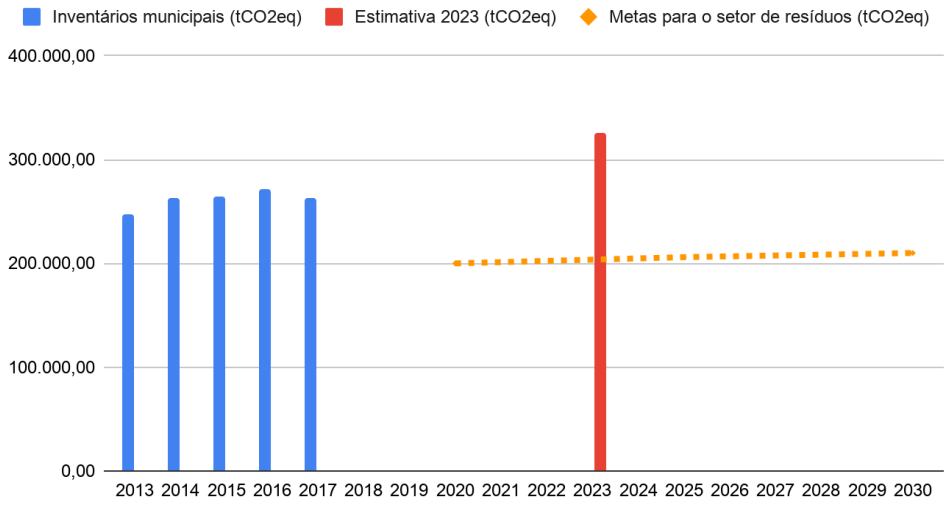
Com a Política Municipal sobre Mudanças Climáticas, Sorocaba estabelece em seu Art. 3º o objetivo de contribuir para a “redução das emissões antrópicas de gases de efeito estufa em relação às suas diferentes fontes” (Sorocaba, 2016a, cap. II, Art. 3º, inc. II). Contudo, a intensificação das emissões no ano de 2023 e a manutenção da baixa taxa de desvio de resíduos de aterros sanitários ao longo dos anos, revela uma tendência divergente ao compromisso fixado, indicando que os instrumentos previstos pela legislação não foram efetivamente aplicados à gestão de resíduos.

Nota-se, ainda, que as emissões consequentes apenas do aterramento de resíduos em 2023 foram superiores a todas as projeções realizadas no Plano de Redução de Emissões de GEE de Sorocaba para o setor de Resíduos, o qual abrange não só a disposição final de RSU, mas também o tratamento de efluentes, a incineração e tratamento biológico de RSU (Sorocaba, 2016b).

A diferença entre as projeções e os dados atuais, demonstrada pela Figura 2, aponta a necessidade de reavaliação de metas municipais, de forma a refletir o crescimento populacional e a dinâmica socioeconômica do município. A atualização das metas é essencial para garantir a eficiência da estratégia local de desenvolvimento sustentável e mitigação de mudanças climáticas prevista pela Política Municipal sobre Mudanças Climáticas, além de compor os esforços de mitigação de emissões assumidos pelo Brasil por meio da Contribuição

Nacionalmente Determinada (NDC) em consonância com o Acordo de Paris (Fonseca, 2022).

Figura 2 – Emissões de disposição de RS versus metas do Plano de Redução de Emissões de Sorocaba.



Fonte: Autoria própria.

Ademais, embora as emissões tenham aumentado, observa-se que a massa de RSU e resíduos de poda aterrados per capita reduziu cerca de 13,6% de 2017 a 2023. Com este paradoxo, é importante ressaltar que o 2º Inventário Municipal de Emissões utilizou o software *Clearpath*, promovido pela instituição ICLEI USA, utilizando fatores de emissão do *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Sorocaba, 2020).

Posto que o Protocolo GPC, utilizado como metodologia no presente estudo, foi alinhado ao *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (WRI; C40; ICLEI, 2014), os resultados divergem em função da atualização de coeficientes de cálculo. Neste contexto, ressalta-se a importância da revisão e atualização dos reportes municipais de emissões de GEE, visando, além da manutenção do monitoramento, o emprego de bases científicas atuais e completas (IPCC, 2019).

5.2 Emissões evitadas pela reciclagem e compostagem no cenário-base

Considerando as categorias de materiais do Protocolo RC, determinou-se na Tabela 8 a massa de cada resíduo encaminhado com base nos tipos de materiais destinados pelas cooperativas de Sorocaba (Anexo II).

Tabela 8 – Massa de resíduos recicláveis considerada no cenário-base, a partir dos dados de destinação das cooperativas atuantes em Sorocaba.

Categoria - Protocolo RC	Materiais inclusos - Anexo II	MRSi (t)
Embalagens de papelão ondulado	Papelão	663,38
Papel misto (geral)	Papel	769,45
Plásticos mistos	Plástico	784,23
Metais mistos	Sucata de ferro + latão	264,41
Fios de cobre	Cobre	1,44
Latas de alumínio	Alumínio	4,50
Vidro	Vidro	616,72
PS	Isopor + EPS	18,10

Fonte: Autoria própria.

Empregando os valores encontrados na Equação 4, verifica-se que o município evitou a emissão de 11.101,93 toneladas de CO_2eq a partir da reciclagem em 2023 (conforme Tabela 9). Analisando o balanço de emissões, observa-se que os benefícios da reciclagem equivalem a aproximadamente 3,4% das emissões associadas ao aterramento de resíduos (325.730,87 tCO_2eq), o que evidencia a predominância da disposição em aterros sanitários e limita o potencial de descarbonização do município.

O maior impacto diz respeito à destinação de papel misto e embalagens de papel ondulado, visto sua expressividade quantitativa, o potencial metanogênico destes materiais quando dispostos em aterro sanitário e os créditos gerados pelo emprego do papel como matéria-prima em seu ciclo de vida (ICLEI USA, 2013).

Tabela 9 – Emissões evitadas pela reciclagem em 2023 para o município de Sorocaba.

Material coletado em 2023	MRSi (t)	FE(ciclo,i)	FE(disp,i,j)	EE (tCO2e)
Embalagens de papelão ondulado	663,38	-3,11	-2,31	-3.963,38
Papel misto (geral)	769,45	-3,52	-2,16	-4.817,60
Plásticos mistos	784,23	-0,98	-0,04	-881,75
Metais mistos	264,41	-3,97	-0,04	-1.168,76
Fios de cobre	1,44	-4,89	-0,04	-7,80
Latas de alumínio	4,50	-8,89	-0,04	-44,31
Vidro	616,72	-0,28	-0,04	-217,54
PS	18,10	0,00	-0,04	-0,80
EE(rec,total) (tCO2e)		**-11.101,93**		

Fonte: Autoria própria.

A baixa taxa de reciclagem em Sorocaba (2%) e de incorporação de seus benefícios é reflexo também dos desafios enfrentados pelo modelo cooperativo adotado. O trabalho de Santos *et al*. (2016) investigou as condições em uma das cooperativas ativas no município no período, relatando como a alta rotatividade de cooperados, a sobrecarga e a variação nos ganhos em função de flutuações de preços geram prejuízos ao sistema. Além disso, foram apontados pontos determinantes na eficiência da triagem. Um deles é a contaminação por resíduos orgânicos na origem, que inviabiliza a reciclagem. Existem ainda limitações quanto aos requisitos de compradores, o que leva ao descarte de materiais tecnicamente recicláveis, mas que não encontram mercado local ou que não podem ser adequados aos requisitos de clientes por insuficiência de tecnologia ou mão de obra nas cooperativas (Santos *et al.,* 2016).

Além disso, a ausência de registros de tratamento biológico no período analisado representa uma lacuna relevante no potencial de mitigação de emissões de GEE, dado que a fração orgânica é uma fonte expressiva de geração de metano em condições anaeróbias (aterro sanitário).

5.3 Projeção de emissões evitadas nos cenários alternativos

A Tabela 10 reúne a categorização dos resíduos recicláveis expressos no estudo gravimétrico de Sorocaba de acordo com o Protocolo RC. Considerando a

fração enviada de cada material reciclável ao CGR Iperó em 2023 como cenário-base, estabeleceu-se a quantidade de resíduos que seriam destinados à reciclagem em cada cenário alternativo.

Tabela 10 – Massas de resíduos recicláveis consideradas em cada cenário alternativo, baseado na composição gravimétrica em relação ao total enviado ao CGR Iperó em 2023. (continua)

Categoria - Protocolo RC	**Materiais inclusos a partir da gravimetria**	**Composição gravimétrica (%)**	**MRSi (t) - CA 1 (12%)**	**MRSi (t) - CA 2 (24%)**	**MRSi (t) - CA 3 (75%)**	**MRSi (t) - CA 4 (100%)**
Recicláveis mistos	Embalagem longa vida	1,65	436,12	872,23	2.725,72	3.634,30
Latas de alumínio	Latas de alumínio	0,72	190,31	380,61	1.189,41	1.585,88
Lingote de alumínio	Alumínio (embalagem)	0,16	42,29	84,58	264,31	352,42
Latas de aço	Latas de aço	0,96	253,74	507,48	1.585,88	2.114,50
Fio de cobre	Fio	0,77	203,52	407,04	1.272,00	1.696,01
Vidro	Vidro (inteiro) + vidro (quebrado)	5,34	1.411,43	2.822,86	8.821,44	11.761,92
PEAD	PEAD (filme) + PEAD (rígido)	2,93	774,44	1.548,87	4.840,23	6.453,64
PEBD	PEBD (filme) + PEBD (rígido)	1,13	298,67	597,35	1.866,71	2.488,94
PET	PET (incolor) + PET (colorido) + PET (óleo) + PET (embalagem)	2,25	594,70	1.189,41	3.716,90	4.955,86
PP	PP (filme) + PP (rígido) + embalagem metalizada	1,37	362,11	724,22	2.263,18	3.017,57
PS	Poliestireno expandido + poliestireno (rígido)	0,53	140,09	280,17	875,54	1.167,38
PVC	PVC	0,43	113,65	227,31	710,34	947,12
Embalagens de papelão ondulado	Papelão	5,79	1.530,37	3.060,74	9.564,82	12.753,09
Madeira serrada padronizada	Madeira	0,02	5,29	10,57	33,04	44,05
Papel misto (geral)	Papel em bom estado + papel em mau estado + papel kraft + embalagem (papel e plástico)	9,86	2.606,12	5.212,25	16.288,27	21.717,69
Metais mistos	Ferrosos	0,42	111,01	222,02	693,82	925,09
Plásticos mistos	Outros plásticos (rígido) + outros plásticos (filme)	1,08	285,46	570,92	1.784,11	2.378,81

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Massas de resíduos recicláveis consideradas em cada cenário alternativo, baseado na composição gravimétrica em relação ao total enviado ao CGR Iperó em 2023.

(conclusão)

Categoria - Protocolo RC	Materiais inclusos a partir da gravimetria	Composição gravimétrica (%)	MRSi (t) - CA 1 (12%)	MRSi (t) - CA 2 (24%)	MRSi (t) - CA 3 (75%)	MRSi (t) - CA 4 (100%)
Computadores pessoais	Eletrônico	0,59	155,94	311,89	974,65	1.299,54
Concreto	Entulho	1,80	475,76	951,53	2.973,52	3.964,69

Fonte: Autoria própria.

De maneira análoga, definiu-se a massa de resíduos passíveis de compostagem em relação ao total de RSU (com base na gravimetria) e resíduos de poda encaminhados ao aterro sanitário em 2023 (a partir do Anexo I), resultando na massa de resíduos aproveitáveis pela compostagem em cada cenário alternativo atribuído, como é demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Massas de resíduos compostáveis consideradas em cada cenário alternativo, baseado na composição gravimétrica em relação ao total enviado ao CGR Iperó em 2023.

Categoria - Protocolo RC	Materiais inclusos - gravimetria	Composição gravimétrica (%)	MRSi (t) - CA 1 (12%)	MRSi (t) - CA 2 (24%)	MRSi (t) - CA 3 (75%)	MRSi (t) - CA 4 (100%)
Restos de comida	Restos de Comida	41,42	10.947,83	21.895,66	68.423,95	91.231,94
Poda	Lixo de jardim + Resíduos de poda (SEMA, 2024)	6,76	4.886,45	9.772,90	30.540,32	40.720,43

Fonte: Autoria própria.

A partir destas informações, estimou-se as emissões evitadas pela reciclagem (Tabela 12) e pela compostagem (Tabela 13), de forma a projetar o potencial de mitigação no município. A modelagem dos cenários mostra uma progressão significativa nos benefícios dos tratamentos elencados, mas requer também uma avaliação quanto à viabilidade operacional para o município.

Tabela 12 – Emissões evitadas pela reciclagem nos cenários alternativos de gestão de resíduos.

Material coletado em 2023	FE(ciclo,i)	FE(disp,i,j)	Emissões Evitadas (EE) pela reciclagem (tCO_2eq)			
			CA 1 (12%)	CA 2 (24%)	CA 3 (75%)	CA 4 (100%)
Recicláveis mistos	-2,80	-1,75	-2.187,34	-4.374,69	-13.670,90	-18.227,87
Latas de alumínio	-8,89	-0,04	-1.873,29	-3.746,59	-11.708,08	-15.610,78
Lingote de alumínio	-6,97	-0,04	-326,78	-653,57	-2.042,40	-2.723,19
Latas de aço	-1,80	-0,04	-514,65	-1.029,30	-3.216,55	-4.288,74
Fio de cobre	-4,89	-0,04	-1.106,01	-2.212,02	-6.912,57	-9.216,76
Vidro	-0,28	-0,04	-497,87	-995,73	-3.111,67	-4.148,89
PEAD	-0,86	-0,04	-768,30	-1.536,60	-4.801,89	-6.402,52
PEBD	0,00	-0,04	-13,17	-26,34	-82,31	-109,74
PET	-1,11	-0,04	-753,88	-1.507,76	-4.711,75	-6.282,33
PP	0,00	-0,04	-15,97	-31,93	-99,79	-133,05
PS	0,00	-0,04	-6,18	-12,35	-38,60	-51,47
PVC	0,00	-0,04	-5,01	-10,02	-31,32	-41,76
Embalagens de papelão ondulado	-3,11	-2,31	-9.143,23	-18.286,46	-57.145,19	-76.193,58
Madeira serrada padronizada	-2,46	-1,21	-21,39	-42,77	-133,66	-178,21
Papel misto (geral)	-3,52	-2,16	-16.317,25	-32.634,51	-101.982,83	-135.977,11
Metais mistos	-3,97	-0,04	-490,70	-981,40	-3.066,87	-4.089,16
Plásticos mistos	-0,98	-0,04	-320,96	-641,91	-2.005,98	-2.674,63
Computadores pessoais	-2,35	-0,04	-410,84	-821,68	-2.567,74	-3.423,66
Concreto	-0,01	-0,04	-26,22	-52,44	-163,89	-218,52
EE(rec,total) (tCO2e)			**-34.799,04**	**-69.598,07**	**-217.493,98**	**-289.991,97**

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Emissões evitadas pela compostagem nos cenários alternativos de gestão de resíduos.

Material coletado em 2023	FE(fert,i)	FE(disp,i,j)	Emissões Evitadas (EE) pela compostagem (tCO_2eq)			
			CA 1 (12%)	CA 2 (24%)	CA 3 (75%)	CA 4 (100%)
Restos de comida	-0,03	-1,47	-18.101,86	-36.203,72	-113.136,61	-150.848,81
Poda	-0,03	-0,79	-4.416,83	-8.833,67	-27.605,22	-36.806,96
EE(comp,total) (tCO2e)			-22.518,69	-45.037,38	-140.741,83	-187.655,77

Fonte: Autoria própria.

Haja vista que, no cenário-base, apenas 2% dos resíduos foram destinados para a reciclagem (SEMA, 2024), os cenários 1 (12% de desvio) e 2 (24% de desvio) apresentam-se como panoramas de maior viabilidade estratégica.

No cenário 1, as emissões evitadas pela reciclagem atingiriam 34.799,04 tCO2eq, enquanto a compostagem poderia evitar a emissão de 22.518,69 tCO2eq. Embora sejam os menores benefícios nominais mensurados, o cenário 1 pode ser interpretado como uma meta realista a curto/médio prazo, haja vista que possibilitaria triplicar os benefícios observados no ano-base de 2023.

Já o cenário 2 apresenta um maior potencial de mitigação de emissões. A reciclagem poderia evitar 69.598,07 tCO2eq, o que equivale a cerca de 21,4% das emissões brutas de disposição final no cenário-base. Quanto à compostagem, o benefício seria de 45.037,38 tCO2eq evitadas, reforçando como o tratamento biológico, mesmo em escala moderada, mostra-se eficaz na mitigação de GEE.

Verificou-se que, para os recicláveis, os materiais de maior contribuição nos benefícios são o papel e o papelão. Como mencionado anteriormente, estes materiais possuem benefício duplo, ao passo que apresentam um alto fator de emissão evitada quando empregados como matéria-prima e também quando desviados de aterro sanitário, já que possuem alto potencial metanogênico (ICLEI USA, 2013). Em paralelo, os metais demonstram-se como outra grande oportunidade de mitigação de emissões, visto que podem ser reciclados múltiplas vezes e possuem alto valor no mercado (ANCAT, 2022; Soares *et al.*, 2024).

A transição para os cenários supracitados requer a superação de desafios comuns às cidades brasileiras e deve ser pautada em políticas públicas eficientes, como descrito por Freitas, Pires e Benincá (2024). O município já possui quatro Pontos de Entrega Voluntária (PEV) instalados, que configuram um sistema cuja ampliação poderia beneficiar as taxas de desvio de aterro (SEMA, 2024). Neste sentido, a conscientização ambiental da população torna-se um pilar essencial, ao passo que incentiva o consumo responsável e a correta segregação de resíduos na fonte, além de fomentar a divulgação dos PEVs.

Aliado à otimização das rotas de coleta seletiva, o município pode ampliar incentivos e capacitação das cooperativas atuantes, bem como de catadores independentes, visando o aumento da taxa de reciclagem, a geração de empregos e o estímulo à economia circular (Freitas; Pires; Benincá, 2024).

Este incentivo foi o objetivo do Bolsa Reciclagem, instituído em Minas Gerais em 2011. O programa remunera organizações de catadores de reciclagem por seus serviços associados à segregação, enfardamento e comercialização de resíduos recicláveis, sendo que no mínimo 90% dos valores recebidos pelas organizações devem obrigatoriamente ser repassados aos catadores cooperados ou associados. Através do instrumento de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) de natureza urbana, Minas Gerais obteve benefícios sociais, ambientais e econômicos: inserção social e capacitação de catadores, garantia da continuidade de comercialização de recicláveis, prolongamento do uso de recursos naturais na economia, entre outros (Dias, 2022).

Para a fração orgânica, somam-se os desafios da facilitação de infraestrutura para tratamento biológico e da correta segregação na fonte. No entanto, a valoração destes resíduos possibilita a redução dos custos de disposição final, além de gerar empregos e permitir a venda ou utilização do composto orgânico em pomares municipais (Freitas; Pires; Benincá, 2024; Zago; Barros, 2019).

O Projeto Feiras e Jardins Sustentáveis, realizado na cidade de São Paulo - SP, evidenciou a viabilidade técnica do tratamento biológico em larga escala em ambiente urbano. Com capacidade de processamento de até 10 toneladas por dia de resíduos de feiras livres e poda, a iniciativa promoveu o desvio da fração orgânica de aterros e o reaproveitamento do composto na arborização pública (Galvão, 2019). O projeto demonstrou, portanto, um modelo eficiente para frações de fácil segregação na fonte, como é o caso dos resíduos provenientes de podas públicas no município de Sorocaba.

Os cenários 3 e 4 (75% e 100% de desvio, respectivamente) correspondem a quadros mais ambiciosos. Apesar do elevado potencial de mitigação de GEE sob a ótica do ciclo de vida, a implementação das taxas de desvio demandam uma alta maturidade no fluxo de gestão de resíduos. Além da educação ambiental e da eficiência da coleta segregada de resíduos, a reciclagem e compostagem em larga escala sofre impacto de outros fatores: a necessidade de investimento em infraestrutura, a heterogeneidade dos materiais, a contaminação e o controle de qualidade dos produtos gerados nos processos (Franchi, 2025; Medeiros, 2022).

O Programa Lixo Zero, implementado em Florianópolis - SC pela prefeitura em 2018, apresentou resultados positivos a partir da coleta seletiva e estratégias

multifacetadas de gestão integrada de resíduos sólidos, promovendo, por meio de parcerias público-privadas, a valorização de resíduos (Braga *et al*., 2020).

Florianópolis também: aumentou a infraestrutura de coleta de resíduos orgânicos e secos, inclusive porta-a-porta; instaurou programas de educação ambiental para a população; promoveu a valorização, capacitação e reconhecimento de catadores e grupos sociais envolvidos no fluxo de gestão de resíduos; e fomentou a criação de leis de responsabilidade ambiental (Braga *et al*., 2020).

Como efeito, o município atingiu as metas de 2020 antes do prazo estipulado, atingindo o desvio de 37% de recicláveis secos e 45% de orgânicos. Os benefícios também incluíram a economia de 520 mil reais em custos de gestão de resíduos orgânicos e 6 milhões de reais em relação aos recicláveis, além de gerar 94,5 mil reais a partir do composto orgânico produzido. Na esfera social, o projeto beneficiou mais de 800 pessoas e gerou empregos em diferentes áreas, promovendo também a inclusão através da reserva de vagas (Braga *et al.*, 2020).

O caso de Florianópolis demonstra como a atuação governamental e a mobilização de diferentes setores da sociedade é essencial para a melhoria da gestão de resíduos sólidos e para o desenvolvimento sustentável. A eficiência desse processo garante não só o desvio de aterro e a valorização de resíduos, mas também contribui para a redução das emissões de disposição final e promove ganhos econômicos, sociais e ambientais.

O projeto, ganhador do Prêmio Lixo Zero 2019 do Instituto Lixo Zero Brasil (Braga *et al*., 2020), pode servir como modelo para municípios como Sorocaba, que enfrentam desafios mas que firmaram compromissos relevantes quanto ao desenvolvimento sustentável.

6 CONCLUSÃO

A partir do diagnóstico inicial, foi possível identificar que a gestão de resíduos sólidos em Sorocaba é altamente dependente de aterros sanitários, visto que 98% dos resíduos gerados em 2023 foram destinados ao CGR Iperó e apenas 2% para a reciclagem, não havendo compostagem significativa.

O alto volume destinado, aliado à predominância de resíduos orgânicos, levou ao aumento de 31,4% nas emissões decorrentes da disposição final de 2023 em comparação ao ano de 2013. O incremento nas emissões per capita e a manutenção da baixa taxa de valorização de resíduos indicam que, além do crescimento demográfico, os resultados podem estar associados a mudanças no padrão local de consumo e descarte.

Constatou-se que a emissão de GEE associada à disposição final em 2023 foi superior às metas estabelecidas para todo o setor de Resíduos no Plano de Redução de Emissões de GEE. Isto evidencia não somente a necessidade de revisão e atualização de metas, instrumentos e programas de gestão climática de Sorocaba, mas também o distanciamento do município em relação aos compromissos de mitigação de emissões antrópicas assumidos através da Política Municipal sobre Mudanças Climáticas.

A análise dos cenários alternativos de gestão demonstrou que, mesmo em escala reduzida, a ampliação da reciclagem e compostagem pode representar uma oportunidade essencial na mitigação de emissões. As emissões evitadas pela reciclagem variaram de 34.799 tCO2eq (cenário 1) a 289.991,9 tCO2eq (cenário 4), enquanto no cenário-base o processo teria evitado uma menor quantidade de emissões: 11.101,93 tCO2eq. Para a compostagem, as emissões evitadas poderiam ser de 22.518,69 tCO2eq a 187.655,77 tCO2eq, sendo este um potencial inexplorado na gestão municipal de resíduos, visto que não houve compostagem no cenário-base.

A transição para os cenários alternativos avaliados, porém, requer intervenções em diferentes etapas do fluxo atual de resíduos. São necessárias políticas públicas eficientes, visando a expansão de programas de educação ambiental; a otimização e aumento da cobertura das coletas convencional e coletiva;

a capacitação e incentivo às cooperativas e catadores independentes; e o investimento em infraestrutura.

O aprimoramento da gestão integrada de resíduos sólidos reflete no alto potencial de mitigação de emissões de GEE, além de contribuir com a economia circular. Municípios como Florianópolis - SC demonstram também que o investimento e esforço público na valorização de resíduos é convertido em benefícios ambientais, sociais e econômicos, permitindo o desenvolvimento sustentável.

Ademais, a integração entre o GPC e o Protocolo RC demonstrou-se vantajosa na construção do balanço de emissões de Sorocaba. A combinação possibilitou mensurar o impacto de emissões efetivas do município, os benefícios da gestão atual frente ao ciclo de vida dos materiais, e o potencial de mitigação de emissões mediante a reestruturação da gestão atual. Analisar o panorama geral do município permite que tomadores de decisão desenvolvam políticas e programas adaptados à realidade local, direcionando esforços de forma estratégica para progredir em oportunidades de mitigação.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Disponível em: https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-8419-92-Apresentacao-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-de-Residuos-Solidos-Urbanos.pdf. Acesso em: 25 mai. 2026.

ABREMA. **Governo de SP lança cartilha para transformar a gestão de resíduos no estado.** São Paulo: ABREMA, 2026. Disponível em: https://www.abrema.org.br/2026/04/28/governo-de-sp-lanca-cartilha-para-transformar-a-gestao-de-residuos-no-estado/. Acesso em 23 jul. 2026.

ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 18 jul. 2025.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama-2020-V5-unicas-1.pdf. Acesso em: 5 mai. 2026.

ANCAT. Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis. **Atlas Brasileiro de Reciclagem.** São Paulo: ANCAT, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstreams/6cdc9708-ef18-43e2-9f53-6133e79bf964/download. Acesso em: 6 mai. 2026.

ARIOLI, M. S. **Sistematização de um inventário de emissões de gases de efeito estufa para mobilidade urbana.** 2020. Dissertação (Doutorado em Sistemas de Transportes) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/211262/001115545.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 26 mai. 2026.

ARTAXO, P. **As três emergências que nossa sociedade enfrenta**: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. Estudos Avançados, v. 34, n. 100, p. 53-66, set./dez. 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.34100.005. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ea/a/TRsRMLDdzxRsz85QNYFQBHs/?lang=pt. Acesso em: 14 jul. 2025.

BACCIOTTI, M. O. S.; TORRES, M. O. **O Impacto da densidade urbana nas emissões de gases de efeito estufa: evidências para o Brasil em múltiplas escalas com dados em painel.** ANPEC - Economia Regional e Urbana, 2024. Disponível em: https://www.anpec.org.br/encontro/2024/submissao/files_I/i10-cc4acc41dd89c287a0ae5c8342aebc6a.pdf. Acesso em: 22 jul. 2026.

BOARATI, S. R. S.; CASTRO, M. C. A. A. **Composição do biogás em aterro sanitário de porte médio:** análise temporal. Revista Geociências, v. 43, n. 1, p.

47-57, 2024. Disponível em: https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/download/17920/12997/93400. Acesso em: 25 mai. 2026.

BORGES, M. M. P. **Tecnologias de captação e tratamento de biogás em aterros sanitários**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2025. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/5560/1/TCC_Matheus%20Martins.pdf. Acesso em: 2 jun. 2026.

BRAGA, L. C *et al*. **Cooperação e Desenvolvimento:** Um estudo de caso sobre sustentabilidade na cidade de Florianópolis através do Programa Lixo Zero. Santiago: CEPAL, 2020. Disponível em: https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso74-CooperacaoeDesenvolvimento.pdf. Acesso em 18 mai. 2026.

BRANDÃO, J. R. **Análise de sistemas de valorização de resíduos via compostagem e reciclagem e sua aplicabilidade nos municípios mineiros de pequeno porte.** 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/ec4bb9ce-8849-40c4-84a7-f878fdac4f20/content. Acesso em: 28 mai. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **RESOLUÇÃO CONAMA nº 5, de 5 de agosto de 1993**. Dispõe sobre o gerenciamento de resíduos sólidos gerados nos portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários .Brasília: MMA, 1993. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=130. Acesso em: 2 ago. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 11.550, de 5 de junho de 2023**. Dispõe sobre o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. Brasília: Presidência da República, 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11550.htm. Acesso em: 23 mai. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 2 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445/2007. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 18 mar. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **A NDC do Brasil**: compromissos climáticos (2013-2024). Brasília: MMA, 2024. Disponível em:

https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC/a-ndc-do-brasil-2024-2013-2024.pdf. Acesso em: 25 mai. 2026

C40 CITIES. **Greenhouse Gas Emissions Interactive Dashboard**. Londres: C40, 2025. Disponível em: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/C40-cities-greenhouse-gas-emissions-interactive-dashboard?language=en_US. Acesso em: 18 mai. 2026.

DALCIN, G.; MANGINI, L. F. K.; DE GODOI, L. **Química Ambiental e o impacto ambiental relacionado aos gases de efeito estufa**. Caderno Intersaberes, v. 10, n. 27, p. 117–134, 2021. Disponível em: https://www.cadernosuninter.com/index.php/intersaberes/article/view/1984. Acesso em 19 mai. 2026.

DIAS, A. L. S. **Aplicação de instrumentos econômicos na política brasileira de resíduos sólidos na transição para economia circular.** Tese de Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/780bed9a-78a8-4ebf-9f99-a4fe2b8187ce/content. Acesso em: 22 jul. 2026.

DINIZ, M. B.; ARRAES, R. A. **Reciclagem: Custos e Benefícios Econômicos, Sociais e Ambientais**. Anais do Congresso Brasileiro de Custos - ABC, Recife, 2000. Disponível em: https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3024. Acesso em: 28 mai. 2026.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental.** 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/1048616d-242f-4bbc-baf3-1a7da691cbe5/content. Acesso em: 22 mai. 2026.

FONSECA, A. Y. S. **Crédito de carbono na esfera dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/044f9e36-bcd4-4f94-9673-f0c87f626084/content. Acesso em: 5 mai. 2026.

FRANCHI, N. S. **Economia circular e reciclagem de plásticos:** análise das barreiras tecnológicas e regulatórias da pirólise no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2025. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/server/api/core/bitstreams/54043450-8c65-446d-9b45-f62ade43fdbf/content. Acesso em: 6 mai. 2026.

FREITAS, M. F.; PIRES, M. M.; BENINCÁ, D. **Fragilidades e potencialidades na gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.** Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 16, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/urbe/a/VphbjGPyh6QDYKDc4X6tK4m/?lang=pt. Acesso em: 6 mai. 2026.

GALVÃO, R. G. **Compostagem em áreas urbanas: lições aprendidas no projeto feiras e jardins sustentáveis da Lapa, São Paulo - SP, Brasil.** Tese de Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, Universidade Nove de Julho, São Paulo - SP, 2019. Disponível em: https://bibliotecatede.uninove.br/bitstream/tede/2050/2/Rafael%20Golin%20Galv%c3%a3o.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

IBGE. **Panorama do Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?localidade=BR. Acesso em: 18 jul. 2025.

IBGE. **Relação da população dos municípios para publicação no TCU**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/37734-relacao-da-populacao-dos-municipios-para-publicacao-no-tcu.html. Acesso em: 2 jun. 2026.

ICLEI. **Por que é importante conhecer as emissões de gases de efeito estufa nas cidades?** América do Sul: ICLEI, 2021. Disponível em: https://americadosul.iclei.org/porque-e-importante-conhecer-as-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-nas-cidades/. Acesso em: 26 mai. 2026.

ICLEI USA. **Recycling and Composting Emissions Protocol**. Oakland: ICLEI USA, 2013. Disponível em: https://icleiusa.org/recycling-composting-emissions-protocol/. Acesso em: 10 jul. 2025.

INSTITUTO CIDADES SUSTENTÁVEIS. **Sorocaba - Cidades Sustentáveis**. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.cidadessustentaveis.org.br/painel-cidade/detalhes/3849. Acesso em: 10 jul. 2026.

IPCC. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva: IPCC, 2019. Disponível em: https://www.ccacoalition.org/resources/2019-refinement-2006-ipcc-guidelines-national-greenhouse-gas-inventories. Acesso em: 22 abr. 2026.

IPCC. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2014. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 19 mai. 2026.

IPCC. **Relatório Síntese do AR6**: Mudança do Clima 2023 (Versão em Português). Tradução MCTI/SIRENE. Brasília: MCTI, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 23 mai. 2026.

KOBIYAMA, S. E. **Avaliação das emissões de gases de efeito estufa no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos:** análise das emissões diretas e evitadas de dióxido de carbono equivalente. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa

Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237521. Acesso em: 18 jul. 2025.

LANDI, M. O. **Análise e simulação de modelos matemáticos para a estimativa da geração de gases em bioprocessos de decomposição anaeróbia de resíduos sólidos em aterros sanitários.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro - SP, 2013. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6edb9a33-375e-45da-bf7d-78d391af57f2/content. Acesso em: 5 mai. 2026.

LUIZ, B. V; SUSKI, C. A. **Análise de ciclo de vida dos processos de valorização de resíduos sólidos domiciliares em Florianópolis-SC para redução de gases de efeito estufa.** Metodologias e Aprendizado, v. 2, 2019. Disponível em: https://scholar.archive.org/work/hrx7qgfaqrhtjefauln53mkwmu/access/wayback/http://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/metapre/article/download/1299/1005. Acesso em: 28 mai. 2026.

MEDEIROS, A. F. **Compostagem de resíduos sólidos urbanos no Brasil**: principais desafios e perspectivas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Pombal - PB, 2022. Disponível em: https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/27107. Acesso em: 6 mai. 2026.

MORAIS, L. *et al.* **Regional Distance Routes Estimation for Municipal Solid Waste Disposal, Case Study São Paulo State, Brazil.** Energies, v. 14, n. 13, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en14133964. Acesso em 23 jul. 2026.

NOGUEIRA, L. I. A.; MARTINS, I. C.; MIRANDA, G. R. S. **A gestão de resíduos sólidos urbanos e o desenvolvimento sustentável:** uma revisão. Environmental Scientiae, v.2, n.1, p.48-57, 2020. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2674-6492.2020.001.0005. Disponível em: https://www.cognitionis.inf.br/index.php/environmentalscientiae/article/view/CBPC2674-6492.2020.001.0005/67. Acesso em: 23 mai. 2026.

ReDUS. **AdaptaCidades | São Paulo.** ReDUS, 2026. Disponível em: https://www.redus.org.br/adapta-cidades-sao-paulo. Acesso em 23 jul. 2026.

RITCHIE, H.; SAMBORSKA, V.; ROSER, M. **Urbanization**. Our World in Data, 2025. Disponível em: https://ourworldindata.org/urbanization. Acesso em: 26 mai. 2026.

SANTI, L. **Influência da adição de enzimas e microrganismos sobre a digestão anaeróbia de dejetos bovinos e suínos**. 2013. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2013. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/96514. Acesso em: 25 mai. 2026.

SANTOS, A. L. *et al.* **Resíduos Sólidos Urbanos para geração de energia:** uma abordagem de reaproveitamento energético apresentada à gestão do município de Angra dos Reis. Anais do 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio

Ambiente, Bento Gonçalves - RS, 2018. Disponível em: https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=619&ano=_sexto. Acesso em: 1 abr. 2026.

SANTOS, F. F. *et al.* **Atores da cadeia de reciclagem:** influência e impactos na atividade de triagem de materiais em uma cooperativa de Sorocaba-SP. Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 85-101, 2016. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/d1c7/e8d71eed7a3782247b2532759ee73c3c0304.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

SÃO PAULO. **Lei Nº 12.300, de 16 de março de 2006.** Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes. São Paulo: Assembleia Legislativa do Estado, 2006. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2006/lei-12300-16.03.2006.html. Acesso em 23 jul. 2026.

SCHIRMER, W. N. *et al.* **Biossistemas aplicados à mitigação de metano em emissões fugitivas de aterros sanitários:** uma breve revisão. Revista Principia, v. 60, n. 63, p. 977-992. DOI: http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6451. Disponível em: https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/download/6451/1958. Acesso em: 25 mai. 2026.

SEEG. **Relatório Analítico SEEG 13**: Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. São Paulo: SEEG, 2025. Disponível em: https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2026/03/SEEG13-relatorio-analitico-BR.pdf. Acesso em: 3 mar. 2026.

SEMA. Secretaria de Meio Ambiente, Proteção e Bem-Estar Animal de Sorocaba. **Informações sobre a gestão de resíduos sólidos em 2023.** Sorocaba, 2024. Não publicado. Documento cedido pelo órgão em comunicação direta em 2024. Disponível nos Anexos I e II deste trabalho.

SEMA-DF. Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal. **Iniciativa AdaptaCidades.** Distrito Federal, 2026. Disponível em: https://www.sema.df.gov.br/iniciativa-adaptacidades. Acesso em 23 jul. 2026.

SILVA, R. W. C.; PAULA, B. L. **Causa do aquecimento global:** antropogênica versus natural. Terræ Didática, v. 5, p. 41-49, 2009. Disponível em: http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/. Acesso em: 20 mai. 2026.

SILVA, C. R. **Geodiversidade do Brasil:** conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 264 p. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/items/08dabc39-c522-4cb5-af12-477721668c75. Acesso em: 19 mai. 2026.

SILVA, G. R. C. DE O.; SILVA, G. L. DE O. **Emissões de gases do efeito estufa:** explorando os fundamentos da sustentabilidade e os principais compromissos globais. Revista Jurídica do MPRO, ano VIII, n.1, 2025. Disponível em:

https://revista.mpro.mp.br/revistajuridica/article/view/131/93. Acesso em: 20 mai. 2026.

SINISA. Ministério das Cidades. **Relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: Resíduos Sólidos – 2024. Brasília: Ministério das Cidades, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/RELATORIO_SINISA_RESIDUOS_SOLIDOS_2024_v2.pdf. Acesso em: 25 mai. 2026.

SOARES, A. R. R. *et al*. **Economia circular na reciclagem de resíduos metálicos no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso (Curso técnico em logística), ETEC Deputado Ary de Camargo Pedroso, Piracicaba, 2024. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/32671. Acesso em: 6 mai. 2026.

SOROCABA. **2º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Sorocaba**. São Paulo: ICLEI América do Sul, 2020. Disponível em: https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/19/2020/12/30-ly-sorocaba-gee-digital-copy.pdf. Acesso em: 13 jul. 2025.

SOROCABA. **Lei nº 11.477, de 20 de dezembro de 2016**. Institui a Política Municipal sobre Mudança do Clima de Sorocaba. Sorocaba: Câmara Municipal, 2016a. Disponível em: https://sorocaba.camarasempapel.com.br/Arquivo/Documents/legislacao/html/L114772016.html. Acesso em: 18 jul. 2025.

SOROCABA. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Urbano. **Plano de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) de Sorocaba**. Sorocaba: Prefeitura Municipal, 2016b. Disponível em: https://planejamento.sorocaba.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/04/plano-de-reduco-de-emisses-de-gee-sorocaba.pdf. Acesso em: 7 out. 2025.

SOROCABA. Secretaria do Meio Ambiente. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Sorocaba – SP**. Sorocaba: Prefeitura Municipal, 2014. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/cpla/2017/05/sorocaba-vol.-1.pdf. Acesso em: 7 out. 2025.

SOUSA, V. B. S. **Avaliação de aspectos operacionais de aterros sanitários:** estudo de casos. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.bdtd.uerj.br:8443/bitstream/1/19371/2/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20-%20Vin%c3%adcius%20Braga%20da%20Silveira%20Sousa%20-%202022%20-%20Completo.pdf. Acesso em: 25 mai. 2026.

SZIGETHY, L.; ANTENOR, S. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil:** desafios tecnológicos, políticos e econômicos. IPEA, 2020. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos. Acesso em: 18 mai. 2026.

TORRES, T. R. **Senadores aprovam prorrogação do prazo para fechamento dos lixões**. Agência Senado, 1 jul. 2015. Disponível em: https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2015/07/01/senadores-aprovam-prorrogacao-do-prazo-para-fechamento-dos-lixoes. Acesso em: 23 abr. 2026.

TRANJAN, L. K. *et al*. **Mudanças climáticas e a diversificação das fontes de energia:** revisão de políticas públicas. Boletim de Conjuntura (BOCA), v. 20, n. 60, p. 286-320, 2024. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14715644. Disponível em: https://revistaboletimconjuntura.com.br/boca/article/view/6400. Acesso em: 23 mai. 2026.

UNEP. **Emissions Gap Report 2025: Off Target - Continued Collective inaction puts Global Temperature Goal at Risk - Appendices.** [Olhoff, A., chief editor; Lamb, W.; Kuramochi, T.; Rogelj, J.; den Elzen, M.; Christensen, J.; Fransen, T.; Pathak, M.; Tong, D. (eds)]. Nairobi, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48854. Acesso em: 22 jul. 2026.

UNFCCC. **What is the Triple Planetary Crisis?**. United Nations Climate Change, 2022. Disponível em: https://unfccc.int/news/what-is-the-triple-planetary-crisis. Acesso em: 14 jul. 2025.

WILMSEN, F.; GESING, F. **The Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC):** A New Passage Point on an Old Road?. ZenTra Working Papers In Transnational Studies, n. 68, 2016. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2874704. Acesso em: 26 mai. 2026.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **State of the Global Climate 2023**. Geneva: WMO, 2024. Disponível em: https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023. Acesso em: 14 jul. 2025.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **State of the Global Climate 2024**. Geneva: WMO, 2025. Disponível em: https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024. Acesso em: 14 jul. 2025.

WRI; C40; ICLEI. **Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GHG Protocol for Cities)**. Washington, DC, 2014. Disponível em: https://ghgprotocol.org/ghg-protocol-cities. Acesso em: 2 jul. 2025.

ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. V. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 2, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/MY53xbTzPxYhz783xdmKc8F/?format=html&lang=pt Acesso em: 6 mai. 2026.

ZANTA, V.M. ; FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos. In: BORGES, A.C., *et al*. (org.). **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**, 1 ed., v. 1, p. 1-18, 2003.

Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Viviana-Zanta/publication/266446543_Gerenciamento_Integrado_de_Residuos_Solidos_Urbanos. Acesso em: 15 mar. 2026.

ANEXO I - DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE SOROCABA PARA ATERRO SANITÁRIO EM 2023

Envio CGR Iperó | Sorocaba | 2023		
Mês	**disp. final RSU (t)**	**disp. final resíduos públicos de poda (t)**
Janeiro	19.995,96	2.243,77
fevereiro	18.160,93	2.240,53
março	19.271,00	2.798,00
abril	16.648,57	3.143,94
maio	17.894,71	2.592,00
junho	16.936,61	1.869,37
julho	17.370,75	1.545,32
agosto	18.099,71	2.219,00
setembro	17.589,75	1.608,83
outubro	19.857,23	95,45
novembro	19.317,68	2.000,24
dezembro	19.117,69	3.474,36
Total acumulado (t)	**220.260,59**	**25.830,81**

Fonte: SEMA (2024)

ANEXO II – RESÍDUOS DESTINADOS PELAS COOPERATIVAS DE SOROCABA EM 2023

MÊS	Coleta seletiva | CORESO | 2023									
	Papelão	Papel	Plástico	Sucata Ferro	Material Fino	Vidro	Óleo	EPS	Eletrônicos	Total (Kg)
JAN	33.441,0	44.272,0	15.894,0	10.280,0	3.570,0	29.348,0	0,0	6.131,0	2.074,2	**145.010,2**
FEV	42.670,0	31.099,0	17.758,0	7.620,0	2.726,0	24.675,9	1.670,0	470,0	1.096,7	**129.785,6**
MAR	52.933,0	30.750,0	26.108,8	12.160,0	5.394,0	12.380,0	0,0	0,0	1.174,4	**140.900,2**
ABR	35.924,0	25.790,0	17.046,0	6.540,0	3.420,0	22.540,0	930,0	0,0	0,0	**112.190,0**
MAI	36.692,0	9.963,5	19.156,0	7.910,0	5.080,0	18.070,0	1.130,0	350,0	1.773,8	**100.125,3**
JUN	30.946,0	12.701,0	17.293,0	6.900,0	2.642,0	18.800,0	0,0	1.356,0	1.336,0	**91.974,0**
JUL	42.706,0	16.937,0	15.011,0	7.810,0	2.930,5	26.210,0	850,0	300,0	304,6	**113.059,1**
AGO	43.050,0	19.246,0	15.784,0	6.490,0	2.063,0	15.820,0	1.480,0	350,0	2.261,0	**106.544,0**
SET	54.610,0	37.498,0	23.865,0	12.570,0	3.357,5	36.920,0	0,0	0,0	423,0	**169.243,5**
OUT	28.262,0	17.017,0	13.187,0	6.410,0	2.701,5	23.480,0	770,0	0,0	878,5	**92.706,0**
NOV	29.134,0	7.468,0	17.619,0	6.210,0	2.344,0	22.400,0	760,0	0,0	369,4	**86.304,4**
DEZ	33.897,0	22.880,5	17.330,0	9.520,0	1.830,0	16.370,9	970,0	0,0	3.200,0	**105.998,4**

Fonte: SEMA, 2024.

Mês	Coleta seletiva | COOPERESO | 2023										
	Papelão	Papel	Óleo	Plástico	Sucata Ferro	Latão	Cobre	Alumínio	Vidro	Isopor	Total (Kg)
JAN	12.650	22.055	150	23.125	7.855	64	25	50	18.900	0	**84.874**
FEV	13.450	35.505	1.090	50.056	15.430	129	190	289	28.790	900	**145.829**
MAR	18.400	42.320	1.200	64.046	12.640	157	147	325	31.470	1.100	**171.805**
ABR	25.690	65.608	1.450	93.988	14.325	289	250	670	42.698	1.540	**246.508**
MAI	18.700	58.115	900	78.890	18.230	680	169	580	33.450	950	**210.664**
JUN	17.500	51.255	850	58.550	15.789	458	240	320	25.698	740	**171.400**
JUL	18.650	54.000	430	33.226	13.240	215	190	435	18.650	200	**139.236**
AGO	13.600	40.089	780	24.602	9.445	125	59	220	22.150	0	**111.070**
SET	14.680	30.525	650	32.546	12.450	32	45	350	25.700	489	**117.467**
OUT	13.280	29.015	700	33.050	11.200	25	25	330	29.025	890	**117.540**
NOV	14.365	31.773	900	35.950	12.115	35	30	410	32.500	910	**128.988**
DEZ	18.150	33.565	1.200	40.145	18.990	72	65	522	40.670	1.425	**154.804**

Fonte: SEMA, 2024.

ANEXO III – FONTES DE EMISSÃO E NOTAÇÕES ADOTADAS NO 2º INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE DE SOROCABA

(continua)

Setor	Escopo GPC	Ref. GPC	Atividade	Subsetor	Notação (NE; NO; IE)	Justificativa
Resíduos	Escopo 1	III.1.1	Resíduos de poda gerados e depositados em aterro sanitário dentro do limite da cidade	Disposição RS	NO	Resíduos de poda são destinados a aterro sanitário em outro município. Compostagem é inexpressiva.
	Escopo 1	III.1.1	Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados e depositados em aterro sanitário dentro do limite da cidade	Disposição RS	NO	Não havia aterro sanitário em operação no município. Disposição inadequada de RS foi recolhida pela prefeitura e destinada a aterro fora do município. Queimas irregulares não foram consideradas por insuficiência de dados.
	Escopo 3	III.1.2	Resíduos de poda gerados dentro do limite da cidade e depositados em aterro sanitário fora do limite da cidade	Disposição RS	-	-
	Escopo 3	III.1.2	Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados dentro do limite da cidade e depositados em aterro sanitário fora do limite da cidade	Disposição RS	-	-
	Escopo 1	III.1.3	Resíduos sólidos gerados em outros municípios e depositados em Sorocaba	Disposição RS	NO	Não havia.
	Escopo 1 e 3	III.2.1; III.2.2; III.2.3	Tratamento biológico de resíduos	Tratamento biológico RS	NO	Não havia tratamento expressivo.
	Escopo 1	III.3.1	Incineração de resíduos de serviço de saúde (RSS) gerados e tratados dentro do limite da cidade	Incineração RS	NO	RSS encaminhados para incineração fora do município.

(conclusão)

Setor	Escopo GPC	Ref. GPC	Atividade	Subsetor	Notação (NE; NO; IE)	Justificativa
Resíduos	Escopo 3	III.3.2	Incineração de resíduos de serviço de saúde (RSS) gerados dentro do limite da cidade e tratados fora do limite da cidade	Incineração RS	-	-
	Escopo 1	III.3.3	Tratamento térmico de resíduos gerados em outros municípios	Incineração RS	NO	Haviam empresas que realizavam a atividade, mas não foram obtidos os dados.
	Escopo 1	III.4.1	Emissão de CH4 proveniente de efluentes do serviço público de saneamento (fossa séptica) dentro do limite da cidade	Efluentes	-	-
	Escopo 1	III.4.1	Emissão de CH4 proveniente de efluentes do serviço público de saneamento (lodo ativado) dentro do limite da cidade	Efluentes	-	-
	Escopo 1	III.4.1	Emissão de N2O proveniente da descarga de efluentes em corpos d'água dentro do limite da cidade	Efluentes	-	-
	Escopo 1 e 3	III.4.2; III.4.3	Emissões de efluentes tratados fora do limite da cidade; emissões de efluentes gerados fora e tratados dentro do limite da cidade	Efluentes	NO	Não havia.

Fonte: Sorocaba, 2020 (Adaptado).

ANEXO IV – CARACTERIZAÇÃO DOS LIMITES DO 2º INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE DE SOROCABA

Limites do Inventário	Informações
NOME DO MUNICÍPIO	Sorocaba
ESTADO	São Paulo (SP)
PAÍS	Brasil
ANO DO INVENTÁRIO	2013, 2014, 2015, 2016 e 2017
LIMITES GEOGRÁFICOS	Alumínio, Araçoiaba da Serra, Iperó, Itu, Mairinque, Porto Feliz, Salto de Pirapora, Votorantim.
ÁREA (KM²)	450 km² (IBGE, 2016)
POPULAÇÃO	2013: 629.231 habitantes; 2014: 637.187 habitantes; 2015: 644.919 habitantes; 2016: 652.481 habitantes; 2017: 659.871 habitantes; (Fonte: IBGE)
PIB PER CAPITA	R$ 48.271,34 (IBGE, 2017)
CLIMA	Subtropical
BIOMA	Mata Atlântica

Fonte: Sorocaba, 2020.

ANEXO V – FATORES DE EMISSÃO DE GEE PARA O CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS RECICLÁVEIS

(continua)

Material	Emissões (+) ou reduções (-) (MTCO2eq/tonelada de material coletado para reciclagem)				
	Produção com uso de matéria-prima reciclada ao invés de material virgem	Para disposição evitada, de acordo com o tipo de instalação			
		Aterro sem recuperação de gás	Aterro com recuperação de gás, mas sem recuperação de energia	Aterro com recuperação de gás e energia	Central de incineração
Recicláveis mistos	-2,8	-1,75	-0,47	-0,28	0,42
Latas de alumínio	-8,89	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05
Lingote de alumínio	-6,97	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05
Latas de aço	-1,8	-0,04	-0,04	-0,04	1,59
Fio de cobre	-4,89	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05
Vidro	-0,28	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05
PEAD	-0,86	-0,04	-0,04	-0,04	-1,27
PEBD	NA	-0,04	-0,04	-0,04	-1,28
PET	-1,11	-0,04	-0,04	-0,04	-1,24
PELBD	NA	-0,04	-0,04	-0,04	-1,27
PP	NA	-0,04	-0,04	-0,04	-1,27
PS	NA	-0,04	-0,04	-0,04	-1,64
PVC	NA	-0,04	-0,04	-0,04	-0,67
PLA	NA	-0,04	-0,04	-0,04	0,62
Embalagens de papelão ondulado	-3,11	-2,31	-0,61	-0,36	0,48
Revistas	-3,07	-0,96	-0,27	-0,17	0,35
Jornal	-2,78	-0,85	-0,24	-0,15	0,55
Papel de escritório	-2,85	-3,87	-1	-0,58	0,47
Listas telefônicas	-2,65	-0,85	-0,24	-0,15	0,55
Livros didáticos	-3,11	-3,87	-1	-0,58	0,47
Madeira serrada padronizada	-2,46	-1,21	-0,33	-0,21	0,58
MDF	-2,47	-1,21	-0,33	-0,21	0,58
Papel misto (geral)	-3,52	-2,16	-0,57	-0,34	0,49
Papel misto (principalmente residencial)	-3,52	-2,05	-0,54	-0,33	0,48
Papel misto (principalmente de escritórios)	-3,59	-2,1	-0,56	-0,33	0,44

(conclusão)

Material	Emissões (+) ou reduções (-) (MTCO2eq/tonelada de material coletado para reciclagem)				
	Produção com uso de matéria-prima reciclada ao invés de material virgem	Para disposição evitada, de acordo com o tipo de instalação			
		Aterro sem recuperação de gás	Aterro com recuperação de gás, mas sem recuperação de energia	Aterro com recuperação de gás e energia	Central de incineração
Metais mistos	-3,97	-0,04	-0,04	-0,04	1,06
Plásticos mistos	-0,98	-0,04	-0,04	-0,04	-1,25
Carpete/tapete	-2,37	-0,04	-0,04	-0,04	-1,1
Computadores pessoais	-2,35	-0,04	-0,04	-0,04	0,17
Concreto	-0,01	-0,04	-0,04	-0,04	N/A
Cinzas volantes	-0,87	-0,04	-0,04	-0,04	N/A
Pneus	-0,39	-0,04	-0,04	-0,04	-0,51
Concreto asfáltico	-0,08	-0,04	-0,04	-0,04	N/A
Telhas asfálticas	-0,09	-0,04	-0,04	-0,04	0,34
Drywall	0,03	-0,22	-0,08	-0,07	N/A
Isolamento de fibra de vidro	NA	-0,04	-0,04	-0,04	N/A
Piso vinílico	NA	-0,04	-0,04	-0,04	0,3
Piso de madeira	NA	-1,02	-0,29	-0,18	0,76

Fonte: ICLEI USA, 2013 (Traduzido pela autora).

ANEXO VI – FATORES DE EMISSÃO DE GEE PARA O CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS COMPOSTÁVEIS

Material	Emissões (+) ou reduções (-) (MTCO2eq/tonelada de material coletado para compostagem)				
	Crédito de substituição de produção de fertilizante	Para disposição evitada, de acordo com o tipo de instalação			
		Aterro sem recuperação de gás	Aterro com recuperação de gás, mas sem recuperação de energia	Aterro com recuperação de gás e energia	Central de incineração
Restos de comida	-0,03	-1,47	-0,37	-0,21	0,1
Poda	-0,03	-0,79	-0,2	-0,11	0,16
Grama	-0,03	-0,72	-0,18	-0,1	-
Folhas	-0,03	-0,56	-0,14	-0,08	-
Galhos	-0,03	-1,17	-0,29	-0,17	-

Fonte: ICLEI USA , 2013 (Traduzido pela autora).