

**Mitigação das mudanças climáticas pela melhoria no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos:
estudo de caso do município de São Bernardo do Campo/SP**

ERICA MARIE TACHIBANA

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" - UNESP

FLÁVIO DE MIRANDA RIBEIRO

UNISANTOS - UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SANTOS

MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS ATRAVÉS DA MELHORIA NO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE SÃO BERNARDO DO CAMPO/SP

Palavras-chave: gerenciamento, RSU, GEE

1 INTRODUÇÃO

O modo como se organizam as ações de gerenciamento dos resíduos sólidos, além da relação com impactos na saúde pública, na qualidade ambiental e no bem-estar da população, também trazem significativos efeitos às emissões de gases de efeito estufa (GEE), seja pelo consumo energético na movimentação dos resíduos ou pela destinação final (compostagem, recuperação energética, disposição em aterro) do resíduo. Consequentemente, essas emissões de GEE contribuem para às mudanças climáticas (SÃO PAULO, 1992; BRASIL-ALEMANHA, 2017). Neste contexto têm especial relevância os resíduos sólidos urbanos (RSU), parcela dos resíduos sólidos compostos tanto pelos resíduos domiciliares, ou seja, aqueles “originários de atividades domésticas em residências urbanas”, como pelos resíduos de limpeza urbana, aqueles “originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana” (BRASIL, 2010, p. 5, art. 13, inciso I a).

No Brasil, estima-se que a destinação dos RSU contribuiu com a emissão de 31,5 milhões de tCO₂eq. em 2015, o que representa aproximadamente 2,5% das emissões de GEE no país (BRASIL, 2017). Porém tem-se que este valor é subestimado, em função das baixas condições sanitárias no país. Como exemplo, se considerarmos os dados do Estado de São Paulo, que possui índices de saneamento básico mais elevados em relação aos índices brasileiros, a participação nas emissões de GEE pelo setor de resíduos representou 7,8% das emissões totais do Estado em 2008 (CETESB, 2013).

Por outro lado, esta deficiência no saneamento básico do país permite vislumbrar diversas oportunidades de melhoria, muitas delas com grande potencial de reduzir emissões de GEE em um espaço de tempo relativamente curto em relação aos demais setores da economia, sendo assim uma vertente importante no enfrentamento às mudanças climáticas (BRASIL-ALEMANHA, 2017; OREGON, 2012). Importante destacar que neste contexto é fundamental avaliar, não apenas a etapa de tratamento e/ou disposição final dos resíduos de forma segregada dos demais setores como ocorre geralmente nos inventários de emissões de GEE públicos (nacionais, estaduais, municipais), mas também sua cadeia de gerenciamento como um todo, contemplando a coleta, transbordo e transporte dos RSU. Para isso, torna-se fundamental reconhecer a importância do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), instrumento público de planejamento ambiental estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei Federal nº12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo geral discutir o potencial da melhoria no gerenciamento de RSU como estratégia de mitigação das mudanças climáticas, usando para isso o estudo de caso do município de São Bernardo do Campo, em São Paulo (SP). Para tanto, como objetivos específicos, o estudo se propõe a: verificar quais etapas do gerenciamento de resíduos do município de São Bernardo do Campo/SP apresentam maior contribuição nas emissões de GEE; estimar quais seriam as emissões de GEE caso São Bernardo do Campo adotasse as propostas de seu PMGIRS; e analisar a sensibilidade destes resultados às principais variáveis, especificamente a localização das alternativas de destinação final dos RSU, visando auxiliar os tomadores de decisão no planejamento e gestão municipal dos resíduos quanto à implementação do PMGIRS e sua relação com as mudanças climáticas.

2 METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido a partir do cálculo de emissões de GEE em dois cenários: atual e futuro, sendo este último o proposto pelo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) elaborado e publicado pela prefeitura do município de São Bernardo do Campo/SP (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2010 e 2015).

Para tanto, quatro etapas foram realizadas: definição das fronteiras para contabilização; levantamento de dados sobre o gerenciamento dos RSU no Município de São Bernardo do Campo; estimativa de emissões de GEE nos dois cenários definidos; e comparação e análise dos resultados. A seguir a metodologia utilizada para cada etapa é descrita sucintamente.

2.1 Fronteiras de Contabilização

O delineamento do escopo a ser avaliado começa na seleção do tipo de resíduo, sendo definido o RSU como objeto da análise. Ainda que no município sejam gerados e gerenciados outros tipos de resíduos sólidos, entende-se que para os fins desta pesquisa o foco deva ser o RSU, conforme contemplado pelo PMGIRS de São Bernardo do Campo/SP. Desta forma, sempre que utilizado o termo “resíduo” neste estudo refere-se aos RSU, a menos que mencionado o contrário.

Outro importante aspecto a ser definido são as fronteiras em termos das atividades consideradas. Para o estudo realizado, definiu-se como objeto do escopo da análise a cadeia de interesse completa do gerenciamento municipal dos resíduos, partindo da disponibilização dos resíduos pelo município até a sua destinação final, conforme descrito adiante. Desta forma, não são objeto desse estudo as emissões de GEE atreladas às etapas preliminares do ciclo de vida, referentes à cadeia do produto descartado como resíduo, bem como não se irá considerar qualquer etapa da utilização dos resíduos como insumo de novos processos produtivos, como por exemplo no caso da reciclagem.

2.2 Levantamento de dados

A coleta de dados para o desenvolvimento desse estudo foi realizada com base em dados secundários, principalmente oriundos do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) elaborado e publicado pela prefeitura do município de São Bernardo do Campo/SP, disponibilizado na página eletrônica da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA) do Estado de São Paulo. O município de São Bernardo do Campo/SP possui duas versões do PMGIRS, a primeira publicada em 2010 (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2010), e uma versão mais atual publicada em 2015 (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015). Para o estudo adotou-se prioritariamente a publicação mais recente, porém, informações que não estavam disponíveis nesta versão foram obtidas na primeira publicação.

Importante destacar que desde o princípio foi descartada a ideia de coleta de dados primários, não apenas por sua dificuldade operacional, mas por entender que na elaboração do PMGIRS o município já se utilizou das melhores informações disponíveis. Não obstante, entende-se os riscos e limitações desta escolha no estudo, sendo sugerido para novas pesquisas e para a aplicação da metodologia em outros contextos que este aperfeiçoamento seja considerado.

2.3 Estimativa de emissões de gases de efeito estufa

Dentre as diversas possibilidades metodológicas para contabilização das emissões de GEE, o presente estudo adotou as seguintes referências:

- GHG Protocol (200-?), que traz diretrizes sobre os relatórios de GEE, seus princípios e requisitos básicos para o desenvolvimento de estudos nesse tema;
- PAS 2050:2011 (BSI, 2011) que orienta estudos sobre o ciclo de vida direcionados para as emissões de GEE; e
- IPCC (2006) que apresenta a metodologia de cálculo para contabilização das emissões estimadas de GEE segregada por setores de emissão.

Com base nas atividades e fontes de emissão consideradas, foram incluídos nas estimativas os seguintes GEE de interesse: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O).

Para a conversão destes em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2e}) foram considerados os potenciais de aquecimento global (PAG) apresentados pelo IPCC (2007), conforme preconizado pela UNFCCC (2014).

Sobre o escopo de contabilização, de acordo com as fronteiras das etapas do gerenciamento delimitadas para este estudo, foi aplicada a metodologia de cálculo do IPCC (2006) para estimar as emissões relacionadas ao consumo energético de fontes móveis e fontes estacionárias, e ao tratamento de resíduos (operações do aterro, compostagem, biodigestão e coprocessamento).

Cabe a ressalva de que o foco desse estudo são as emissões de GEE do gerenciamento dos resíduos, não contemplando, portanto, outros impactos ambientais como as emissões de poluentes atmosféricos (como monóxido de carbono, material particulado, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, dioxinas, etc). Também não são âmbito desse estudo demais questões socioambientais de suma importância para o tema, como a inclusão social dos catadores, educação ambiental, a saúde pública, as áreas contaminadas, entre outros.

2.4 Comparação e análise dos resultados

A comparação das emissões de GEE entre os dois modelos de gerenciamento propostos foi definida com base na adoção de uma unidade específica em comum, no caso “uma tonelada de resíduo com destinação final ambientalmente adequada”.

Após realizada a comparação, os dados foram interpretados utilizando inclusive a análise de sensibilidade dos resultados, especificamente aplicada às alternativas locais da disposição final dos RSU propostas pelo PMGIRS do município, por entender que este tem potencial de ser um dos fatores decisivos para o perfil de emissões de GEE do sistema.

3 DESENVOLVIMENTO

A seguir o sistema de gerenciamento de RSU de São Bernardo do Campo/SP é apresentado, bem como o resultado da aplicação das metodologias de contabilização de GEE nos dois cenários propostos, visando à posterior análise e discussão.

3.1 Gerenciamento de RSU em São Bernardo do Campo: cenário atual e futuro

São Bernardo do Campo é um dos 39 municípios da Região Metropolitana de São Paulo. Fundado em 1553, o município conta com cerca de 830 mil habitantes em uma área de 408 km². Com um produto interno bruto *per capita* de R\$ 51 mil/ ano, possui diversas atividades econômicas em seu território. Historicamente conta com uma forte tradição industrial, tendo sido por décadas o principal polo da indústria automotiva nacional (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2020).

Em relação ao gerenciamento de resíduos, o atual serviço municipal de resíduos contempla as seguintes operações: coleta de resíduos sólidos urbanos, operação bota fora, centrais de triagem semi automatizadas, containerização, varrição de vias e logradouros públicos, instalação e manutenção de papeleiras, coleta seletiva porta a porta (PP), pontos de entrega voluntária (PEV), coleta de pontos viciados de resíduos de construção civil, operação feira limpa, entre outros (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).

Dentre os serviços apresentados, o serviço de interesse para este estudo refere-se a coleta de resíduos urbanos, que contempla os resíduos domiciliares, resíduos de feiras livre e varrição de vias, de estabelecimentos comerciais com geração até 50 kg/dia e resíduos de construção civil ou demolição e de limpeza de jardins, até 50kg (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015; CONSÓRCIO AMBIENTAL SBC, 2019).

De acordo com o PMGIRS de 2015, a coleta de resíduos no município é segmentada em coleta convencional, realizada porta a porta, e a coleta diferenciada, realizada pela disponibilização de containers em áreas de difícil acesso dos caminhões de coleta e o atendimento de feiras livre (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).

A coleta convencional dos resíduos é realizada com o auxílio de caminhões compactadores que passam coletando os resíduos disponibilizados pelos estabelecimentos residenciais e comerciais

nos trajetos e dias da semana preestabelecidos. Então seguem até a unidade de transbordo para descarregar o caminhão compactador e, posteriormente, os resíduos são carregados em caminhões basculantes para serem transportados para a destinação final (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).

Cabe mencionar que a PNRS (BRASIL, 2010) considera como destinação dos resíduos atividades como a reciclagem, compostagem, recuperação energética e a disposição final. Definindo, ainda, a disposição final como sendo a aplicação dos aterros sanitários apenas para os rejeitos (resíduos que não são passíveis de tratamento ou recuperação). Atualmente, a prática de direcionar para aterros sanitários apenas os rejeitos ainda não é amplamente adotada, sendo encaminhado resíduos para os aterros.

O fluxograma destas etapas do gerenciamento dos resíduos aplicado atualmente no município de São Bernardo do Campo/SP é representado na Figura 1 a seguir.



Fonte: Tachibana (2019)

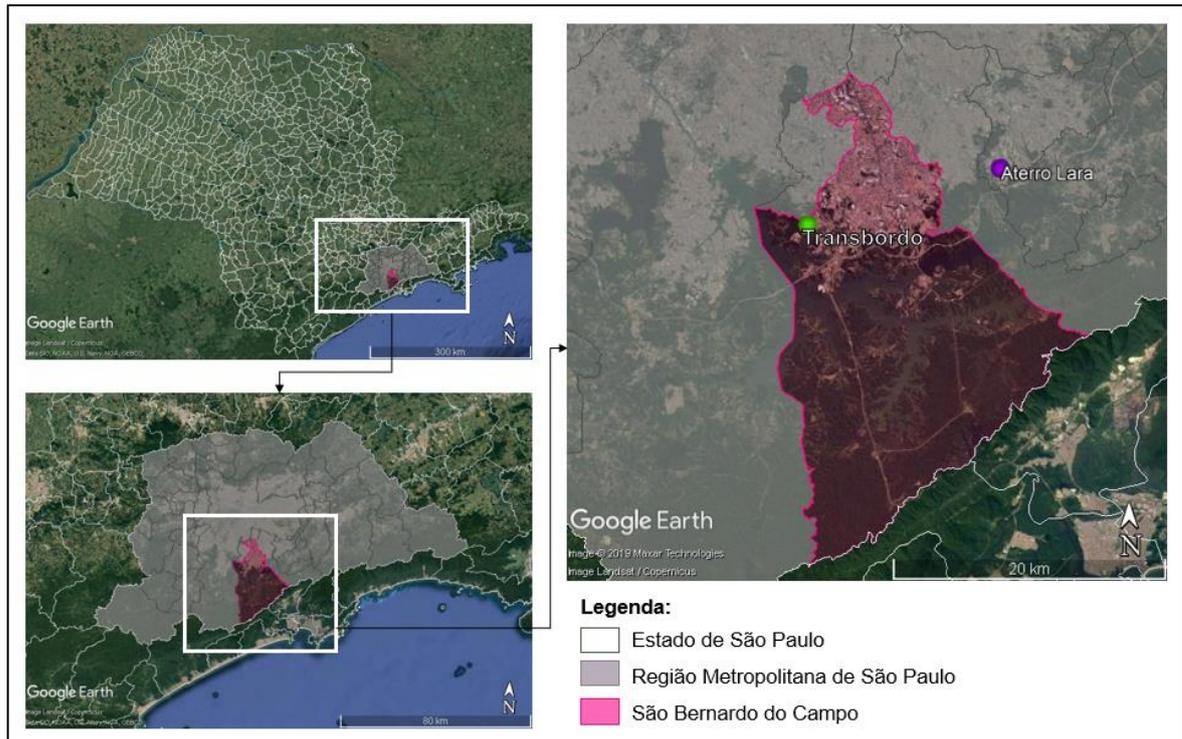
Figura 1 - Fluxograma das etapas do gerenciamento atual

Conforme apresentado pelo Consórcio Ambiental SBC (2019), a unidade de transbordo do município está localizada no bairro do Alvarenga. De acordo com o PMGIRS, os resíduos coletados pelo serviço municipal são encaminhados para o aterro Lara (Lara Central de Tratamento de Resíduos Ltda), localizado em Mauá (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015). A Figura 2 a seguir contextualiza geograficamente o município de São Bernardo do Campo em relação ao estado de São Paulo e a Região Metropolitana de São Paulo, bem como apresenta a localização da unidade de transbordo e de destinação final dos resíduos atuais.

Em seu PMGIRS (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015), o município tem como visão futura a implementação do Sistema de Processamento e Aproveitamento de Resíduos e Unidade de Recuperação Energética (SPAR-URE), integrando medidas para a recuperação, reciclagem e aproveitamento energético, de forma alinhada com os objetivos da PNRS. As instalações previstas para compor o SPAR-URE, de acordo com o PMGIRS, são: triagem e beneficiamento; compostagem; e coprocessamento (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).

A triagem e beneficiamento dos resíduos refere-se ao tratamento dado à parcela reciclável não separada na origem, ou seja, a parcela não captada pelos programas de coleta seletiva, mas que possuem valor para reciclagem. Este tratamento tem como objetivo recuperar essa parcela de resíduos recicláveis entregues à coleta convencional (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015). Por sua vez, a unidade de compostagem dos resíduos trata a parcela orgânica dos resíduos tendo como produto final composto orgânico para a utilização como adubo, conforme o PMGIRS. No “Termo de Referência – Especificações” (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2010) é prevista uma unidade de biodigestão instalada em série e antecedente à compostagem, para o aproveitamento energético do biogás gerado.

Já o coprocessamento é a unidade de tratamento prevista para os resíduos que forem desclassificados pelas outras duas unidades de tratamento da SPAR-URE, sendo prevista também para esta unidade de tratamento o aproveitamento energético (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).



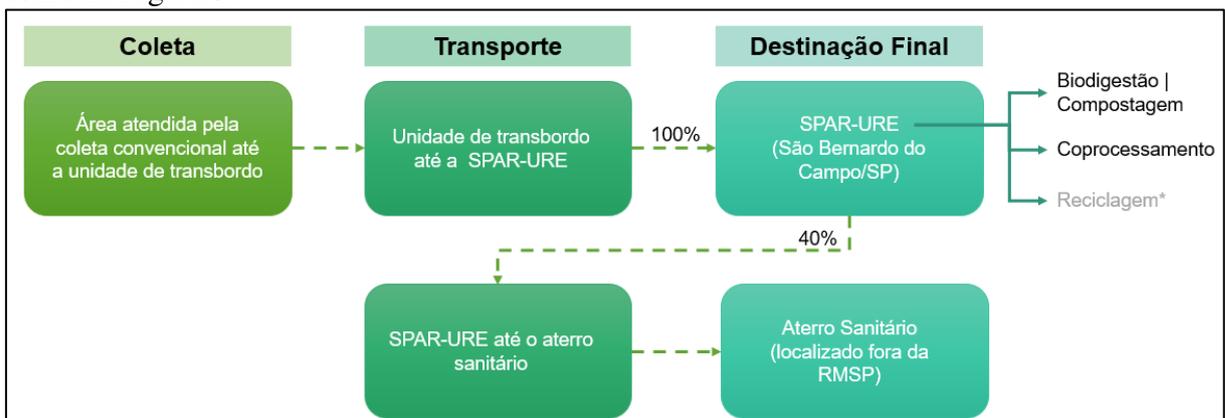
Fonte: Tachibana (2019)

Figura 2 - Localização dos pontos de interesse

De acordo com as notícias publicadas no site da Prefeitura de São Bernardo do Campo (2013), a SPAR-URE deveria ser instalada na área do antigo lixão de São Bernardo do Campo/SP, no bairro do Alvarenga, após a remediação da área. Porém, não foram identificados registros efetivos sobre a localização dessa unidade de tratamento de resíduos.

Para compor o cenário do gerenciamento futuro, é fundamental que se estimem os fluxos dos resíduos em cada caso. Para a etapa de triagem e separação, considerou-se uma taxa de segregação dos materiais recicláveis igual à meta de reciclagem proposta para a coleta seletiva, de 10% da massa total (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).

Assim, o fluxograma do modelo futuro de gerenciamento dos resíduos pode ser apresentado como na Figura 3.



* Reciclagem não faz parte do escopo de contabilização deste estudo
 Fonte: Tachibana (2019), com base em São Bernardo do Campo (2015)

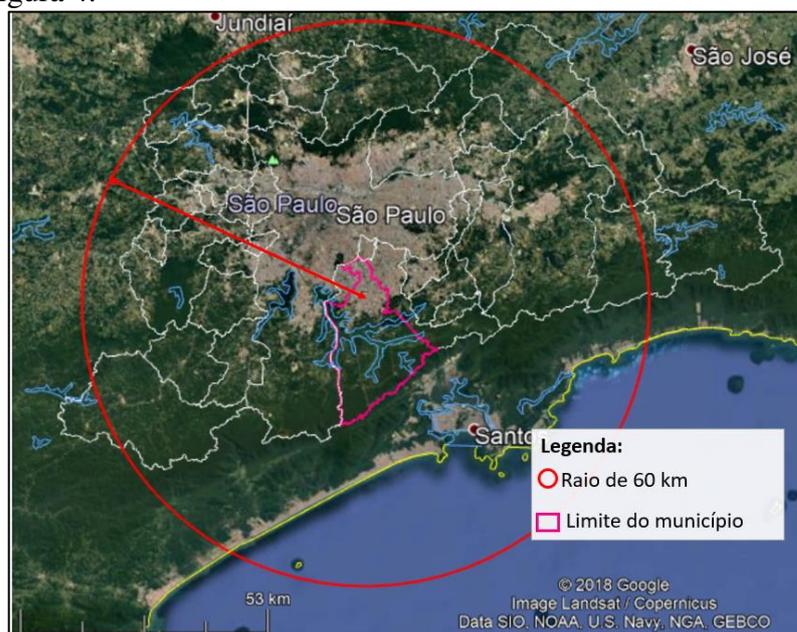
Figura 3 – Fluxograma das etapas do gerenciamento no cenário futuro

Cabe destacar que mesmo com a implantação da SPAR-URE o município ainda prevê a destinação de até 40% dos resíduos coletados para a aterros sanitários (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2010). Visando essa necessidade, o PMGIRS de São Bernardo do Campo/SP traz ainda um estudo de viabilidade locacional de novas unidades de disposição final dos resíduos,

considerando a área dos municípios pertencentes à RMSP (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).

De acordo com o estudo de viabilidade apresentado no PMGIRS, o potencial dos municípios da RMSP para receber um empreendimento dessa natureza é classificado como de muito baixo a nulo, tendo sido considerados aspectos como: densidade demográfica, restrições relativas aos sites aeroportuários, área disponível que viabilize uma vida útil de pelo menos 10 anos, áreas de proteção de mananciais e unidades de conservação, relevo, geologia e hidrografia (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015).

Portanto, entende-se que muito provavelmente a RMSP não terá capacidade de receber dentro de seu território o futuro aterro sanitário. Para o município de São Bernardo do Campo/SP isso implica que o aterro não estará localizado dentro de um raio de pelo menos 60 km, conforme ilustrado pela Figura 4.



Fonte: Tachibana (2019)

Figura 4 – Distância mínima para instalação de um futuro aterro sanitário

3.2 Emissões de GEE do gerenciamento de RSU em São Bernardo do Campo

A seguir são apresentadas as principais premissas, e respectivas estimativas, para realização do estudo.

3.2.1 Composição gravimétrica

Os dados mais recentes identificados sobre a gravimetria dos resíduos de São Bernardo do Campo/SP são os apresentados no PMGIRS (SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015), conforme apresenta a Tabela 1.

Essa composição gravimétrica refere-se aos resíduos domiciliares, entretanto, os resíduos coletados pela coleta convencional contemplam outros resíduos além dos domiciliares. Desta forma, assume-se que os demais resíduos coletados possuem a mesma composição gravimétrica. Assume-se, ainda, que para os dois modelos considerados (atual e futuro) a composição gravimétrica não sofre alteração.

Tabela 1 - Composição gravimétrica dos resíduos

Material	Composição Gravimétrica (%) *
Matéria orgânica	45,7%
Madeira	1,3%
Papel/papelão	20,4%
Plásticos	16,0%
Fraldas descartáveis	4,4%
Material têxtil	5,6%

Material	Composição Gravimétrica (%) *
Metais	3,0%
Vidros	2,0%
Construção civil	1,4%
Resíduos especiais**	0,2%

Fonte: São Bernardo do Campo (2010).

* Composição gravimétrica corrigida para o somatório totalizar 100%.

** resíduos especiais as lâmpadas fluorescentes, equipamentos eletroeletrônicos, óleo de cozinha usado e resíduos volumosos.

3.2.2 Caminhões compactadores

De acordo com São Bernardo do Campo (2010), os setores de coleta convencional possuem cerca de 24 km de logradouros para atendimento do serviço de coleta, os quais geram cerca de 18 toneladas de resíduos.

Para estimar a quilometragem percorrida por um caminhão compactador no setor de coleta foi considerado o modelo heurístico (IBAM, 2001) e assumido que os quarteirões são quadrados perfeitos. Dependendo da quantidade e disposição dos quarteirões, foi verificada uma variação entre 1,07 e 1,45, implicando na adoção de um fator multiplicador médio de 1,25 para a extensão do logradouro a ser atendido. Estima-se, portanto, que para o caminhão compactador atender 24 km de logradouros será necessário percorrer cerca de 30 km.

Adicionalmente, após a coleta dos resíduos, o caminhão compactador segue para a unidade de transbordo, com uma distância percorrida média de 7 km em cada perna do deslocamento tranbordo-setor-transbordo. Desta forma, totalizam-se 44 km percorridos e coleta de 18 toneladas de resíduos.

Com base na literatura, a autonomia varia entre 0,98 e 1,5 km/L (MARQUES, 2018; ITABORAÍ, 2018). Adota-se, de forma conservadora, o valor de 1,0 km/L para a autonomia dos caminhões compactadores, obtendo um consumo de 44 litros para a coleta dos resíduos em um setor.

3.2.3 Caminhões basculantes

Geralmente os caminhões basculantes são utilizados para o transporte dos resíduos da unidade de transbordo até a destinação final por terem uma maior capacidade. Nesse estudo considerou-se caminhões com capacidade para transportar 32 toneladas. A autonomia de caminhões desse porte foi obtida do Inventário de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo (CETESB, 2018), que apresenta uma autonomia de 3,4 km/L para veículos novos fabricados no ano de 2010.

Para o cenário atual, a quilometragem total percorrida (ida e volta) considerada foi de 58 km da unidade de transbordo até o aterro Lara, com base no trajeto do *google maps*.

Para o cenário futuro, como não há uma definição do local a ser instalado o futuro aterro sanitário e a instalação dentro de um raio de 60 km (dentro da RMSB) é pouco provável, aplica-se sobre essa distância mínima de 60 km em linha reta o fator de 1,4 (relação observada entre a soma dos catetos e a hipotenusa pelo teorema de Pitágoras) para estimar uma das pernas do transporte. Para o percurso total, ida e volta, obtêm-se uma quilometragem de 168 km.

3.2.4 Operação das unidades

Além das emissões da decomposição dos resíduos no aterro, foram consideradas as emissões relacionadas as atividades que suportam a operação do aterro, como o consumo de eletricidade e diesel nos maquinários.

A eletricidade mostrou-se pouco representativa, devido ao baixo consumo e baixo fator de emissão da rede brasileira. Já para o consumo de diesel, como não foram identificadas informações específicas para o aterro Lara, adotou-se as informações disponíveis para o aterro São João, antigo aterro do município de São Paulo. De acordo com as informações apresentadas por Silva (2011), obteve-se uma taxa de 0,33 litros de diesel consumido na operação do aterro.

3.2.5 Fluxo de destinação

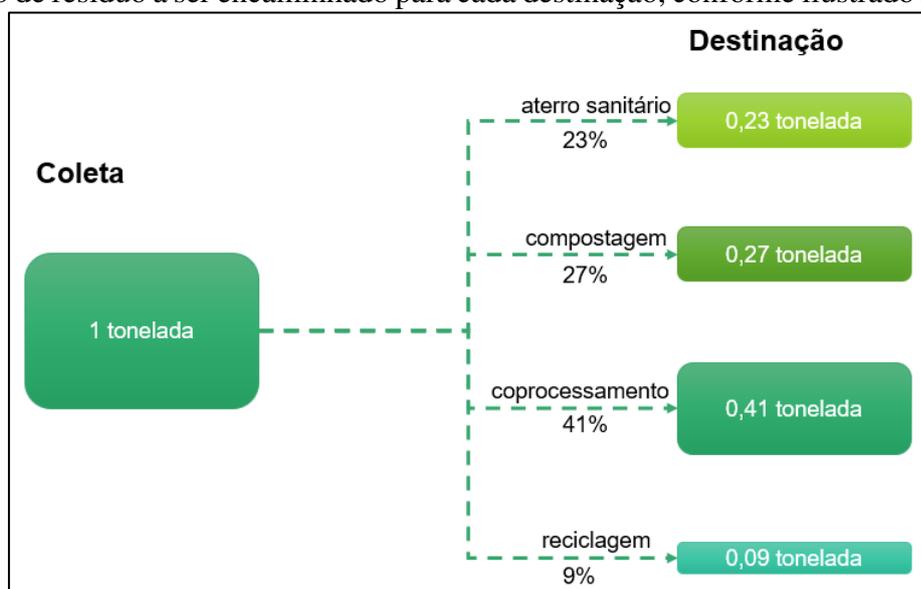
Para o modelo atual considera-se que todo o resíduo coletado por meio da coleta convencional tem como destinação final o aterro sanitário Lara, conforme ilustrado na Figura 5.



Fonte: Tachibana (2019)

Figura 5 – diagrama do atual fluxo de destinação de resíduo

O modelo futuro prevê que o resíduo coletado por meio da coleta convencional tem como possibilidade as seguintes destinações: aterro sanitário, compostagem, coprocessamento e reciclagem. Com base nessas destinações e na composição gravimétrica dos resíduos, adota-se a proporção de resíduo a ser encaminhado para cada destinação, conforme ilustrado na Figura 6.



Fonte: Tachibana (2019)

Figura 6 – diagrama do futuro fluxo de destinação de resíduo

3.2.6 Captura de biogás no aterro

Para o modelo atual, devido a indisponibilidade de informações sobre a prática de captura e/ou aproveitamento energético do biogás gerado no aterro Lara, optou-se, de forma conservadora, por não considerar qualquer abatimento nas emissões do aterro, de forma alinhada ao recomendado pelo IPCC (2006).

Já no modelo futuro, assume-se uma captura mínima de biogás por meio de drenos individuais com queima manual, considerando-se um abatimento de 20% nas emissões de GEE, conforme ICLEI (2009).

3.2.7 Biodigestão em série com compostagem

Para o modelo futuro de gerenciamento de resíduo é considerada a aplicação conjunta das técnicas de tratamento por biodigestão seguida da compostagem. De acordo com Kraemer e Gamble (2014), no processo de biodigestão há uma redução de cerca de 2/3 da matéria orgânica. Portanto, no processo de compostagem foi adotada uma carga orgânica de entrada estimada em 1/3 do valor de entrada da biodigestão.

3.2.8 Coprocessamento

Para a etapa de coprocessamento foram consideradas as emissões de GEE pela incineração dos resíduos. Os incineradores costumam ter queimadores auxiliares para as etapas de ligamento e desligamento, bem como em situações para manter a temperatura no nível desejado para a incineração dos resíduos. De acordo com IPCC (2006), o consumo de combustível nesses

queimadores auxiliares corresponde a 3% do valor energético dos resíduos. Desta forma, com base no Poder Calorífico Inferior (PCI) apresentado pelo IPCC (2006) para o resíduo sólido urbano (11,6 TJ/Gg) e do gás natural (48 TJ/Gg), assumiu-se um consumo de 7,25 kg de gás natural por tonelada de resíduo incinerado.

3.2.9 Fatores de emissão

Os fatores de emissão aplicados no desenvolvimento deste estudo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de Emissão

Insumo	Unid.	%Bio	FE CO ₂ (kgCO ₂ /unid)	FE CO ₂ Bio (kgCO ₂ Bio/ unid.)	FE CH ₄ (kgCH ₄ / unid.)	FE N ₂ O (kgN ₂ O / unid.)	Referências
Diesel B BR	l	11%	2,34	0,28	0,0001	0,00014	IPCC, 2006 ¹ / EPE, 2018
Eletricidade_BR	MWh		73,98	-	-	-	Brasil, 2019
RSU_aterro	t		-	-	53,97	-	IPCC, 2006 ²
RSU_biodigestão compostagem	t				2,13	0,08	IPCC, 2006 ³
RSU_coprocessa- mento	t		2,69		0,00005	0,000005	IPCC, 2006 ⁴

Notas: ¹ V.2; p.3.16,3.21; ² V.5; p.2,14; Table 2.4 e p.3.9; ³ V.5; p.2,16; 5.22; ⁴ V.5; p.4.6; Table 4.1

Fonte: Tachibana (2019)

4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

4.1 Emissões de GEE no gerenciamento de RSU em São Bernardo do Campo

A partir das premissas adotadas anteriormente, e aplicando as metodologias de cálculo mencionadas, as emissões de GEE para ambos os cenários foram estimadas, de forma a se ter um valor equivalente ao gerenciamento de uma tonelada de RSU destinado para tratamento ou disposição final, permitindo a comparação entre os modelos propostos de gerenciamento dos resíduos.

4.1.1 Emissões estimadas para o cenário atual

A Tabela 3 apresenta as emissões de GEE estimadas para o cenário atual do gerenciamento dos resíduos no município de São Bernardo do Campo/SP a partir da metodologia aplicada. Verifica-se que a maior contribuição para as emissões está atrelada à decomposição dos resíduos que ocorre no aterro, que representa 99,4% das emissões.

Tabela 3 – Emissões de GEE estimadas para o cenário atual

Etapa	Fonte	Descrição	Emissão de GEE (kgCO ₂ e / t de resíduo destinado)	(%)
Coleta	Caminhão Compactador	Coleta até o transbordo	5,92	0,4%
Transporte	Caminhão Basculante	Transbordo até o aterro	1,29	0,1%
Destinação	Trator	Operação do aterro	0,80	0,1%
Destinação	Aterro	Decomposição	1.348,05	99,4%
Total			1.356,06	100,0%

4.1.2 Emissões estimadas para o cenário futuro

Na Tabela 4 são apresentadas as emissões de GEE estimadas para a destinação de uma tonelada de resíduo no cenário futuro, ou seja, considerando a composição das diferentes opções de destinação dada aos resíduos nas seguintes proporções: 23% aterro, 27% biodigestão/compostagem e 41% coprocessamento. Cabe ressaltar que a diferença para

completar uma tonelada refere-se a parcela encaminhada para reciclagem, a qual não é escopo desse estudo. Note que as principais contribuições continuam sendo em relação à destinação final, seja na parcela enviada a aterro, seja na parcela incinerada.

Tabela 4 – Emissões de GEE estimadas – cenário futuro

Etapa	Fonte	Descrição	Emissão de GEE (kgCO ₂ e / t de resíduo destinado)	(%)
Coleta	Caminhão Compactador	Coleta até transbordo	5,92	1,1%
Transporte	Caminhão Basculante	Transbordo até SPAR-URE	0,31	0,1%
Transporte	Caminhão Basculante	SPAR-URE até aterro	3,74	0,7%
Destinação	Trator	Operação do aterro	0,18	0,1%
Destinação	Aterro	Decomposição	231,09	43,6%
Destinação	Biodigestão Compostagem	Decomposição	20,84	3,9%
Destinação	Coprocessamento	Tratamento térmico	259,52	49,0%
Destinação	Coprocessamento	Combustão auxiliar	8,01	1,5%
Total			529,62	100,0%

4.2 Análise comparada dos dois cenários

De acordo com o apresentado na Tabela 3 e na Tabela 4, verifica-se que as emissões do tratamento propriamente dito são as que mais influenciam para o indicador da intensidade de emissões dos cenários avaliados.

Desta forma, as emissões resultantes do tratamento dos resíduos são, então, apresentadas na Tabela 5 para permitir a comparação dessas intensidades em relação ao modelo de gerenciamento adotado.

Tabela 5 – Comparativo das emissões de GEE das diferentes destinações dada aos resíduos nos cenários atual e futuro

Destinação final	Atual		Futuro	
	Proporção mássica destinada (%) *	Emissão de GEE (kgCO ₂ e)	Proporção mássica destinada (%) *	Emissão de GEE (kgCO ₂ e)
Aterro Sanitário	100%	1.348,05	23%	231,09
Biodigestão Compostagem	-	-	27%	20,84
Coprocessamento	-	-	41%	259,52
Reciclagem	-	-	9%	-
Total	100%	1.348,05	100%	511,45

* Proporção mássica considerada com base em uma tonelada de resíduo para destinação final

Em relação ao total das emissões estimadas para uma tonelada de resíduo destinado adequadamente, observa-se uma redução de cerca de 62% nas emissões de GEE comparando-se o modelo futuro em relação ao modelo de gerenciamento de resíduos atualmente empregado pelo município de São Bernardo do Campo/SP, passando dos atuais 1.348 kgCO₂e para 511,45 kg CO₂e no cenário futuro.

Observa-se que no modelo futuro de gerenciamento o coprocessamento dos resíduos apresentou uma contribuição nas emissões de GEE na mesma ordem de grandeza do resíduo enviado para aterro sanitário, mas com uma massa tratada praticamente duas vezes maior que do aterro. Porém, cabe destacar que essa análise tem como viés os GEE, não sendo mérito dessa discussão

as emissões dos poluentes atmosféricos tradicionais que podem ser significativas para o coprocessamento, que tem sido o principal objeto de críticas de cunho ambiental para este tipo de solução.

4.3 Impacto Locacional das Unidades de Tratamento

Devido à incerteza de localização para as futuras unidades de destinação dos resíduos sólidos, seja o SPAR-URE ou do aterro sanitário, foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto locacional das unidades de destinação final dos resíduos para o modelo futuro de gerenciamento.

Para isto, variou-se a distância no trajeto da unidade de transbordo para a unidade de tratamento dos resíduos e manteve-se os demais parâmetros da condição inicial. As distâncias consideradas foram 14 km (inicial), 168 km (opção 1) e 336 km (opção2), os quais correspondem a uma variação de 1100% e 2300% em relação à primeira distância proposta inicialmente.

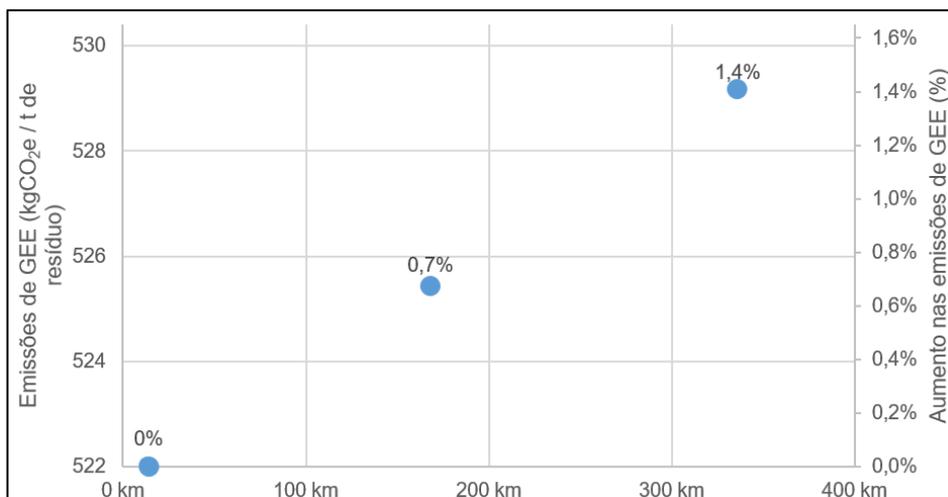
Os 14 km iniciais referem-se a distância no caso de implantação no município de São Bernardo do Campo/SP. A opção 1 simula a hipótese de implantação fora da região metropolitana de São Paulo. A opção 2 equivale ao dobro da distância fora da região metropolitana. Os raios de abrangência das alternativas locais (opção 1 e 2) propostas estão ilustrados na Figura 7.



Fonte: Tachibana (2019)

Figura 7 – Alternativas locais das unidades de tratamento dos resíduos

Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 8, onde verifica-se que a sensibilidade das emissões de GEE no gerenciamento dos resíduos em relação à distância percorrida é pouco expressiva, pois em uma variação de 1.100% da distância observou-se uma variação de apenas 0,7% nas emissões de GEE do gerenciamento dos resíduos.



Fonte: Tachibana (2019)

Figura 8 – Impacto nas emissões de GEE em relação a variação das distâncias das unidades de tratamento

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O presente estudo traz uma contribuição relevante à temática acerca das possibilidades para mitigar as mudanças climáticas, especificamente exemplificando, por meio de um estudo de caso, o potencial de melhorias no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) contribuírem à redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Para tanto, aplicou-se reconhecidas metodologias de cálculo de emissões de GEE a dois cenários (atual e futuro), advindos do próprio planejamento proposto pelo município para a gestão de seus RSU. Como resultado, o estudo demonstrou que no caso em questão o modelo futuro proposto pelo município, que apresenta uma gestão de resíduos mais eficiente, apresenta ganhos de redução nas emissões de GEE de aproximadamente 62% em relação à atual forma de gerenciamento dos RSU.

Segundo os dados apresentados, esta melhoria se deve principalmente a um melhor aproveitamento dos resíduos por meio da adoção de um conjunto de soluções para tratamento dos resíduos, como a reciclagem dos materiais não separados na origem e tratamento dos resíduos por biodigestão/compostagem e coprocessamento.

De fato, segundo as estimativas realizadas, a destinação dos resíduos sólidos é o principal fator que contribui para as emissões de GEE do gerenciamento municipal dos resíduos nos dois cenários (atual e futuro). Portanto, não obstante se tenha incluído nos cálculos todo um conjunto de atividades relacionadas ao gerenciamento dos resíduos para além da destinação (tratamento e disposição final), pode-se afirmar que é no desenho destas atividades que residem os principais pontos de atuação para enfrentamento das mudanças climáticas no gerenciamento de resíduos. Além do resultado da pesquisa em si, esta conclusão corrobora à escolha metodológica da maioria das atuais pesquisas da área que restringem suas análises a este escopo.

Cabe ressaltar que a redução nas emissões de GEE pela geração de insumos para uma nova cadeia produtiva, como é o caso do material reciclável e do composto orgânico produzido na usina de compostagem; e energética, pela substituição de combustível no coprocessamento, não estão contabilizados nesse estudo. Assim, os ganhos ambientais em relação as emissões de GEE observados nesse estudo deverão ser ainda mais significativas quando incorporadas essas questões.

Quanto à análise de sensibilidade realizada a partir das alternativas locais da unidade de destinação final dos RSU, demonstrou-se que a distância percorrida para a destinação dos resíduos apresenta uma baixa contribuição em relação às emissões de GEE, não sendo significativa para de tomada de decisão no gerenciamento dos resíduos visando subsidiar o combate às mudanças climáticas. Este resultado permite que se discutam outras possibilidades

logísticas no planejamento do gerenciamento dos resíduos, tais como as soluções consorciadas de destinação final, com maior segurança de que estas não afetarão de modo significativo as emissões de GEE dos sistemas.

Conclui-se, portanto, que esforços para reduzir as emissões de GEE do gerenciamento dos resíduos sólidos, em um primeiro momento, devem ser concentrados na etapa de destinação dos resíduos, de forma que proporcionarão resultados de maior efetividade no combate às mudanças climáticas. Estas conclusões permitem corroborar a percepção geral que outras agendas na área ambiental argumentam: o gerenciamento dos resíduos sólidos deve priorizar soluções para um melhor aproveitamento dos resíduos, tais como a compostagem, a reciclagem ou mesmo o coprocessamento, em detrimento da direta disposição final de resíduos em aterros sanitários.

6 REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 10 maio 2018.

BRASIL. Ministério de Ciências, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI). Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. 4ª ed. Brasília, 2017.

BRASIL. Ministério de Ciências, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI). Fatores de emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 04 outubro 2019.

BRASIL-ALEMANHA. Cooperação para a Proteção do Clima na Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos: ProteGEEr. RSU e Clima. 2017. Disponível em: <<http://protegeer.gov.br/rsu/rsu-e-clima>>. Acesso em: 10 junho 2020.

British Standards Institution (BSI). PAS 2050:2011 – Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Emissões do setor de resíduos sólidos e efluentes líquidos, 1990 a 2008: relatório de referência. São Paulo: 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Emissões veiculares no estado de São Paulo 2017. São Paulo, 2018.

CONSÓRCIO AMBIENTAL SBC. Sistema de atendimento ao cliente da limpeza urbana de São Bernardo do Campo. Disponível em: <<https://www.sbclimpeza.com.br/>>. Acesso em: 10 abril 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018.

GHG PROTOCOL. Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa. [200-?].

GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (ICLEI-Brasil). Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. São Paulo, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (Ibam). Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japan, 2006. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em: 05 maio 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, Estados Unidos, 2007.

ITABORAÍ. Planilha de Custo Orçamentário/ Resumo – Contrato: execução de serviços de coleta de resíduos sólidos – Data base = mai/18. 2018. Disponível em: <<https://www.itaborai.rj.gov.br/wp-content/uploads/2018/10/Publica%0c3%a7%0c3%a3o-Site-PMI-em-28.11.2018-ANEXO-IX-PLANILHAS-DE-CUSTOS.pdf>>. Acesso em: 10 julho 2020.

KRAMER, T.; GAMBLE, S. Integrating Anaerobic Digestion With Composting. *BioCycle*, [s.l.], v.55, n.10, p.55, nov. 2014. Disponível em: <<https://www.biocycle.net/2014/11/18/integrating-anaerobic-digestion-with-composting/>>. Acesso em: 19 outubro 2019.

MARQUES, M.C. Proposta de Modelo de Consumo de Combustível nos Sistemas de Coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso no Distrito Federal. Monografia (bacharel em engenharia ambiental) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2018. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/21823/1/2018_MuriloDeCarvalhoMarques_tcc.pdf>. Acesso em: 05 julho 2020.

OREGON. Department of Energy. The Center for Climate Strategies. 10-year energy action plan modeling: greenhouse gas marginal abatement cost curve development and macroeconomic foundational modeling for Oregon. 2012.

PREFEITURA DE SÃO BERNARDO DO CAMPO. Prefeito apresenta sistema de gestão de lixo de São Bernardo do Campo para São Caetano. 2013. Disponível em: <http://www.saobernardo.sp.gov.br/busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=http%3A%2F%2Fwww.saobernardo.sp.gov.br%2Fweb%2Fsbc%2Fbusca%3Fp_auth%3DimdruACs%26p_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D1%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_state_rcv%3D1&_101_assetEntryId=136133&_101_type=content&_101_urlTitle=prefeito-apresenta-sistema-de-gestao-de-lixo-de-sao-bernardo-para-sao-caetano&inheritRedirect=true>. Acesso em: 08 outubro 2019.

SÃO BERNARDO DO CAMPO. A cidade em números. 2019. Disponível em: <https://www.saobernardo.sp.gov.br/documents/10181/888250/TAB_SBC_EM_NUMEROS_SOPE13_2019_FEV.pdf/8384d440-e198-2c4f-b8da-eec46ff98e88>. Acesso em: 13 julho 2020.

SÃO BERNARDO DO CAMPO. Coordenadoria de Licitações e Materiais. Termo de Referência – Especificações. São Bernardo do Campo, [ca. 2010]. Disponível em: <<https://www.saobernardo.sp.gov.br/web/sbc/residuos-solidos>>. Acesso em: 04 outubro 2019.

SÃO BERNARDO DO CAMPO. Prefeitura Municipal. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Bernardo do Campo. São Bernardo do Campo, 2015. Disponível em: <http://www.saobernardo.sp.gov.br/documents/10181/19965/Plano+de+Gest%0c3%a3o+Integrada+de+Res%0c3%ADduos+de+S%0c3%a3o+Bernardo+do+Campo_p_Revis%0c3%a3o+2015.pdf/a951bb84-b5fc-4d62-b65a-aaf3ab99bbb7>. Acesso em: 09 abril 2019.

SÃO BERNARDO DO CAMPO. Prefeitura Municipal. Plano Municipal de Resíduos Sólidos de São Bernardo do Campo. São Bernardo do Campo, 2010. Disponível em: <<https://smastr16.blob.core.windows.net/cpla/2017/05/sao-bernardo-do-campo.pdf>>. Acesso em: 09 abril 2019.

SÃO PAULO (Estado). Lei Estadual nº 7.750, de 31 de março de 1992. Dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1992/lei-7750-31.03.1992.html>>. Acesso em: 14 julho 2020.

SILVA, G.F. Aterro Sanitário São João: Estudos dos indicadores ambientais em emergência. Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia de produção da Universidade Paulista, UNIP, para obtenção do título de mestre em engenharia de produção. São Paulo, 2011.

TACHIBANA, E.M. Gerenciamento dos Resíduos Sólidos e Mudanças Climáticas: Estudo de Caso do Município de São Bernardo do Campo/SP. Monografia (especialista em conformidade

ambiental), Escola Superior da CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo, 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). *Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013*. 2014. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf>>. Acesso em: 01 dezembro 2019.