



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

CALVIN STEFAN IOST

**CENÁRIOS AMBIENTAIS DE GERENCIAMENTO E TRATAMENTO
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO ESTADO DE SÃO PAULO.**

SOROCABA / SP

2010

CALVIN STEFAN IOST

**CENÁRIOS AMBIENTAIS DE GERENCIAMENTO E TRATAMENTO
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO ESTADO DE SÃO PAULO.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como parte dos pré-requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental, à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador:
Prof. Dr. Sandro Mancini

Co-orientador:
Eng. MSc. João Wagner Silva Alves

SOROCABA / SP

2010

CALVIN STEFAN IOST

**CENÁRIOS AMBIENTAIS DE GERENCIAMENTO E TRATAMENTO
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO ESTADO DE SÃO PAULO.**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado como parte
dos pré-requisitos para a obtenção
do título de Engenheiro Ambiental, à
Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho".

Sorocaba, 02 de dezembro de 2010

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

Banca Examinadora

Banca Examinadora

SOROCABA / SP

2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu força todo o tempo.

À minha mãe Tania que esteve comigo em todos os momentos, fáceis e difíceis sempre me encorajando e auxiliando.

À minha avó Zilda que sempre foi como uma segunda mãe para mim.

Ao meu pai Itamar que mesmo sabendo que eu não poderia estar sempre presente me ajudou na minha formação.

Ao meu avô Oziel que é um exemplo para mim.

A todos os outros familiares que sempre me apoiaram e orientaram.

À Talita que foi uma pessoa muito especial, que sempre quis meu bem e me apoiou, um agradecimento especial.

Ao professor Sandro que me orientou no projeto, sempre com boas idéias.

Ao João Wagner que foi não apenas um orientador, mas também um grande amigo, sendo sempre um exemplo de pessoa e de profissional.

A todos os amigos do TDSC/CETESB, que tornaram meus dias de trabalho mais proveitosos e divertidos.

Agradeço de uma forma especial ao Sr. Benivaldo, ao Demilson, a Grazi e a Adra que me apoiaram por todo o período de minha formação, sendo que sem eles não teria condições de terminar o curso.

Aos amigos Lucas, Jonatas, Hugo, Henrique, Rodrigo, Sarah, Nayara, Thayse, Juciane e Camila que ficarão eternamente na memória, sempre me fazendo querer voltar aos velhos tempos.

Aos amigos da Casa Rosa, que foram como uma "família".

Às famílias Manetta e Rubio que foram muito especiais por todo o período da minha graduação.

A todos os outros que mesmo sem saber auxiliaram na minha formação, serão sempre lembrados.

A todos vocês: OBRIGADO.

RESUMO

Empresas e governos são cada vez mais preocupados com as novas variáveis ambientais, como o aquecimento global e a necessidade de obtenção de novas fontes de energia. Neste contexto, este estudo vem da necessidade de comparar a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em termos ambientais, estabelecendo cenários e comparando os impactos ambientais das formas de gestão dos RSU (aterro sanitário, incineração, compostagem e biodigestão) e auxiliando a determinação de qual é o mais ambientalmente viável no estado de São Paulo até o ano de 2030. Os impactos analisados foram: o potencial de gerar gases de efeito estufa (GEE), energia, poluentes atmosféricos, efluentes líquidos e ocupação de área, para os cálculos utilizaram-se métodos amplamente empregados para dimensionamento de RSU aplicados aos propósitos deste trabalho. Como resultado verificou-se que a mudança da alternativa mais comum que é aterro sanitário para incineração provoca um aumento de GEE e poluentes no curto prazo e um acréscimo no potencial de geração de energia e diminuição na ocupação de área e geração de efluentes líquidos pelo RSU. A transição para a alternativa de compostagem reduz o potencial para a geração de GEE, energia e geração de poluentes, aumenta a ocupação de área e geração de efluentes. A biodigestão aumenta o potencial de geração de GEE e área e reduz o potencial de geração energética, poluentes atmosféricos e efluentes.

Palavras-chave: Cenário, Resíduo Sólido Urbano, Modelagem Ambiental, Gerenciamento de Resíduos.

ABSTRACT

Companies and governments are increasingly worried about the new environmental variables such as global warming and the need to obtain new energy sources. In this context, evidence of the need to compare the management of municipal solid waste (MSW) in environmental terms, providing scenarios and comparing the environmental impacts of forms of management of MSW (landfill, incineration, composting and digestion) and helping to determine what is the most environmentally viable in the state of Sao Paulo by the year 2030. The impacts were analyzed: the potential to generate greenhouse gas (GHG), energy, air pollutants, wastewater and occupation of the area, for the calculations were used widely used methods for design of MSW applied to the purposes of this study. As a result it was found that the change of the most common alternative is to landfill for incineration causes an increase of GHG and pollutants in the short term and a potential increase in power generation and reduction in area occupation and generation of wastewater by MSW. The transition to alternative composting reduces the potential for generating GHG, energy and pollutants generation, increases the occupation of the area and effluent generation. The digestion increases the potential for generating GHG and area and reduces the potential for power generation, air pollutants and effluents.

Key-words: Scenario, Municipal Solid Waste, Environmental Modeling, Waste Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Porcentual do resíduo coletado enviado para cada tipo de disposição no Estado de São Paulo.....	4
Figura 2 - Porcentagem da quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou públicos, coletados e/ou recebidos, em todo o território nacional	5
Figura 3 - Estratégia geral para elaboração de um cenário.	23
Figura 4 - PCI em função do conteúdo de metano no biogás	28
Figura 5 - Tela do software criado para programação dos cenários	38
Figura 6 - Porcentual entre a emissão residual e a emissão do primeiro ano de aterramento.....	41
Figura 7 - Função de estimativa de geração de resíduos em 1990 para o Estado de São Paulo.....	44
Figura 8 - MCF médio no Estado de São Paulo	50
Figura 9 - Dados da evolução da composição dos RSU do Estado de São Paulo, conforme as proporções de (A) papel e têxtil, (B) jardim e putrescíveis, (C) alimentares e (D) madeira e palha.	51
Figura 10 - Porcentagem de metano recuperado em aterros no Estado de São Paulo	52
Figura 11 - Representação gráfica da variação da fração fóssil (CCW.FCF) no RSU do Estado de São Paulo.....	54
Figura 12 - Dados de precipitação média anual do Brasil	58
Figura 13 - Funções que linearizam o fator K de percolado.....	59
Figura 14 - Relação entre a capacidade instalada e a área ocupada de incineradores	60
Figura 15 - Regressão linear correspondente a relação entre volume e área de biodigestores.....	62
Figura 16 - Massa de RSU gerada no Estado de São Paulo de 1990 a 2030	63
Figura 17 - Comportamento temporal da emissão de GEE para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)	64
Figura 18 - Potencial de emissão de GEE para todo o período	66
Figura 19 - Comportamento temporal do potencial de geração energética para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).....	68
Figura 20 - Comportamento temporal do potencial de geração energética para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.) ...	68
Figura 21 - Potencial de geração de energia para todo o período para cada cenário	70
Figura 22 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário “Aterro”	72
Figura 23 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário “Aterro (Rec.)”	72
Figura 24 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário “Incineração”	73

Figura 25 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário “Compostagem” e “Biodigestão”	74
Figura 26 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário “Biodigestão (Rec.)”	74
Figura 27 - Potencial de geração de poluentes atmosféricos para todo o período para cada cenário considerando a soma de todos os poluentes atmosféricos observados	75
Figura 28 - Comportamento temporal da emissão de efluentes líquidos para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).....	76
Figura 29 - Potencial de geração de efluentes líquidos para todo o período	78
Figura 30 - Comportamento temporal da ocupação de área para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)	80
Figura 31 - Potencial de ocupação de área para todo o período.....	82
Figura 32 - Comparação dos dados considerando todo o período 1990 - 2030	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coleta e Geração de RSU do Brasil em 2009.....	3
Tabela 2 - Porcentagem de unidades de destinação final do lixo coletado em 2000 ..	4
Tabela 3 - Agrupamento dos poluentes atmosféricos segundo seus compostos.....	15
Tabela 4 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar	17
Tabela 5 - Índice de Qualidade do Ar da CETESB para o Estado de São Paulo	18
Tabela 6 - Fatores de Emissão do tratamento biológico (IPCC, 2006)	26
Tabela 7 - Proporção da precipitação que é convertida em percolado	34
Tabela 8 - População urbana do Estado de São Paulo utilizando a base de dados do IBGE e MME	43
Tabela 9 - Taxa _{RSU} (1990).....	44
Tabela 10 - População urbana em habitantes e Taxa _{RSU} (2007), Taxa _{RSU} (2008) e Taxa _{RSU} (2009) em kg.(hab.dia) ⁻¹ dos municípios do Estado de São Paulo	45
Tabela 11 - Dados compilados do Estado de São Paulo das variáveis relativas ao potencial de emissão de GEE	48
Tabela 12 - Dados <i>default</i> do IPCC (2000) de <i>MCF</i>	49
Tabela 13 - Correlação entre IQR e MCF	49
Tabela 14 - Proporção dos constituintes do Carbono Orgânico Degradável (DOC) no RSU do Estado de São Paulo	51
Tabela 15 - Dados de Metano Recuperado no Estado de São Paulo.....	52
Tabela 16 - Estimativas de CCW.FCF no RSU do Estado de São Paulo	54
Tabela 17- Taxas de emissão de poluentes por <i>flares</i>	56
Tabela 18 - Fator de emissão médio considerando várias formas de tecnologias de incineração	57
Tabela 19 - Relação entre Volume e Área de um biodigestor.....	61

Tabela 20 - Resultados para o potencial de geração de GEE, de 1990 a 2030, para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).....	64
Tabela 21 - Resultados para o potencial de geração energética para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)	69
Tabela 22 - Resultados para o potencial de geração de efluentes líquidos para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).....	76
Tabela 23 - Resultados para a ocupação de área para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).....	80
Tabela 24 - Compilação das contribuições de cada cenário, considerando a soma das quantidades de todo o período de 1990 a 2030, para o potencial de geração de: gases de efeito estufa, energia, poluentes totais, efluentes líquidos e a ocupação de área	83
Tabela 25 - Poluentes atmosféricos enquadrados na categoria “Outros Poluentes” de emissões não controladas em aterros.....	93
Tabela 26 - Poluentes atmosféricos enquadrados na categoria “Outros Poluentes” por incineração de RSU	97
Tabela 27 - Resultados para o potencial de emissão de poluentes atmosféricos para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América)
GEE	Gás de Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional do Saneamento Básico
RSU	Resíduo Sólido Urbano
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. Panorama estadual do gerenciamento de resíduo sólido urbano.	3
1.2. Formas de destinação final, tratamento e recuperação de resíduos.....	5
1.3. Principais impactos ambientais do gerenciamento de RSU.	6
1.4. Cenários.....	7
2. OBJETIVO	8
2.1. Objetivo Geral	8
2.2. Objetivos Específicos	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1. Potencial de Geração de Gases de Efeito Estufa	10
3.2. Potencial de Geração Energética.....	12
3.3. Potencial de Poluição Atmosférica.....	15
3.4. Potencial de Contaminação por Efluentes Líquidos.....	19
3.5. Potencial de Ocupação de Área.....	20
3.6. Cenários.....	22
4. MÉTODOS.....	23
4.1. Total de RSU Gerado.....	23
4.2. Potencial de Geração de Gases de Efeito Estufa	23
4.3. Potencial de Geração Energética.....	27
4.4. Potencial de Emissão de Poluentes Atmosféricos	31
4.5. Potencial de Geração de Efluentes Líquidos	33
4.6. Potencial de Ocupação de Área.....	35
4.7. Cenários.....	37
4.8. Período Considerado	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5.1. Dados para os Cálculos dos Cenários	43
5.2. Dados de Potencial de Emissão de Gases do Efeito Estufa	48
5.3. Dados de Potencial de Geração Energética	55
5.4. Dados de Potencial de Emissão de Poluentes Atmosféricos.....	55
5.5. Dados de Potencial de Geração de Efluentes Líquidos	57
5.6. Dados de Potencial de Ocupação de Área	60

5.7.	Cálculos dos Cenários	62
5.8.	Potencial de Emissão de Gases do Efeito Estufa	63
5.9.	Potencial de Geração Energética.....	67
5.10.	Potencial de Emissão de Poluentes Atmosféricos	71
5.11.	Potencial de Geração de Efluentes Líquidos	76
5.12.	Potencial de Ocupação de Área	79
5.13.	Compilação dos Resultados	83
6.	CONCLUSÕES.....	85
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
8.	REFERÊNCIAS	89

“O pensamento pode ter elevação sem ter elegância, e, na proporção em que não tiver elegância, perderá a ação sobre os outros. A força sem a destreza é uma simples massa.”

Fernando Pessoa

JUSTIFICATIVA

Entidades públicas e privadas estão cada vez mais preocupadas com seus impactos ambientais, sendo que uma parcela destas preocupações está vinculada ao gerenciamento de seus resíduos sólidos.

A busca de alternativas deve ser realizada de maneira adequada, caso não seja dada a devida atenção a isto, o gerador pode contribuir de forma a causar impactos ambientais, sociais e econômicos.

Com as diferentes variáveis ambientais modernas, como o aquecimento global, a busca por maximização do aproveitamento do espaço urbano e a necessidade em se obter mais fontes de recursos energéticos, é necessário que se realizem estudos que permitam comparar a disposição de resíduos. Analisando esses novos aspectos percebe-se que a comparação deve ser feita não apenas com os aspectos clássicos, como emissão de poluentes atmosféricos e contaminação do solo e de águas subterrâneas e superficiais.

O Brasil e o Estado de São Paulo estão avançando nessas questões, com a implementação da Política Estadual de Mudanças Climáticas (SÃO PAULO, 2009) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Apesar de novas, tem o mérito de apresentar estes assuntos para a população fazendo com que estes temas tornem-se parte do dia a dia de todos.

De forma a fomentar essa discussão, o presente estudo visa estabelecer cenários comparando os principais impactos ambientais das formas de disposição e tratamento de resíduos sólidos urbanos (aterro sanitário, incineração, compostagem e biodigestão) e estabelecer bases para a definição daquele que pode ser considerado o mais viável ambientalmente, em relação a determinadas condições previamente estabelecidas.

Este trabalho propõe-se a estudar os processos relacionados ao gerenciamento de resíduo sólido de forma a fornecer dados para auxiliar na tomada de decisão dos representantes públicos e da população em geral.

Este trabalho de graduação continua a proposta iniciada pelo Banco Mundial com apoio da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que desenvolveram um estudo de cenários de baixo carbono para o Brasil, tratando apenas de emissão de gases do efeito estufa (GEE) e dos custos para a implantação das alternativas (Banco Mundial, 2010). Este estudo pretende avançar

nesta discussão, pois além de incluir outras formas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, também inclui outros impactos como geração de energia, poluentes atmosféricos, efluentes líquidos e ocupação de área.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Panorama estadual do gerenciamento de resíduo sólido urbano.

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Estado de São Paulo é um dos mais avançados em relação ao resto do país. Neste Estado podem-se constatar, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2009), que os RSU coletados correspondiam a aproximadamente 95% do total gerado.

Conforme apresentado na Tabela 1 a taxa de geração de RSU per capita é de 1,318, fato este que é influenciado pelo mercado consumidor elevado da região e pelo déficit de políticas públicas que realmente influenciem a população a gerar menos RSU (ABRELPE, 2009).

Tabela 1 - Coleta e Geração de RSU do Brasil em 2009

	População Urbana [hab.]	Coletado		Gerado	
		Total [t.dia ⁻¹]	Por habitante [kg.(hab.dia) ⁻¹]	Total [t.dia ⁻¹]	Por habitante [kg.(hab.dia) ⁻¹]
Norte	11.482.246	9.672	0,842	12.072	1,051
Nordeste	38.024.507	35.925	0,945	47.665	1,254
Centro-Oeste	11.976.679	12.398	1,035	13.907	1,161
Sudeste	74.325.454	85.282	1,147	89.460	1,204
Sul	22.848.997	17.807	0,779	19.624	0,859
São Paulo	38.998.955	49.323	1,265	51.426	1,318
Brasil	158.657.883	161.084	1,015	182.728	1,152

Fonte: ABRELPE,2009.

A ABRELPE (2009) informa o percentual de RSU coletados que é enviado para aterro sanitário, aterro controlado e lixão, entretanto, esta pesquisa não apresenta dados de quantidades enviadas a outros tipos de tratamento como incineração, compostagem e biodigestão. A Figura 1 apresenta dados do Estado de São Paulo.

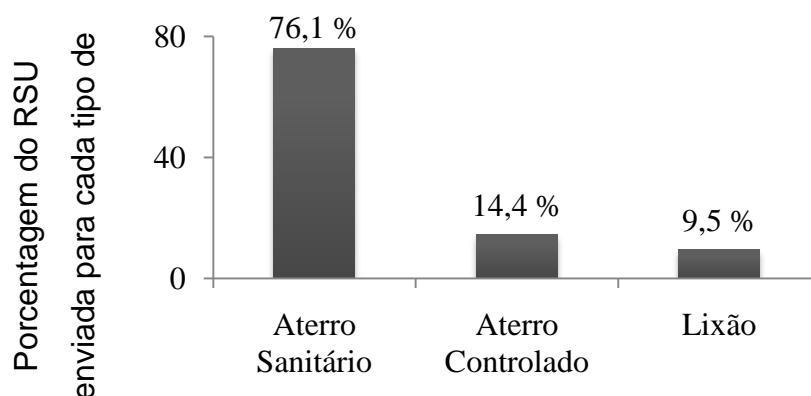


Figura 1 - Porcentual do resíduo coletado enviado para cada tipo de disposição no Estado de São Paulo

Fonte: ABRELPE, 2009.

Este panorama apresenta os aterros sanitários como o principal tipo de gerenciamento e disposição do RSU no Estado. Este, porém, não condiz com a realidade nacional apresentada pela Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (PNSB) de 2000 (IBGE, 2002), onde em aproximadamente 52,72% das unidades de destinação final de RSU no Brasil é em vazadouros (lixões) contra aproximadamente 14,30% do Estado de São Paulo para o mesmo ano, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Porcentagem de unidades de destinação final do lixo coletado em 2000

		Brasil (%)	São Paulo (%)
Vazadouro	A céu aberto (lixão)	52,72	14,30
	Em áreas alagadas	0,55	0,75
Aterro	Controlado	16,43	20,95
	Sanitário	12,77	28,80
Usina	Resíduos especiais	7,13	17,75
	Compostagem	2,29	2,38
	Reciclagem	5,24	6,02
	Incineração	2,86	9,03

Fonte: IBGE, 2002.

Ainda segundo os dados da Tabela 2 vê-se que outros tipos de gerenciamento como incineração e compostagem são subutilizados no Brasil e em São Paulo.

Segundo dados do PNSB 2008 (IBGE, 2010) a proporção entre os meios de disposição e tratamento da quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou

públicos, coletados e/ou recebidos, em todo o território nacional é dada pela Figura 2.

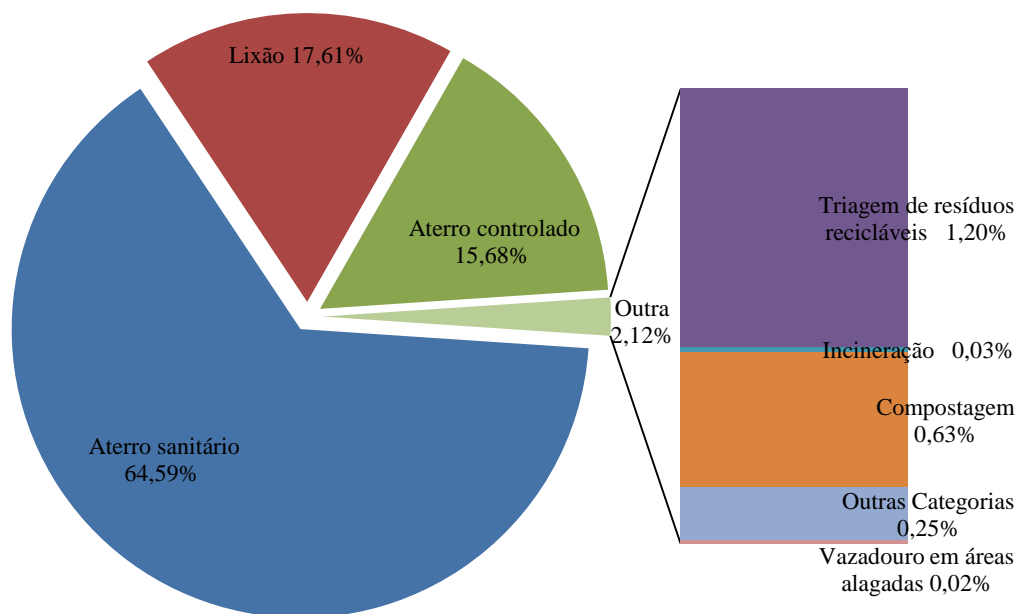


Figura 2 - Porcentagem da quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou públicos, coletados e/ou recebidos, em todo o território nacional

Fonte: PNSB (2010).

Estes dados refletem um esforço na melhora da qualidade ambiental do país, bem como a adoção de novas alternativas de gerenciamento do RSU.

1.2. Formas de destinação final, tratamento e recuperação de resíduos

A seguir serão apresentadas definições aplicadas para formas de destinação final, tratamento e gerenciamento de resíduos.

Aterramento Sanitário

Segundo o manual de gerenciamento integrado do IPT e CEMPRE (JARDIM & WELLS, 1995), um aterro sanitário é definido como um local utilizado para a disposição de resíduos sólidos na terra com base em critérios de engenharia e normas de operação específicas que permitem o confinamento seguro em termos de contaminação ambiental e proteção à saúde pública.

Incineração

A incineração é definida como uma das tecnologias térmicas de tratamento de resíduos, que consiste na queima de materiais a altas temperaturas, geralmente superiores a 900 °C, mesclada com quantidades adequadas de ar durante um tempo determinado. No caso da incineração de RSU, seus compostos orgânicos tendem a ser reduzidos a seus constituintes minerais, principalmente dióxido de carbono gasoso, vapor de água e sólidos inorgânicos (JARDIM & WELLS, 1995).

Biodigestão

AMARAL (2004) define que a biodigestão é um processo “biológico, fermentativo, em que microorganismos degradam a matéria orgânica, na ausência de oxigênio, e produzem um gás que contém metano e dióxido de carbono”.

Compostagem

Define-se compostagem como sendo o processo biológico de decomposição de matéria orgânica, sendo o resultado final um produto que se pode aplicar no solo com o propósito de melhorar suas características sem riscos ao meio ambiente (JARDIM & WELLS, 1995).

1.3. Principais impactos ambientais do gerenciamento de RSU.

O Manual de Gerenciamento Integrado (JARDIM & WELLS, 1995) e o estudo sobre o aproveitamento energético dos RSU (HENRIQUES, 2004) avaliam quais são os maiores impactos ambientais, sanitários e operacionais relacionados à disposição e tratamento do resíduo sólido urbano:

- Perda de área útil: para quaisquer das formas apresentadas, há a necessidade de ocupação de uma determinada área, variando de acordo com o tipo e a tecnologia estabelecida, área esta que poderia ser utilizada para outros fins.
- Emissão de poluentes atmosféricos: principalmente em incineradores, apesar da tecnologia avançada de filtragem dos gases, a grande variabilidade da composição dos resíduos pode resultar em problemas para a operação do incinerador.
- Emissão de gases do efeito estufa: principalmente evidenciada em aterros, incineradores e biodigestores com a emissão de metano (CH₄)

e gás carbônico (CO₂), os gases de efeito estufa (GEE) mais representativos relacionados aos RSU.

- Geração de efluentes líquidos: principalmente evidenciada em aterros e unidades de compostagem, devido ao potencial de geração de lixiviado (chorume).
- Geração de energia: caracterizado como impacto ambiental positivo, possibilitando o aproveitamento energético do biogás de aterros e biodigestores e a incineração dos RSU.

1.4. Cenários

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2000), em seu relatório especial para cenários de emissões, cenários podem ser definidos como “imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar” de forma que pode ser utilizado como “ferramenta apropriada para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras e para avaliar as incertezas associadas”. O IPCC indica ainda que o uso desta ferramenta contribua para a análise das alterações climáticas, incluindo a modelagem do clima e a avaliação de impactos, adaptação e mitigação.

Segundo SAUER (2010) cenários podem ser construídos adotando-se a premissa de que existem inúmeros futuros viáveis, qualitativamente distintos, de acordo com a decisão tomada e que apresentam fatores que escapam do controle.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Elaborar cenários ambientais para o Estado de São Paulo comparando os diferentes tipos de disposição, gerenciamento e tratamento de resíduos sólidos urbanos (aterros sanitários, incineração, compostagem e biodigestão) quanto aos seus impactos ambientais mais significativos.

A proposta é comparar as mudanças futuras no potencial de emissão de gases de efeito estufa, gases poluentes, geração energética, geração de efluentes líquidos e ocupação de área caso ocorra uma mudança na fração de massa de RSU destinada para cada tipo de gerenciamento, disposição e tratamento de RSU empregada no Estado a partir de 2010.

Este trabalho não visa comparar alternativas de redução, reutilização e reciclagem de RSU, amplamente conhecidas como boas práticas ambientais. O estudo também descarta a alternativa de lixão, pois está fora dos critérios legais estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), também descarta a alternativa de aterros controlados, reconhecidamente de aspecto ambiental negativo.

2.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, listam-se:

- Identificar métodos utilizados para estimar e quantificar os principais impactos ambientais negativos e positivos do gerenciamento de RSU;
- Obter dados por meio de pesquisas bibliográficas e coleta de informações para os quatro tipos de destinação e tratamento de RSU quanto ao potencial de:
 - Emissão de gases do efeito estufa;
 - Emissão de gases poluentes;
 - Geração de efluentes líquidos;
 - Geração energética;
 - Ocupação de área;
- Levantar os dados necessários para o Estado de São Paulo;
- Sugerir hipóteses de comportamento temporal dos dados levantados;

- Elaborar uma ferramenta computacional que permita a geração dos cenários ambientais definidos pelas hipóteses de gerenciamento de resíduos;
- Estimar quantitativamente e apresentar o comportamento temporal dos cenários;
- Comparar os diferentes cenários obtidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Potencial de Geração de Gases de Efeito Estufa

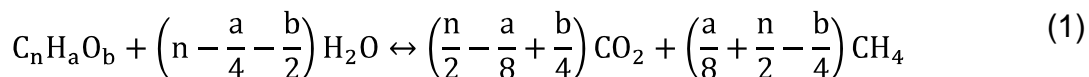
Primeiramente, é necessário determinar quais gases são enquadrados na categoria de gases de efeito estufa, desta forma o Guia de Boas Práticas do IPCC (2000) estabelece alguns gases como sendo gases de efeito estufa diretos, são eles: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), a família dos gases hidrofluorcarbonos (HFCs), a família dos gases perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6). Os Clorofluorcarbonos (CFCs) também são gases de efeito estufa, porém não abordados pelo IPCC, pois, como podem impactar a camada de ozônio, já fazem parte da lista dos gases controlados pelo protocolo de Montreal.

O caderno do IPCC (2000), que trata da geração de gases de efeito estufa pelo tratamento e disposição de resíduos sólidos (IPCC, 2006), estabelece que em aterros deve-se considerar a geração do gás metano, na compostagem e na biodigestão deve-se considerar a geração do gás metano e o óxido nitroso e na incineração o gás carbônico de origem fóssil e o óxido nitroso.

Aterros Sanitários

Metano e dióxido de carbono são os constituintes primários do gás gerado em aterros (biogás ou gás de aterro) e são produzidos pelos microrganismos no interior do aterro em condições anaeróbias. A decomposição da matéria orgânica presente obedece algumas fases principais, sendo a primeira aeróbia onde o principal gás gerado é o dióxido de carbono. A segunda é anaeróbia onde todo o O_2 de aterro está sendo consumido e inicia-se uma produção ampla de CO_2 e uma quantidade menor de H_2 . Na terceira fase inicia-se a produção de CH_4 com um acompanhamento da redução de geração de CO_2 . Já a geração de N_2 , abundante nas duas primeiras fases, começa a decair. Na quarta fase as produções de CO_2 , CH_4 e N_2 tornam-se estáveis. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA) ainda cita que a duração e o volume de produção de gases destas fases dependem das condições do aterro (EPA, 1995).

A Equação (1) (ETHERIDGE, 2003) descreve o balanço molecular da decomposição da matéria orgânica, onde é possível observar como ocorre a produção de metano em aterros.



Deve-se ressaltar que o CO₂ proveniente da decomposição anaeróbia do resíduo depositado em aterros é proveniente do carbono orgânico degradável de biomassa, ou seja, sua liberação por meios bacterianos ou pela queima 100% eficiente do metano resulta em um saldo de geração de GEE nulo (IPCC, 2000). Segundo a mesma entidade o metano tem potencial de aquecimento global (PAG) 21 vezes maior que o dióxido de carbono. O PAG é uma das métricas utilizadas para determinar o quanto que um determinado GEE contribui para o aquecimento global comparando-o com o CO₂, o PAG sempre está vinculado a um período de tempo, que geralmente é 100 anos (IPCC, 2007).

Dentre os métodos de estimativa de emissão de metano por aterros temos o método gerado pelo IPCC amplamente difundido e aceito que foi publicado em 1996, com revisões em 2000 e 2006.

Incinerador

HENRIQUES (2004) apresenta em seus estudos os principais gases emitidos por incineradores, sendo que o mais abundante deles é o CO₂. Este gás apresenta PAG igual a 1 e é emitido não apenas através de meios naturais. Sua liberação está intrinsecamente vinculada ao ciclo do carbono e também às emissões antropogênicas principalmente por queima de combustíveis e resíduos de origem fóssil, sendo o de origem orgânica não contabilizado no cálculo das emissões (IPCC, 1996).

Outro gás de efeito estufa gerado por esta tecnologia é o óxido nitroso (N₂O), apresentando um PAG de 310 tCO_{2eq}.tN₂O⁻¹ (IPCC, 1996).

Biodigestão

Também denominada digestão anaeróbia pelo IPCC 2006, esta alternativa apresenta potencial de emissão de CH₄ na ordem de 2 g de CH₄/kg de resíduo em base seca e 1 g de CH₄/kg de resíduo em base úmida, já considerando sistemas de recuperação do biogás gerado (IPCC, 2006).

O mesmo estudo assume negligenciável a porção de N₂O emitido por esta mesma tecnologia de tratamento de resíduo sólido.

Compostagem

Segundo o IPCC 2006, a tecnologia de compostagem apresenta potencial de emissão de CH₄ na ordem de 10 g de CH₄/kg de resíduo em base seca e 4 g de CH₄/kg de resíduo em base úmida e a de N₂O na ordem de 0,6 g de N₂O/kg de resíduo em base seca e 0,3 g de N₂O/kg de resíduo em base úmida.

Nota-se que o IPCC (2006) apresenta um potencial maior de geração de metano pela compostagem aeróbia do que pela biodigestão, isto se deve ao fato do IPCC já considerar para o caso da biodigestão a recuperação e queima do metano produzido.

Por outro lado o estudo de gerenciamento integrado de RSU (JARDIM & WELLS, 1995) destaca que o processo de compostagem deve ocorrer de forma totalmente aeróbia eliminando a geração de CH₄.

3.2. Potencial de Geração Energética

Aterros Sanitários

O Estado de São Paulo apresenta projetos de geração energética pelo biogás de aterros, como o caso do aterro Bandeirantes, localizado no município de São Paulo - SP, atualmente não recebe mais RSU devido ao esgotamento de sua área útil, porém quando em funcionamento recebia cerca de sete mil toneladas de RSU por dia, operando desde 1976 (BIOGÁS, 2010). Segundo a Biogás Energia Ambiental S/A, empresa que gerencia o empreendimento de geração de energia, este aterro apresenta uma produção de até 12.000 Nm³.h⁻¹ de biogás, com um conteúdo mínimo de 50% de metano, sendo captado durante 24 horas por dia e em 365 dias por ano. Este metano é utilizado para acionar 24 conjuntos moto-geradores de 925 kW.conjunto⁻¹, o que corresponde a uma potência líquida de 20.000 kW, suficiente para abastecer cerca de 400.000 habitantes (BIOGÁS, 2010).

Segundo o departamento de energia dos Estados Unidos (WALSH *et. al.*, 1988), o biogás de aterro apresenta entre 40-55% de metano, sendo que esta proporção pode ser alterada por inúmeros fatores, tais como temperatura, tempo de retenção, quantidade de ar atmosférico, presença de determinadas bactérias,

proporção entre C/N/P do resíduo, pH, ácidos voláteis e substâncias tóxicas. O IPCC (IPCC, 1996) corrobora com a hipótese do departamento de energia americano, definindo um valor médio de 50% de metano no biogás de aterro.

Através da análise do software “BIOGÁS” elaborado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), verifica-se a possibilidade de obter o potencial de geração energética de um projeto de aterro sanitário.

O Poder Calorífico mede calor produzido pela combustão completa de uma unidade de massa do combustível. O poder calorífico pode ser dividido em Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Superior (PCS), de acordo com a Norma NBR 15.213/05 (ABNT, 2005). Poder calorífico superior é a quantidade de energia transferida na forma de calor pela combustão completa e ideal de uma unidade de volume do gás com o ar, nas condições de pressão e temperatura onde toda a água formada pela reação encontra-se na forma líquida. Já poder calorífico inferior é a quantidade de energia transferida na forma de calor pela combustão completa e ideal de uma unidade de volume do gás com o ar, em condições onde toda a água formada pela reação encontra-se na fase gasosa. A obtenção do poder calorífico inferior é dada pela diferença entre o PCS e a entalpia de vaporização da água.

O departamento de energia dos Estados Unidos em seu Manual de Utilização do Biogás (WALSH *et. al.*, 1988) determinou que o poder calorífico inferior do metano deve ser utilizado para o cálculo do potencial de geração energética e que este valor é de aproximadamente 33.980 kJ.m^{-3} (912 Btu.ft^{-3}) para 100% de metano no biogás.

Incineração

HENRIQUES (2004) faz um levantamento da geração energética possível para o RSU brasileiro, apresentando dados provenientes de levantamentos feitos sobre o poder calorífico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a empresa Usina Verde obtendo-se o valor de $2,66 \text{ MWh.t}^{-1}$ para o resíduo seco e $0,7 \text{ MWh.t}^{-1}$ para o resíduo sem prévia secagem. A mesma autora cita que outras fontes sugerem uma quantidade de geração energética em torno de $0,55 \text{ MWh.t}^{-1}$ de RSU e $0,7 \text{ MWh.t}^{-1}$.

Nota-se certa divergência entre os dados apresentados, que pode ser explicada pela variabilidade na composição dos resíduos sólidos urbanos como

sugere a própria autora. Desta forma, é prudente considerar que a geração energética varia em função das diferentes composições de RSU, pois o poder calorífico irá variar tanto quanto houver variação na composição do resíduo.

Segundo KATHIRAVALE (2003), é possível modelar e estimar o poder calorífico superior dos RSU a partir de sua composição.

O mesmo autor em seu estudo levantou os seguintes modelos que são baseados nas análises:

- *Ultimate*: considera a composição molecular (carbono, nitrogênio, oxigênio, entre outros) do RSU;
- *Proximate*: considera as variáveis como material volátil, carbono fixo e umidade;
- Composição Física: considera a análise gravimétrica dos RSU e sua porcentagem em massa de papel, plástico, alimentos e umidade.

Biodigestão

Segundo OLIVER (2008) a digestão anaeróbia de dejetos é uma tecnologia que contribui para entre outros fatores gerar biogás, que pode ser usado como fonte energética. Essa tecnologia é utilizada no Brasil para aquecimento de granjas, como verificado no trabalho de NISHIMURA (2009) para resíduos de origem rural.

Segundo o departamento de energia dos Estados Unidos (WALSH *et. al.*, 1988), o biogás produzido em biodigestores é uma mistura de diversos gases que consiste tipicamente de 60-70% de metano, 30-40% de CO₂ e menos que 1% de gás sulfídrico (H₂S), sendo que dentre estes o metano é o único que possibilita a geração energética. Esta composição guarda semelhanças com a composição do biogás de aterros sanitários, já abordado anteriormente.

Compostagem

Segundo JARDIM & WELLS (1995), a aeração da leira de compostagem é importante devido ao processo aeróbio necessário para uma ótima formação do composto, porém ressalta que no processo natural onde não há insuflação de oxigênio na massa de resíduo pode ocorrer a formação de zonas anaeróbias que possibilitam a formação de metano em pequenas concentrações. Se não ocorrer a formação de metano o potencial de geração energética é reduzido a zero.

3.3. Potencial de Poluição Atmosférica

A CETESB (2010) define poluentes como quaisquer substâncias que quando presentes no ar (sendo mensurado pela sua concentração) possam tornar o ar impróprio nocivo ou ofensivo à saúde. Também causam inconveniente ao bem estar público, danos a materiais, fauna, flora ou à segurança, uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A CETESB (2010) agrupa os poluentes em duas categorias básicas:

- Poluentes Primários: lançados diretamente pelas fontes de emissão.
- Poluentes Secundários: formados na atmosfera através de reações químicas entre poluentes primários e componentes naturais atmosféricos.

Alguns poluentes atmosféricos são apresentados na Tabela 3, de acordo com seus componentes químicos mais representativos.

Tabela 3 - Agrupamento dos poluentes atmosféricos segundo seus compostos

Enxofre	Nitrogênio	Orgânicos	Halogenados
SO ₂	NO	Hidrocarbonetos	HCl
SO ₃	NO ₂	Alcoóis	HF
Sulfatos	NH ₃	Aldeídos	Cloretos
Compostos de Enxofre reduzidos	HNO ₃	Cetonas	Fluoretos
	Nitratos	Ácidos Orgânicos	
Monóxido de Carbono	Material Particulado		Ozônio
CO	Mistura de compostos no estado sólido ou líquido		O ₃
			Peroxiacetil Nitrato (PAN)
			Acroleína
			Formaldeído

Fonte: CETESB, 2010.

Alguns destes poluentes citados são amplamente utilizados como indicadores de qualidade do ar, devido à frequência de ocorrência e efeitos adversos. São eles o Material Particulado (MP), o Dióxido de Enxofre (SO₂), o Monóxido de Carbono (CO), o Ozônio Troposférico (O₃), os Hidrocarbonetos (HC) e os Óxidos de Nitrogênio (NO_x). A seguir será apresentada uma breve descrição de cada um desses poluentes

Segundo a CETESB (2010), como material particulado é enquadrado um conjunto de poluentes constituídos de poeira, fumaça e todo o tipo de material sólido e líquido que se mantêm suspenso na atmosfera. Suas principais fontes são veículos, indústrias, queima de biomassa, ressuspensão de poeira do solo, entre outros. Estes também podem ser gerados a partir de gases como SO_2 , NO_x e Compostos Orgânicos Voláteis (COV's). O MP pode ser classificado de acordo com o tamanho de suas partículas, sendo dividido em partículas totais em suspensão (diâmetro menor que $50 \mu\text{m}$), MP_{10} (diâmetro menor que $10 \mu\text{m}$), $\text{MP}_{2,5}$ (menor que $2,5 \mu\text{m}$) e fumaça (material particulado suspenso proveniente de processos de combustão). Segundo DERISIO (1992), o MP além de causar incômodo estético do ambiente devido à diminuição da visibilidade também pode causar danos fisiológicos, pois algumas de suas partículas podem apresentar toxicidade ou carcinogenicidade.

O dióxido de enxofre (SO_2) é o resultado da queima principalmente de combustíveis que contém enxofre. Este elemento ocorre associado nas jazidas de carvão mineral e principalmente nas de petróleo, o que faz com que seus derivados possam apresentar elevados teores deste gás, oxidados posteriormente durante a combustão. Como efeitos nocivos, os óxidos de enxofre podem formar chuvas ácidas e envenenar os catalisadores dos conversores catalíticos, inviabilizando o uso deste importante instrumento de controle de poluição atmosférica veicular (CETESB, 2010). DERISIO (1992) ressalta que o efeito dos gases poluentes na saúde humana está intimamente ligado à sua solubilidade nas paredes do aparelho respiratório, sendo esse gás especificamente altamente solúvel ao trato respiratório superior, causando problemas de irritação e aumento da morbidade cardiovascular.

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor formado pela queima incompleta de combustíveis, sendo que geralmente são encontradas altas concentrações deste gás em regiões com grande frota de veículos (CETESB, 2010). O CO detém a propriedade de apresentar alta afinidade com a hemoglobina sanguínea (cerca de 210 vezes maior que o oxigênio), o que causa problemas como a diminuição de reflexo e acuidade visual em baixas concentrações (DERISIO, 1992). Em altas concentrações, pode causar desmaios e até mesmo a morte.

Os óxidos de nitrogênio são formados no processo de combustão, pela oxidação do nitrogênio presente no ar. São formados principalmente pelos

automóveis em grandes cidades, em especial os de motores ciclo diesel e são precursores da formação de oxidantes fotoquímicos na atmosfera (CETESB, 2010).

O ozônio troposférico se agrupa na categoria conhecida como oxidantes fotoquímicos, sendo o principal produto da reação entre NO_x e COV's na presença de luz solar com outros constituintes atmosféricos, sendo prejudicial a saúde humana, da flora e da fauna (CETESB, 2010). No caso da saúde humana a presença de oxidantes fotoquímicos agrava problemas relacionados ao trato respiratório, como a asma, a redução da capacidade pulmonar e a ardência nos olhos (DERISIO, 1992).

A queima incompleta e a evaporação de combustíveis e de outros produtos orgânicos voláteis podem resultar na formação de hidrocarbonetos, muitos deles cancerígenos e mutagênicos, não havendo uma concentração totalmente segura destes compostos na atmosfera (CETESB, 2010).

Índice de Qualidade do Ar

A Resolução CONAMA 03/90 estabelece índices de qualidade do ar atmosférico, conforme apresentado na Tabela 4. Esta apresenta padrões primários entendidos como aqueles que se ultrapassados podem causar dano à saúde da população, sendo considerados como valores máximos permitidos. Padrões secundários são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Tabela 4 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

Poluente	Padrão Primário [$\mu\text{g.m}^{-3}$]	Padrão Secundário [$\mu\text{g.m}^{-3}$]
Partículas Totais em Suspensão ^a	80	60
Fumaça ^b	60	40
Partículas Inaláveis ^b	50	50
Dióxido de Enxofre ^b	80	40
Monóxido de Carbono ^c	40.000	40.000
Ozônio ^c	160	160
Dióxido de Nitrogênio ^b	100	100

a Média Geométrica Anual.

b Média Aritmética Anual.

c Concentração média de 1 hora que não deve ser excedida mais de uma vez no ano.

Fonte: CONAMA, 1990.

A CETESB (2010) apresenta dados de concentração de poluentes (MP, ozônio, CO, NO₂ e SO₂) cuja comparação com os ocorrentes no ar estabelecem um índice de qualidade do ar. Estes dados são apresentados na Tabela 5 e pode-se observar uma boa correlação entre os padrões nacionais e estaduais de qualidade do ar.

Tabela 5 - Índice de Qualidade do Ar da CETESB para o Estado de São Paulo

Qualidade	Índice	MP ₁₀ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	O ₃ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	CO (ppm)	NO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	SO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)
Boa	0-50	0-50	0-80	0-4,5	0-100	0-80
Regular	51-100	50-150	80-160	4,5-9	100-320	80-365
Inadequada	101-199	150-250	160-200	9-15	320-1130	365-800
Má	200-299	250-420	200-800	15-30	1130-2260	800-1600
Péssima	>299	>420	>800	>30	>2260	>1600

Fonte: CETESB, 2010.

A Compilação de Fatores de Emissão de Poluentes Atmosféricos (EPA, 2008) apresenta capítulos específicos sobre emissão de poluentes atmosféricos por manejo de RSU e considera como fonte de poluentes atmosféricos a incineração de RSU, aterros sanitários e a queima de biogás proveniente da decomposição anaeróbia do RSU. Desta forma as emissões de poluentes por RSU foram divididas em três categorias principais: Emissões Controladas de Poluentes, Emissões não Controladas de Poluentes e Emissões de Poluentes por Combustão de RSU.

Emissões Controladas de Poluentes

Essas emissões são provenientes da queima de biogás. Os principais poluentes atmosféricos emitidos são: NO_x, CO e o material particulado (EPA, 2008).

Emissões não Controladas de Poluentes

Provenientes do aterramento de RSU, para estimar as emissões dos vários poluentes atmosféricos presentes, tais como compostos orgânicos não metânicos (NMOC), vários fatores devem ser considerados como a produção total de biogás, a configuração do aterro e as características do RSU (EPA, 2008). Os fatores de emissão dados pela EPA (2008) podem resultar em estimativa de emissões

conservadoras já que consideram apenas a geração de biogás e não o biogás que vai para a atmosfera.

Emissões de Poluentes por Combustão de RSU

A incineração de RSU envolve a queima de lixo e outros sólidos classificados como não perigosos, considerando as tecnologias de incineração de RSU existentes (EPA, 2008). Segundo a EPA (2008), dependendo das características do RSU incinerado e as condições de combustão os seguintes poluentes podem ser emitidos para a atmosfera:

- CO;
- Dioxinas e Furanos;
- Gases ácidos (HCl e SO₂);
- Material Particulado;
- Metais (no estado sólido no material particulado, exceto o mercúrio); e
- NO_x.

3.4. Potencial de Contaminação por Efluentes Líquidos

Aterro Sanitário e Compostagem

O potencial de contaminação de solo e águas em aterros e compostagens são dados principalmente pela geração de lixiviado, também conhecido como chorume (JARDIM & WELLS, 1995).

Segundo BARROS (2004), três métodos são amplamente utilizados para o cálculo de dimensionamento de vazão de chorume em aterros, sendo eles o método suíço, o método do balanço hídrico e o método HELP-MODEL (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance).

O método suíço varia em função do peso específico, da precipitação, da área superficial e da compactação do maciço de RSU. O método do balanço hídrico utiliza variáveis climáticas e hídricas como precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e capacidade de armazenamento de líquidos nos resíduos. O HELP-MODEL simula o movimento de água através das camadas de um aterro sanitário, apresentando como dados de entrada as propriedades dos solos e dos resíduos, os dados climáticos e a geometria do aterro (BARROS, 2004).

BARROS (2004) conclui que o software desenvolvido pela EPA “HELP - MODEL” fornece resultados muito próximos ao esperado, com erros de aproximadamente 2%. Porém, para sua correta simulação são necessários muito esforço computacional e muitos dados de condição do maciço de resíduos, informações de difícil obtenção. Já o método suíço apresenta boas aproximações com um erro vinculado de 18%, ficando logo atrás do HELP-MODEL. O método do balanço hídrico foi o último classificado, obtendo mais de 19% de erro.

3.5. Potencial de Ocupação de Área

Aterros Sanitários

Em geral alternativas de disposição final de resíduos apresentam uma problemática com relação à área ocupada, pois o sítio de destino do resíduo deve estar relativamente próximo ao centro gerador, geralmente apresentando grandes proporções. Com a expansão das cidades algumas comunidades passam a se instalar próximo a estes sítios.

A Norma NBR 13.896/1997 define critérios para a seleção da área de um aterro sanitário, especificando que esta deve ser escolhida de forma que: o impacto ambiental seja minimizado, a aceitação pela população seja maximizada, esteja de acordo com o zoneamento da região e possa ser utilizado ao longo do espaço de tempo necessitando apenas de um mínimo de obras para início da operação.

A mesma norma define critérios físicos para a instalação do aterro, tais quais (ABNT, 1997):

- Topografia: fator determinante para a escolha, sendo recomendados locais com declividade superior a 1% e inferior a 30%;
- Geologia: é importante para a determinação da capacidade de depuração do solo e da velocidade de infiltração, sendo considerada desejável a existência de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s e uma zona não saturada com espessura superior a 3,0m. Obrigatoriamente entre a superfície inferior do aterro e o nível mais alto do lençol freático (medido na época de maior precipitação) deve haver uma camada natural de espessura mínima de 1,5 metros;

- Recursos hídricos: deve ser avaliada a influência do aterro na qualidade e no uso das águas superficiais e subterrâneas. O aterro deve ser localizado a uma distância mínima de 200 metros de qualquer curso de água;
- Vegetação: deve ser realizado um estudo macroscópico da vegetação;
- Acessos: utilizados em toda a operação do aterro;
- Tamanho e vida útil: recomenda-se construção de aterros com vida útil mínima de 10 anos;
- Custos: é necessária a elaboração de um cronograma físico-financeiro para analisar a viabilidade econômica do empreendimento;
- Distância mínima dos núcleos populacionais: recomendam-se distâncias superiores a 500 metros;
- Inundações: obrigatoriamente o aterro deve ser em áreas cujo período de recorrência das inundações seja superior a 100 anos;
- Legislação: obrigatoriedade de respeitar a legislação local de uso do solo.

A análise de todos estes parâmetros expõe a problemática da obtenção de área adequada para a instalação de um aterro sanitário.

Incineração

Um dos principais atrativos da incineração é a possibilidade da redução do volume dos resíduos para até 4% se comparado ao inicial, constituído de cinzas inertes que podem possuir diversas aplicações. Já existem estudos de aplicação destas em produtos utilizados para a construção civil (HENRIQUES, 2004), sendo, porém a prática mais usual a destinação destas para aterros sanitários.

Biodigestão

Não se encontrara registros de problemas relacionados à localização de implantação de biodigestores, mas é razoável que exista dada a potencialidade de geração de mau-cheiro.

Compostagem

As leiras de compostagem geralmente possuem forma piramidal ou cônica, reta ou triangular, com dimensões recomendadas que variem em torno de 3 m de largura ou diâmetro, 2 m de altura, variando entre 1,50 m e 2 m (EMBRAPA, 2004).

Não se encontrou registros de problemas relacionados à localização de implantação de leiras de compostagem, mas assim como no caso dos biodigestores, é razoável que existam especialmente relacionados à potencialidade de geração de mau-cheiro.

3.6. Cenários

SAUER (2010) categoriza os métodos de elaboração de cenários em:

- **Evolutivos:** Descrevem a trajetória do sistema do presente até certo limite de tempo. Utilizada para análise de decisões de curto e médio prazo com efeitos para o longo prazo, bem como a viabilidade do processo e sua continuidade.
- **Antecipatórios:** Descrevem o um futuro plausível sem a trajetória. Utilizado para longos horizontes de tempo.
- **Tendências:** Considera que a gama de políticas/contextos é a mesma do passado, mediante ajustes.
- **Exploratórios:** Investigam a combinação de diferentes políticas/contextos pré-estabelecidos e tem no seu escopo a definição de um conjunto de políticas coerentes.
- **Normativos:** Partem de metas e procuram para cada contexto as políticas que correspondem as metas.

O Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento (Banco Mundial, 2010) publicou um relatório de síntese técnica para estudos de baixo carbono no Brasil na área de resíduos onde cenários são projetados para 2030, esta publicação traz a estratégia geral para elaboração do cenário, apresentada na Figura 3.

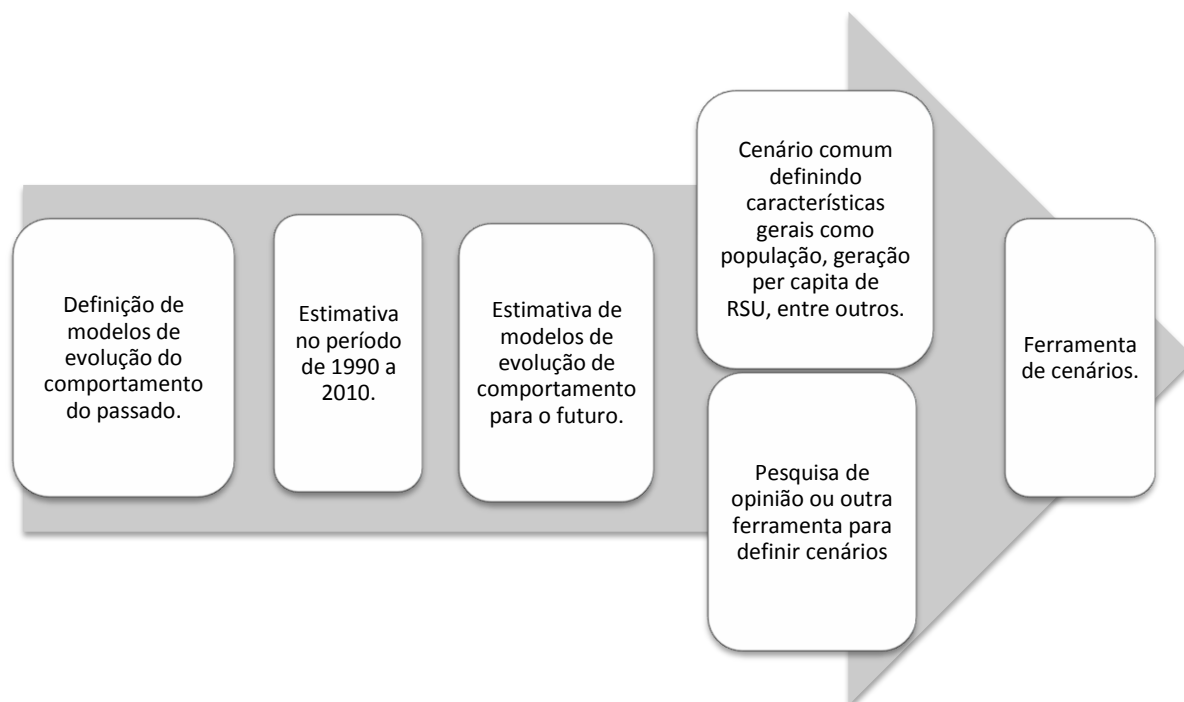


Figura 3 - Estratégia geral para elaboração de um cenário.

Fonte: Adaptado de BIRD (Banco Mundial, 2010)

4. MÉTODOS

4.1. Total de RSU Gerado

A massa de resíduo gerada pelo estado de São Paulo é dada pela Equação (2), apresentada abaixo.

$$Massa_{RSU(x)} = pop_{urb(x)} \cdot Taxa_{RSU(x)} \quad (2)$$

onde:

$Massa_{RSU(x)}$	Massa total de RSU gerada pelo Estado de São Paulo no ano x	[Gg _{RSU}]
$pop_{urb(x)}$	População urbana no ano x	[hab.]
$Taxa_{RSU(x)}$	Taxa de geração de resíduo sólido urbano no ano x	[Gg RSU.(hab.ano) ⁻¹]
x	Ano em que o RSU foi gerado	[ano]

4.2. Potencial de Geração de Gases de Efeito Estufa

Estimativa das emissões GEE em aterros de resíduos sólidos

O método utilizado para a estimativa das emissões provenientes dos aterros é o de decaimento de primeira ordem, de acordo com o Método Revisado de 1996 do

IPCC e do Guia de Boas Práticas publicado em 2000, pelo mesmo Painel. Este método, também conhecido por *Tier 2*, caracteriza-se por considerar que a emissão de CH₄ persiste ao longo de uma série de anos, após a disposição do resíduo (IPCC, 2000). Para a sua aplicação, são necessários dados relativos ao clima (médias anuais de temperatura e chuva), à quantidade de resíduo aterrada, à composição do resíduo, à qualidade de operação do aterro e às quantidades de CH₄ recuperada e oxidada.

A estimativa de emissões de CH₄ a partir do método de decaimento de primeira ordem é descrita na Equação (3) que foi adaptada de IPCC (2000).

$$Q_{(x)} = \sum_x \left\{ \left[\left(\frac{1 - e^{-k}}{k} \right) \cdot k \cdot \text{Massa}_{RSUate(x)} \cdot (MCF_{(x)} \cdot DOC_{(x)} \cdot DOC_f \cdot F \cdot \frac{16}{12}) \cdot e^{-k(t-x)} \right] - R_{(x)} \right\} \cdot (1 - OX) \quad (3)$$

onde:

$Q_{(x)}$	Quantidade de metano gerado no ano x	[GgCH ₄ .ano ⁻¹]
k	Constante de decaimento	[ano ⁻¹]
$\text{Massa}_{RSUate(x)}$	Massa total de RSU aterrada no ano x	[Gg _{RSU}]
$MCF_{(x)}$	Fator referente ao gerenciamento dos locais de disposição de RSU	[adimensional]
$DOC_{(x)}$	Carbono orgânico degradável	[GgC.GgRSU ⁻¹]
DOC_f	Fração do DOC que decompõe	[adimensional]
F	Fração de metano no biogás	[adimensional]
$\frac{16}{12}$	Razão de conversão de carbono (C) a metano (CH ₄)	[GgCH ₄ .GgC ⁻¹]
t	Anos após a disposição do RSU	[ano]
R	Recuperação do metano	[GgCH ₄ .ano ⁻¹]
OX	Fator de oxidação	[adimensional]

O termo $DOC_{(x)}$ é definido pela Equação (4).

$$DOC_{(x)} = 0,4 \cdot A + 0,17 \cdot B + 0,15 \cdot C + 0,3 \cdot D \quad (4)$$

onde 0,4; 0,17; 0,15 e 0,3 são frações *default* (IPCC, 2000) de carbono orgânico degradável para as seguintes frações do RSU:

A	Papéis e têxteis	[adimensional]
B	Jardins, parques e outros putrescíveis não alimentares	[adimensional]
C	Resíduos alimentares	[adimensional]
D	Madeira e palha	[adimensional]

O IPCC fornece um default para a fração do DOC que decompõe (DOC_f) de 50%. Para a fração de metano no biogás (F), o IPCC também fornece um *default* de 50%.

Estimativa das emissões de GEE por incineração

Um método de estimativa de emissões de incineração de RSU amplamente difundido é o método gerado pelo IPCC com publicado em 1996, com revisões em 2000 e 2006.

O método do IPCC (2000), apresentado na Equação (5), define a quantificação de CO₂ emitido pelo processo de incineração de RSU.

$$Q_{CO_2} = \sum \left(IW \cdot CCW \cdot FCF \cdot EF \cdot \frac{44}{12} \right) \quad (5)$$

onde:

Q_{CO_2}	Quantidade de dióxido de carbono gerada ao ano	[GgCO ₂ .ano ⁻¹]
IW	Massa de RSU incinerada	[Gg.ano ⁻¹]
CCW	Carbono contido no RSU	[adimensional]
FCF	Fração de carbono fóssil no RSU	[adimensional]
EF	Eficiência de queima dos incineradores de RSU	[%]
$\frac{44}{12}$	Conversão de C para CO ₂	[adimensional]

O mesmo método considera que a incineração também provoca emissões de N₂O que são quantificadas pela Equação (6).

$$Q_{N_2O} = \sum (IW \cdot FE_{N_2O}) \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

onde:

Q_{N_2O}	Quantidade de óxido nitroso gerada ao ano	[GgN ₂ O.ano ⁻¹]
FE_{N_2O}	Fator de emissão de N ₂ O	[kgN ₂ O.Gg _{resíduo} ⁻¹]
10^{-6}	Fator de conversão de Gg para kg	[10 ⁻⁶ Gg.kg ⁻¹]

Não há, nem na literatura estadual, nem no IPCC (2000) dados de FE de N₂O. Por essa razão, foi empregado o default do IPCC (2006) de 60 gN₂O.tRSU⁻¹.

Estimativa das emissões GEE por biodigestão e compostagem

Segundo o IPCC (2006), as emissões de CH₄ por tratamentos biológicos, tais como biodigestão ou compostagem, são dadas pela Equação (7).

$$Q_{CH_4} = \sum_i (M_i \cdot FE_i) \cdot 10^{-3} - R \quad (7)$$

onde:

Q_{CH_4}	Total de emissões de metano	$[GgCH_4.(ano)^{-1}]$
M_i	Massa do RSU orgânico tratado por i	$[GgRSU]$
FE_i	Fator de emissão do tratamento i	$[gCH_4.(kg_{RSU})^{-1}]$
i	Compostagem	
	Digestão anaeróbia	
R	Total de CH_4 recuperado	$[GgCH_4.(ano)^{-1}]$

Considerando os fatores de emissão definidos pelo método de 2006 do IPCC, a Tabela 6 identifica os fatores de emissão para cada um dos tratamentos biológicos considerados.

Tabela 6 - Fatores de Emissão do tratamento biológico (IPCC, 2006)

Tipo de tratamento	Fator de Emissão do CH_4 ($gCH_4.kg_{RSU}^{-1}$)		Fator de Emissão do N_2O ($gN_2O.kg_{RSU}^{-1}$)	
	Base Seca	Base Úmida	Base Seca	Base Úmida
Compostagem	10 (0,08-20)	4 (0,03-8)	0,6 (0,2-1,6)	0,3 (0,06-0,6)
Digestão Anaeróbia ^a	2 (0-20)	1 (0-8)	Negligenciável	Negligenciável

^a Considerando a existência de sistemas de recuperação de biogás.

Observação: O método assume-se o resíduo apresenta 25-50% de DOC e 2% de N em base seca. O cálculo também assume que o resíduo apresentará 60% de umidade em base úmida.

Verifica-se através da Tabela 6 que o fator de emissão apresentado pelo IPCC para a digestão anaeróbia já considera sistemas de recuperação de biogás, este fator de emissão não é o mais indicado para o escopo deste trabalho que visa à obtenção do potencial de geração de GEE, ou seja, é necessário um fator de emissão que represente a geração de metano total, sem considerar sistemas de recuperação de biogás, desta forma a empresa Kuttner (KUTTNER, 2010) que realiza projetos de construção de biodigestores forneceu um fator de emissão de metano de $100 Nm^3Biogás.t_{RSU}^{-1}$, se considerarmos 70% de CH_4 no biogás de biodigestão teremos fator de emissão de $70 Nm^3CH_4.t_{RSU}^{-1}$, o equivalente em massa é $47,49 gCH_4.kg_{RSU}^{-1}$ sendo este o valor empregado neste trabalho.

Apesar do fator de emissão dado pelo IPCC assumiu-se que sistemas de compostagem devem ser operados corretamente e adequadamente aerados de forma a não emitir metano, então para este trabalho de graduação optou por usar o fator de emissão da compostagem igual a zero.

4.3. Potencial de Geração Energética

Pode-se notar, ao analisar os estudos de aproveitamento energético citados na revisão bibliográfica, que para todos os tipos de gerenciamento de resíduos abordados nesse estudo a análise de potencial energético se dá em apenas duas frentes: a captura e recuperação energética do biogás gerado em aterro e biodigestão e a combustão do RSU em incineradores. Não se encontrou nenhuma forma de recuperação energética por compostagem.

Aproveitamento Energético de Biogás

Segundo o software BIOGÁS da CETESB a Equação (8) apresenta a energia disponível para sistemas de recuperação energética de biogás (CETESB, 2006).

$$E_{disponível} = \frac{Q_x \cdot P_{c(\text{metano})} \cdot E_c \cdot 8760}{31.536.000 \cdot 1000} \quad (8)$$

onde:

$E_{disponível}$	Energia disponível	[kWh]
Q_x	Vazão de metano a cada ano	$[m^3CH_4.ano^{-1}]$
$P_{c(\text{metano})}$	Poder calorífico do metano	$[J.m^3CH_4^{-1}]$
E_c	Eficiência na coleta de gases	[%]
8760	Horas no ano	[horas.ano ⁻¹]
31.536.000	Segundos no ano	[s.ano ⁻¹]
1000	Conversão entre Wh e kWh	[adimensional]

Para este cálculo vê-se a necessidade de se obter o poder calorífico do metano que, como já observado na revisão bibliográfica, deve ser o poder calorífico inferior.

A partir dos dados do departamento de energia dos Estados Unidos (WALSH *et. al.* 1988), é possível determinar o comportamento do PCI em função da proporção de metano no biogás como apresentado na Figura 4.

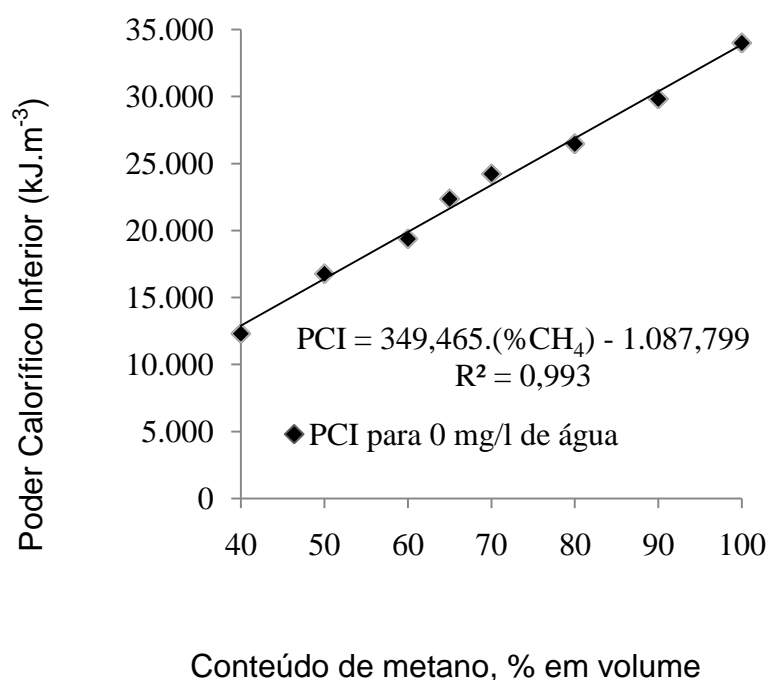


Figura 4 - PCI em função do conteúdo de metano no biogás

Fonte: Adaptado de (WALSH et. al. 1988)

Logo se obteve a Equação (9), que apresenta a variação do poder calorífico inferior do Biogás em função do conteúdo de metano.

$$\text{PCI} = 349,465 \cdot (\% \text{CH}_4) - 1.087,799 \quad (9)$$

onde:

PCI	Poder Calorífico Inferior do Biogás	$[\text{kJ.m}^{-3}]$
$\% \text{CH}_4$	Porcentagem de CH_4 no Biogás	$[\%]$

Ao se utilizar a Equação (9) é possível obter a estimativa do poder calorífico inferior que permite obter o potencial de geração energética para aterros e biodigestores. Como já apresentado anteriormente, o método do IPCC utilizado para estimar a geração de metano por aterros e biodigestores já considera a fração de metano no biogás como 50%, apresentando o dado de produção total de metano (e não biogás) a cada ano, desta forma pode-se considerar para este trabalho de graduação o poder calorífico inferior para 100% de metano de $33.858,701 \text{ kJ.m}^{-3}$ apresentado na Figura 4.

Para este estudo considerou-se que a eficiência de coleta de biogás foi de 100%. Este valor foi escolhido, pois como será apresentado na seção "5.2 - Dados

de Potencial de Emissão de Gases do Efeito Estufa” o método de estimativa de recuperação de biogás em aterros já considera a eficiência de coleta, resultando na vazão total de biogás que será enviada para os conjuntos de geração energética.

Para este trabalho de graduação considerou-se que o potencial de geração de energia é proveniente do biogás total gerado sem considerar nenhum tipo de recuperação, pois mesmo queimando em *flares* existe o potencial de utilizar esse biogás para propósitos energéticos.

Combustão de Resíduos Sólidos Urbanos

As conclusões do estudo de KATHIRAVALE (2003) sugerem que a Equação (10) foi a que apresentou melhores resultados para as amostras utilizadas em seu trabalho.

$$PCS = 112,157.AI + 183,386.Pa + 288,737.Pl + 5064,701 \quad (10)$$

onde:

PCS	Poder calorífico superior	[kJ.kg ⁻¹]
AI	Alimentos e lixo de jardim	[% de massa]
Pa	Papel	[% de massa]
PI	Plástico	[% de massa]

Desta forma a simples aplicação dos valores obtidos na análise gravimétrica de uma amostra de resíduo na equação fornecida por KATHIRAVALE (2003) indica qual será o potencial máximo de geração energética da combustão destes resíduos em incinerador.

Porém é necessário que para uma quantificação mais real leve-se em conta o poder calorífico inferior desta amostra, o qual depende da umidade presente no RSU. Para tanto, utilizaram-se as premissas adotadas no estudo sobre avaliação da utilização de energia proveniente do RSU em países em desenvolvimento de FOBIL (FOBIL et. al., 2005) que se seguem.

A energia líquida (E_L) pode ser obtida pela Equação (11).

$$E_L = E_{BT} - E_A \quad (11)$$

onde:

E_L	Energia Líquida	[cal]
E_{BT}	Energia Bruta Total	[cal]

E_A Energia requerida na secagem do resíduo. [cal]

A variável E_A depende da soma da energia requerida para elevar a massa de água do RSU a sua temperatura de vaporização (100°C) e da energia requerida para transformar essa massa líquida em vapor. Desta forma a Equação (12) apresenta o cálculo da energia requerida na secagem do resíduo.

$$E_A = E_S + E_L = m_{H_2O} \cdot c \cdot \Delta T + m_{H_2O} \cdot C_v \quad (12)$$

onde:

E_S	Energia Sensível	[cal]
E_L	Energia Latente	[cal]
m_{H_2O}	Massa de água no RSU	[g]
c	Calor específico da água (1,0)	[cal.(g.°C) ⁻¹]
ΔT	Variação de temperatura (100 - $T_{inicial}$)	[°C]
C_v	Calor latente de vaporização da água (540,0)	[cal.g ⁻¹]

Através da análise dimensional, verifica-se que ao dividir a Equação (11) pela massa de RSU, considerando as premissas adotadas pela Equação (12), obtém-se a conversão de PCS para PCI segundo a Equação (13).

$$PCI = PCS - \frac{(m_{H_2O} \cdot c \cdot \Delta T + m_{H_2O} \cdot C_v)}{m_{RSU_{incinerada}}} \quad (13)$$

onde:

PCI	Poder calorífico inferior	[cal.kg ⁻¹]
PCS	Poder calorífico superior	[cal.kg ⁻¹]
$m_{RSU_{incinerada}}$	Massa de RSU incinerada	[kg]

Logo, a partir dos dados estaduais de umidade de RSU, temperatura média anual e massa de RSU, pode-se obter o potencial de geração energética pela incineração aplicando o valor de PCS obtido na Equação (10) e na Equação (13), utilizando as devidas correções de unidades (1 cal = 4,184 J e 1 kWh = 3,6.10⁶ J).

Desta forma para se obter o potencial de geração energética por combustão de RSU pode-se utilizar a Equação (14).

$$E_{RSU} = PCI \cdot m_{RSU_{incinerada}} \cdot 1,163 \cdot 10^{-6} \quad (14)$$

onde:

E_{RSU}	Energia obtida pelo RSU incinerado	[kWh]
$1,163.10^{-6}$	Fator de conversão de cal para kWh	[kWh.cal ⁻¹]

4.4. Potencial de Emissão de Poluentes Atmosféricos

Ao observar os poluentes citados nos índices de qualidade do ar da CETESB e CONAMA, neste trabalho foram considerados alguns para um estudo mais aprofundado. Os poluentes escolhidos para a quantificação nos diferentes tipos de gerenciamento de resíduos foram: CO, NO_x, MP, SO₂ e outros poluentes. Na categoria “outros poluentes” se enquadram todos os compostos orgânicos não metânicos (NMOC’s) listados pela EPA (2008) que são gerados de forma não controlada em aterros, apresentados no ANEXO 1. Enquadram-se ainda as dioxinas e furanos que são gerados de forma controlada em aterros por uso de *flares* para queima de biogás. Pela lista da EPA (1996), são ainda considerados os metais pesados e compostos orgânicos totais emitidos pela incineração de RSU apresentados no ANEXO 2.

Segundo a Compilação de Fatores de Emissão de Poluentes Atmosféricos (EPA, 2008), dentre as atividades analisadas neste Trabalho de Graduação, podem ser consideradas como fonte de poluentes atmosféricos a incineração, aterros sanitários e a queima de biogás. Desta forma as emissões de poluentes por RSU foram divididas em três categorias principais:

- Emissões Controladas de Poluentes: Provenientes da queima de biogás coletado em aterros e biodigestores.
- Emissões não Controladas de Poluentes: Provenientes do aterramento de RSU.
- Emissões de Poluentes por Combustão de RSU: Provenientes da queima de RSU em incineradores.

Emissões Controladas de Poluentes e Emissões de Poluentes por Combustão de RSU

Para a quantificação de potencial de emissão de poluentes utilizou-se a Compilação de Fatores de Emissão de Poluentes Atmosféricos (EPA, 2008). Esta publicação faz uso do método de fator de emissão definido como um elemento representativo que relata a quantidade de poluentes lançados para a atmosfera de uma atividade associada às emissões de efluentes gasosos. Estes geralmente são

expressos na forma da relação entre a massa de poluente por unidade de massa, volume, distância ou duração da atividade emissora de poluentes, no caso deste trabalho de graduação massa de RSU.

A Equação (15) apresenta como deve ser realizada essa estimativa.

$$E = A \cdot EF \cdot \left(\frac{100 - ER}{100} \right) \quad (15)$$

onde:

E	Emissões de poluentes atmosféricos	[kg _{poluente}]
A	Taxa da Atividade	[kg _{RSUincinerado}]
EF	Fator de Emissão	[kg _{poluente} ·kg _{RSUincinerado} ⁻¹]
ER	Eficiência Global da Redução das Emissões	[adimensional]

Para o cálculo do potencial de emissões de poluentes atmosféricos deve-se considerar o caso onde não é tomada nenhuma medida de controle ou no caso hipotético de todo o sistema de controle falhar, ou seja, ER igual a zero, bem como os fatores de emissão para o caso sem nenhum controle.

Emissões Não Controladas

Segundo EPA (2008), os gases de aterro consistem em aproximadamente 50% em volume de CO₂, 50% em CH₄ e vários NMOCs como gases traço na condição de estabilidade do aterro.

Em aterros com concentrações de NMOC, CO₂ e CH₄ disponíveis, deve-se corrigir a infiltração de ar considerando que CO₂ e CH₄ são constituintes primários dos gases de aterro (100%) através da Equação (16).

$$C_{NMOC_{corrigida}} = \frac{C_{NMOC} \cdot 10^6}{C_{CO_2} + C_{CH_4}} \quad (16)$$

onde:

$C_{NMOC_{corrigida}}$	Concentração de NMOC corrigida pela infiltração de ar	[ppmv]
C_{NMOC}	Concentração de NMOC total no gás de aterro	[ppmv]
C_{CO_2}	Concentração de CO ₂ no gás de aterro	[ppmv]
C_{CH_4}	Concentração de CH ₄ no gás de aterro	[ppmv]
10^6	Correção do NMOC em unidades de ppmv	

Os dados de C_{CO_2} e C_{CH_4} podem ser usualmente encontrados em relatórios de testes de alguns aterros.

Para estimar a emissão total de NMOCs pode-se utilizar a Equação (17).

$$Q_{NMOC} = \frac{2 \cdot Q_{CH_4} \cdot C_{NMOC}}{10^6} \quad (17)$$

onde:

Q_{NMOC}	Taxa de emissão de NMOC	$[m^3 \cdot ano^{-1}]$
Q_{CH_4}	Taxa de geração de metano	$[m^3 \cdot ano^{-1}]$
C_{NMOC}	Concentração do NMOC total no gás de aterro	[ppmv]
2	Fator de multiplicação (assume 50% de CH_4 no biogás)	[adimensional]

De forma a estimar a emissão individual de cada NMOC, deve-se utilizar a equação com a concentração de apenas um composto e calcular a emissão em massa através da Equação (18).

$$I_{NMOC} = Q_{NMOC} \cdot \frac{Massa\ Molecular_{NMOC}}{(8,205 \cdot 10^{-5}) \cdot (1000) \cdot (273 + T)} \quad (18)$$

onde:

I_{NMOC}	Emissão em massa de cada NMOC	$[kg \cdot ano^{-1}]$
$MassaMolecular_{NMOC}$	Massa molecular do NMOC	$[g \cdot mol^{-1}]$
$8,205 \cdot 10^{-5}$	Constante de conversão	$[m^3 \cdot atm \cdot (mol \cdot K)^{-1}]$
1000	Constante de conversão de massa	[g]
273	Constante de conversão de temperatura	[K]
T	Temperatura do gás de aterro.	$[^{\circ}C]$

A metodologia apresentada assume a pressão de 1 atm e quando a temperatura do gás de aterro não é conhecida o método recomenda utilizar 25°C.

4.5. Potencial de Geração de Efluentes Líquidos

Aterros Sanitários e Compostagem

Analisando o estudo comparativo entre os métodos de quantificação de efluentes por deposição de RSU feito por BARROS (2004) e considerando os propósitos deste trabalho de graduação, utilizou-se o método suíço para a quantificação de potencial de geração de efluentes líquidos.

No método suíço, é estimada certa porcentagem da precipitação que infiltra nos resíduos atingindo a camada de impermeabilização e que deve ser drenada (LIMA apud BARROS, 2004). A Equação (19) e a Tabela 7 apresentam, respectivamente, os cálculos da vazão média de percolado e a proporção de

precipitação convertida em percolado de acordo com o peso específico dos resíduos.

$$Q = \frac{P \cdot A \cdot K}{t} \quad (19)$$

onde:

Q	Vazão Média	[l.s ⁻¹]
P	Precipitação Média Anual	[mm]
A	Área de cobertura	[m ²]
K	Proporção da Precipitação que é Convertida em Percolado	Tabela 7
t	Número de Segundos em um Ano	[s]

Tabela 7 - Proporção da precipitação que é convertida em percolado

Peso Específico dos Resíduos [kN.m ⁻³]	K
4 a 7	0,5 a 0,25
Acima de 7	0,25 a 0,15

Fonte: LIMA apud BARROS, 2004.

Em comparação com outros métodos mais precisos, como por exemplo, o HELP-MODEL, o método suíço apesar de menos preciso, requer dados mais abrangentes, se encaixando bem ao escopo deste estudo que visa estimar uma produção estadual de efluentes líquidos.

Biodigestão

Para esta alternativa utilizou-se a metodologia de fator de geração de efluentes líquidos pelo RSU dada pela Equação (20).

$$V = Massa_{RSU} \cdot FGE_{Biodigestor} \quad (20)$$

onde:

V	Volume de efluente líquido gerado	[m ³]
Massa _{RSU}	Massa de RSU enviada para a biodigestão	[t _{RSU}]
FGE _{Biodigestor}	Fator de geração de efluentes líquidos do biodigestor	[m ³ .t _{RSU} ⁻¹]

Incineração

Não foram encontrados durante a realização deste trabalho de graduação registros ou metodologias de geração de efluentes líquidos pela alternativa de incineração.

4.6. Potencial de Ocupação de Área

Aterros sanitários

Existem diversos formatos de aterros, cada um com suas características e complexidades. Neste estudo utilizou-se a forma retangular, pelo fato de não existir uma forma predominante nos grandes aterros sanitários. A forma retangular, porém, reflete razoavelmente a realidade do Estado de São Paulo, 281 de seus 645 municípios (43,6%) apresentam a permissão ambiental de operar aterros em valas, conforme observado no Decreto Estadual 44.760/00 (São Paulo, 2000) e no Decreto Estadual 45.001/00 (São Paulo, 2000), sendo que este tipo de aterro é dimensionado segundo a forma retangular.

Foram consideradas apenas as áreas de efetiva disposição do resíduo, sem se considerar os anexos como, por exemplo, balança, portaria, centro de triagem, entre outras por serem áreas desprezíveis frente à extensão total do aterro.

Considerou-se também que toda a cinza gerada pelo processo de incineração será descartada invariavelmente em aterros, bem como toda a fração não degradada presente no resíduo destinado a compostagem e biodigestão.

A área ocupada pelo aterro pode ser obtida conforme a Equação (21).

$$A = \frac{m}{\rho \cdot h} \quad (21)$$

onde:

A	Área Ocupada	[m ²]
ρ	Densidade do RSU	[t.m ⁻³]
m	Massa	[t]
h	Altura da célula de RSU	[m]

A alternativa de disposição em aterros sanitários apresenta um diferencial, onde praticamente todo o RSU depositado nos anos anteriores permanecerá no sítio de disposição. Desta forma, a área total utilizada para a disposição de RSU em determinado ano será a soma da área ocupada pelo RSU gerado neste ano com a área ocupada pelo RSU gerado no ano anterior, de forma que o cálculo da ocupação de área deverá ser feito como apresentado na Equação (22).

$$A_{total_{ano(i)}} = \sum_{i=0}^n A_{ano(i)} \quad (22)$$

onde:

$A_{total_{ano(i)}}$	Área total ocupada pela disposição de RSU em aterros no ano i	[m ²]
$A_{ano(i)}$	Área ocupada apenas pelo RSU gerado no ano i	[m ²]
i	Ano da estimativa	[ano]
n	Ano em que se interrompeu a disposição no aterro	[ano]

Incinerador

Para a criação de um cenário de ocupação de área que varie com a massa de resíduo a cada ano foram coletados dados de diferentes plantas de incineração, cada qual com sua respectiva tecnologia. Os dados foram obtidos por contatos feitos com as empresas de incineração de resíduos sólidos Essencis, Lufttech e Usina Verde, esta última com planta instalada na cidade do Rio de Janeiro.

Assim, foi estabelecida a Equação (23) que, dada a necessidade de massa de resíduo a ser incinerado, retorne o valor de área ocupada por uma planta de incineração deste porte. A compilação dos dados obtidos está apresentada em “Resultados” na seção “5.6 - Dados de Potencial de Ocupação de Área” na Figura 14.

$$A = 109,1951 \cdot Massa_{RSU_{incinerada}} + 2.684,3892 \quad (23)$$

onde:

A	Área ocupada pela planta de incineração	[m ²]
$Massa_{RSU_{incinerada}}$	Massa de RSU enviada para incineração	[t]

O tempo de retenção considerado é de 1 dia, ou seja, todo o RSU recebido pela planta de incineração será incinerado dentro de um período de 24 horas.

Compostagem

Utilizou-se a abordagem de considerar um tempo de retenção de 6 meses de processamento biológico, isto significa que após este período o composto orgânico será integralmente retirado da área de compostagem (para aproveitamento agrícola, adubação de parques no município, entre outros).

Ainda deve-se considerar um fator de multiplicação de dois, pois a área final deverá comportar a leira de compostagem e um espaço ao lado que possibilite o reviramento desta, de área igual a da leira.

Com base nestas abordagens obteve-se a ocupação de área de uma leira de compostagem pela Equação (24).

$$A = \frac{4 \cdot m}{\rho \cdot h} \quad (24)$$

onde:

A	Área ocupada da leira de compostagem	[m ²]
m	Massa do resíduo enviado para a compostagem	[t]
ρ	Densidade do resíduo sólido compostado	[t.m ⁻³]
h	Altura da leira de compostagem	[m]

Biodigestão

Utilizou-se a abordagem de considerar que passado 6 meses de processamento biológico o produto obtido pela biodigestão será integralmente retirado da área de biodigestão (para aproveitamento agrícola, adubação de parques no município, entre outros).

A Equação (25) foi utilizada para a obtenção da função que varia área por massa de RSU biodigerido.

$$A_{biodigestão} = 4,345 \cdot \frac{Massa_{RSU}}{\rho} + 34,43 \quad (25)$$

onde:

$A_{biodigestão}$	Área ocupada pelo biodigestor	[m ²]
$Massa_{RSU}$	Massa de RSU enviada para biodigestão	[t]
ρ	Densidade do RSU	[t.m ⁻³]

Esta equação foi obtida utilizando dados do Instituto WINROCK (OLIVER, 2008) para as relações entre volume e área superficial de um biodigestor, apresentadas na Tabela 19 da em “Resultados” na seção “5.6 - Dados de Potencial de Ocupação de Área”.

4.7. Cenários

O cálculo do cenário se deu de forma tendencial, que como apresentado por SAUER (2010) são projeções de mesmos contextos e políticas do passado.

O modelo criado para cenários é dinâmico, representando a variação dos dados de entrada utilizados em função do tempo. A estimativa utilizada para cada parâmetro analisado foi estabelecida como função dependente da proporção da massa de resíduo sólido enviada para cada tipo de tecnologia, como apresentando na Equação (26).

$$Estimativa_{i,t} = f(\%massa_{Ate_t}, \%massa_{Inc_t}, \%massa_{Com_t}, \%massa_{Bio_t}) \quad (26)$$

onde:

Estimativa _i	Estimativa gerada pelo cenário apresentado por i	
i	Potencial de geração de GEE	[tCO _{2eq}]
	Potencial de geração de poluição atmosférica	[kgPoluentes]
	Potencial de contaminação do solo e água	[m ³ Chorume]
	Potencial de aproveitamento energético	[kWh]
	Potencial de ocupação de área	[m ²]
%massa _{Ate}	Porcentagem de massa enviada a aterros a partir de 2010	[%]
%massa _{Inc}	Porcentagem de massa enviada a incineradores a partir de 2010	[%]
%massa _{Com}	Porcentagem de massa enviada a compostagens a partir de 2010	[%]
%massa _{Bio}	Porcentagem de massa enviada a biodigestores a partir de 2010	[%]
t	Ano	[ano]

Para tanto, elaborou-se um software sob forma de planilhas para que fossem possíveis os cálculos pretendidos de forma a se obter uma representação gráfica da variação temporal de cada cenário bem como suas respectivas quantificações de valores absolutos. Uma das telas do software pode ser vista na Figura 5.

Dados de Entrada									
Varável	Unidade ou Observação	DADO	Há dado em 1990?	Valor em 1990	Há dado em 2010?	Valor em 2010	Há dado em 2030?	Valor em 2030	Interpolação
População	População Urbana	(hab)		Sim 28.653.346	Sim 40.954.950	Sim 53.679.148			Linear
	Taxa Geração de RSU	(kg.hab/dia)		Sim 0,547	Sim 1,059	Sim 2,284			Linear
	Até 2010 o resíduo era enviado para	Tipo	Aterro						
Composição do RSU	Fração de papéis e têxteis	(%) em massa	Sim	21,78%	Sim 14,14%	Sim 6,51%			Linear
	Fração de resíduos de jardinagem	(%) em massa	Sim	1,77%	Sim 2,25%	Sim 2,72%			Linear
	Fração de resíduos alimentares	(%) em massa	Sim	52,33%	Sim 59,24%	Sim 66,15%			Linear
	Fração de madeira e palha	(%) em massa	Sim	0,58%	Sim 0,78%	Sim 0,98%			Linear
	Fração de origem fóssil (plástico)	(%) em massa	Sim	9,60%	Sim 15,16%	Sim 20,72%			Linear
	Umidade	(%) em massa	Sim	60,00%	Sim 60,00%	Sim 60,00%			Linear
Meio	Massa específica	[t/m ³]		0,75					
	Temperatura Média Anual	[°C]		25					
	Precipitação Média Anual	(mm)		1500					
Rec. de Gás	Potencial de Evapotranspiração	(mm)		1000					
	Metano Recuperado em Aterro	(%) do total produzido	Sim	0%	Sim 47,6%	Sim 0%			
	Metano Recuperado em Compostagem	(%) do total produzido	Sim	0%	Sim 0%	Sim 0%			
	Metano Recuperado em Biodigestão	(%) do total produzido	Sim	0%	Sim 0%	Sim 0%			
A partir de 2010, % da Massa do RSU que foi enviada para	Aterro		100%						
	Incinerador		0%						
	Compostagem		0%						
	Biodigestão		0%						
	Total no período								
				GEE	469.448.959	[tCO _{2eq}]			
				Energia	1.954.479	[kWh]			
				Poluentes Totais	445.356.957	[kg/ano]			
				Efluentes	1.040.328.491	[m ³]			
				Área	3.128.506.296	[m ²]			

Figura 5 - Tela do software criado para programação dos cenários

Para se obter dados que representem o futuro com o máximo de aproximação possível, considerou-se que algumas variáveis seguem tendências e que se mantêm no futuro de forma inercial. Desta forma, é necessário definir conceitos de crescimento linear e exponencial, pois estes podem ser utilizados para interpolar

dados inexistentes entre dois períodos amostrados e quando extrapolados podem representar tendências futuras ou pretéritas.

O crescimento aritmético, também conhecido como crescimento linear, pode ser obtido pela Equação (27).

$$X_{(t)} = X_{(t_0)} + \left(X_{(t_{final})} - X_{(t_0)} \right) \cdot \left(\frac{t - t_0}{t_{final} - t_0} \right) \quad (27)$$

onde:

$X_{(t)}$	Variável Estimada no ano t
$X_{(t_0)}$	Valor da Variável em t_0
$X_{(t_{final})}$	Valor da Variável em t_{final}
t	Ano em que se pretende estimar o valor da variável
t_0	Ano inicial
t_{final}	Ano final

O crescimento geométrico, também pode ser obtido pela Equação (28) e pela Equação (29).

$$X_{(t)} = \frac{X_{(t_0)}}{(1 + i)^{t_0 - t}} \quad (28)$$

$$i = \left(\left(\frac{X_{(t_0)}}{X_{(t_{final})}} \right)^{\frac{1}{(t_0 - t_{final})}} \right) - 1 \quad (29)$$

onde:

i Taxa média geométrica de crescimento

Para este trabalho de graduação foram estudados seis diferentes cenários:

- Cenário Aterro: Considera que nenhuma mudança nas alternativas de gerenciamento, tratamento e disposição do RSU foi feita. Este cenário assume que 100% da massa de RSU continuará sendo enviada para aterro a partir de 2010, sem considerar nenhuma recuperação de biogás adicional além das verificadas para o ano de 2010.
- Cenário Aterro (Rec.): Semelhante ao Cenário Aterro, porém considerando uma recuperação de biogás de 75% a partir de 2010. Assumiu-se 75% pois como apresentado por EPA (1996) a coleta de biogás apresenta aproximadamente este patamar máximo de eficiência.

- Cenário Incineração: Considera que 100% do RSU será enviado para incineração a partir de 2010. Considerou-se a eficiência de redução de massa de 96%, como sugerido por HENRIQUES (2004), sendo que a cinza resultante deste processo será enviada para aterramento.
- Cenário Compostagem: Considera que 100% do RSU será enviado para compostagem a partir de 2010 e a fração não degradada para aterro, desta forma serão utilizados os coeficientes A, B, C e D apresentados na Equação (4) para definir a fração compostada. Isto implica que caso sejam enviada 100% da massa de RSU para a compostagem o que realmente será compostado é 100% da fração orgânica e o restante enviado para aterramento.
- Cenário Biodigestão: Considera que 100% do RSU será enviado para biodigestão a partir de 2010 e a fração não degradada para aterro. Analogamente como definido na compostagem, de todo o RSU enviado para biodigestão apenas a fração orgânica será realmente biodigerida e o restante encaminhado para aterramento.
- Cenário Biodigestão (Rec.): Semelhante ao Cenário Biodigestão, porém considerando uma recuperação de biogás de 95,79% a partir de 2010. Assume-se 95,79% pois esta é a relação entre o fator de emissão de metano dado pela KUTTNER de $47,49 \text{ gCH}_4.\text{kg}_{\text{RSU}}$ e o fator de emissão dado por IPCC (2006) de $2,00 \text{ gCH}_4.\text{kg}_{\text{RSU}}$ que já considera sistemas de captura, ou seja, considera as fugas no sistema de biodigestão.

4.8. Período Considerado

Foi considerado um período de tempo anterior a 2010 (ano do presente estudo), de forma a se obter dados que possam ser utilizados na construção dos cenários. Ainda, um período de tempo de igual proporção após 2010 também foi utilizado, de forma a poder analisar o comportamento dos cenários pela mudança de alternativas de gerenciamento em 2010.

Um fator determinante para a escolha do período é o método que calcula as emissões de metano em aterros, um dos fatores de grande importância nesse estudo devido a seu uso no método de potencial de geração de GEE, geração energética e geração de poluentes atmosféricos.

Analisando o método de decaimento de primeira ordem, utilizado neste trabalho, verifica-se que existem emissões residuais de um período anterior ao período em que se quer estimar as emissões de metano, devendo-se desta forma levantar dados anteriores a este ano.

Para determinar um período de tempo inicial para o levantamento de informações simulou-se a curva teórica dada pelo decaimento de primeira ordem considerando as variáveis climáticas do Estado de São Paulo. Constatou-se com isso que as emissões residuais dos RSU aterrados há 20 anos correspondem a 3,3% das emissões geradas no primeiro ano de aterramento, como apresentado na Figura 6.

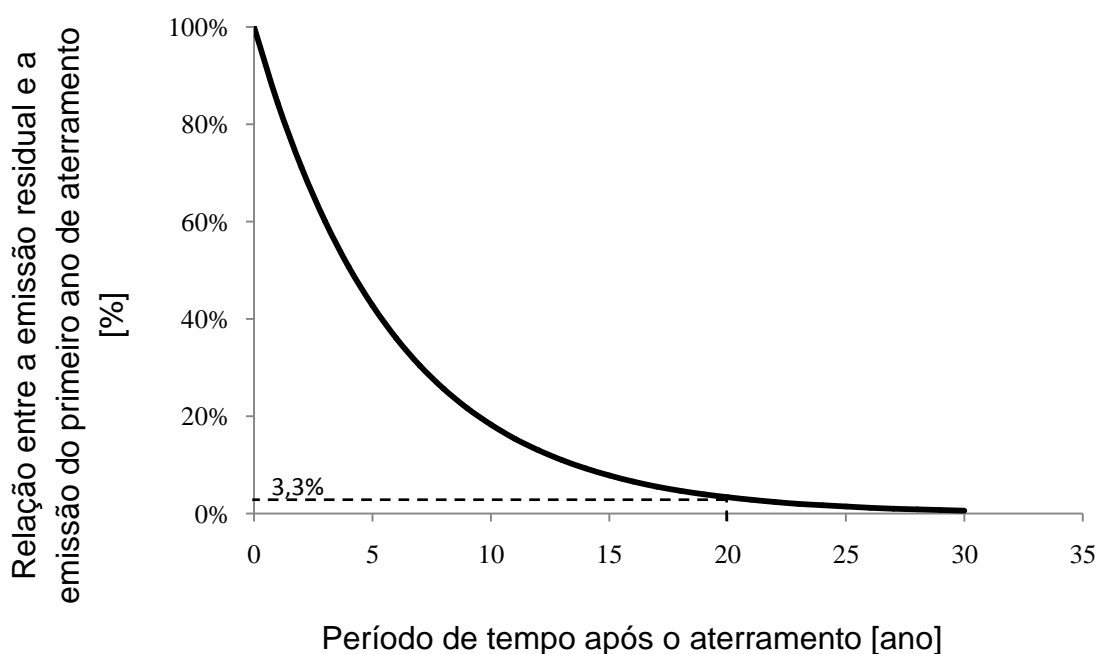


Figura 6 - Percentual entre a emissão residual e a emissão do primeiro ano de aterramento

Outro ponto importante de se analisar para determinar o ano inicial dessa estimativa é a existência de dados. O Estado de São Paulo carece de informações relativas à gestão e a composição de seus resíduos e desta forma deve-se também considerar um período em que os dados estejam disponíveis e sejam representativos.

Desta forma, optou-se por considerar como período inicial para coleta de dados o ano de 1990, pois para anos anteriores a simulação mostrou que as emissões residuais são pouco representativas frente à emissão inicial e que, a partir deste ano, foi possível coletar dados mais representativos.

Logo, para a elaboração do cenário foi utilizado um período de 40 anos, divididos em duas etapas distintas:

- Entre 1990 e 2010: Considera-se que em 1990 iniciam-se as emissões, que genericamente podem representar uma cidade, estado ou país. Nesse primeiro intervalo nenhuma medida em relação ao envio de massa de RSU para biodigestão, compostagem, incineração ou recuperação de metano produzido em aterro ou biodigestão é tomada. Este período não sofrerá alterações na ferramenta, sendo útil para visualizar a tendência prévia das emissões. Considerou-se que o Estado de São Paulo para este período enviou 100% de seus RSU para aterramento;
- Em 2010: O ano de 2010 é considerado o marco, em que ocorrerão as mudanças de alternativas de gerenciamento dos RSU, este foi escolhido por se tratar do ano em que este trabalho de graduação foi desenvolvido;
- Entre 2010 e 2030: Período no qual serão repercutidas as medidas relativas a aterramento, biodigestão, compostagem, incineração ou recuperação do metano produzido.

Ao elaborar a ferramenta de cálculo, foram utilizados três anos bases para a obtenção de dados para os cenários, foram eles 1990, 2010 e 2030.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização do estudo de caso do Estado de São Paulo foi necessário realizar levantamentos de dados para o Estado de São Paulo no que tange o gerenciamento de RSU e as características do RSU.

Desta forma a seção “5 - Resultados e Discussões” deste trabalho de graduação apresenta duas seções distintas, na primeira serão apresentados os resultados da coleta de dados, bem como as estimativas, interpolações e extrapolações, na segunda seção serão apresentados os cenários

5.1. Dados para os Cálculos dos Cenários

População Urbana - $pop_{urb(x)}$

Para o correto dimensionamento da geração de RSU de um estado nas proporções de São Paulo foram coletadas informações sobre a população urbana pelo banco de dados dos últimos Censos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1991; IBGE, 2000) e da Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílios (PNAD) (IBGE, 2007), bem como através de interpolação linear encontrando as quantidades de população urbana entre - Censos e extrapolando-as para obter uma população em 2030. Para o ano de 2030 utilizou-se o Plano Nacional de Energia - 2030 (MME, 2007) para se obter a taxa de crescimento da região Sudeste sugerida pelo Ministério de Minas e Energia e aplicá-la para o caso do Estado de São Paulo. Na Tabela 8 verificam-se os dados utilizados.

Tabela 8 - População urbana do Estado de São Paulo utilizando a base de dados do IBGE e MME

Ano	1990	2010	2030
População Urbana	28.653.346	40.954.950	50.375.723

Fonte: Adaptado de IBGE (2008), Contagem IBGE (2009) e MME (2007).

Para estimar as populações dos anos intermediários aos apresentados utilizou-se a Equação (27).

Taxa de Geração de Resíduo - $Taxa_{RSU}$

Para o cálculo da taxa de geração de resíduo utilizaram-se duas referências:

- CETESB (1992): Dados de geração de resíduo utilizados na prática diária da CETESB, apresentados na Tabela 9 e utilizado neste trabalho de graduação para descrever a $Taxa_{RSU}$ pretérita (1990-2007), onde não existem dados mais representativos. Este dado, apesar de diferente dos atuais dados de $Taxa_{RSU}$ de forma a gerar dúvidas sobre sua aplicabilidade, era amplamente utilizado e difundido na década de 90, de modo que não foi encontrado outro dado mais representativo para este período.
- ABRELPE (2007; 2008 e 2009): A partir de 2004 a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) passou a fazer coletas periódicas de dados de $Taxa_{RSU}$,

porém apenas a partir de 2007 uma amostra significativa dos municípios do Estado de São Paulo passaram a ser observados nas amostragens, esses dados a partir de 2007 por serem considerados mais representativos foram utilizados para gerar extrapolações a partir da Equação (27) que projetassem a $Taxa_{RSU}$ até o ano de 2030.

Tabela 9 - $Taxa_{RSU}(1990)$

$Pop_{urb}(1990)$ [habitantes]	$Taxa_{RSU}(1990)$ [kgRSU.(hab.dia) ⁻¹]
até 100.000	0,4
de 100.001 a 500.000	0,5
de 500.001 a 1.000.000	0,6
mais de 1.000.000	0,7

Fonte: CETESB, 1992

A partir dos dados populacionais dos municípios de São Paulo gerou-se a Figura 7 que apresenta a $Taxa_{RSU}(1990)$ de forma a não formar degraus e manter o dado mais consistente.

Retirou-se o município de São Paulo devido à grande população apresentada que não representa a realidade do restante dos municípios paulista e gera certo deslocamento na curva de tendência, para o caso deste município utilizou-se diretamente o dado de 0,7 [kg.(hab.dia)⁻¹].

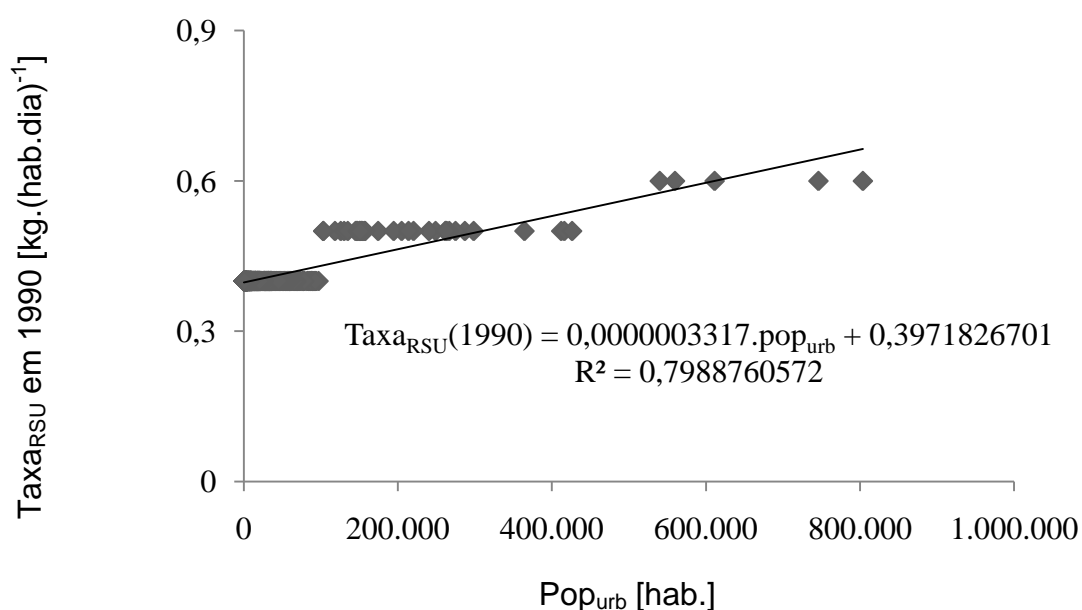


Figura 7 - Função de estimativa de geração de resíduos em 1990 para o Estado de São Paulo

Dessa forma, obteve-se a função de estimativa da TaxaRSU(1990) em função da população urbana do município para o ano de 1990, adaptando-se a tabela da CETESB para uma forma linear apresentada na Equação (30).

$$Taxa_{RSU1990} = 3,317 \cdot 10^{-7} \cdot pop_{urb1990} + 0,397 \quad (30)$$

onde:

Taxa_{RSU(1990)} Taxa de geração de RSU do ano de 1990 [kgRSU.(hab.dia)⁻¹]

A Equação aplicada a todos os municípios do Estado de São Paulo permite obter uma média ponderada de Taxa_{RSU} de cada município em 1990 com a população do município, desta forma obteve-se um dado médio estadual de Taxa_{RSU} em 1990 de 0,547 kg_{RSU}.(hab.dia)⁻¹.

A partir de 2007 utilizaram-se os dados da ABRELPE (2007; 2008 e 2009), considerados mais confiáveis que a estimativa utilizada pela CETESB, estes são considerados mais representativos, pois a ABRELPE utilizou técnicas estatísticas e coletou amostras dos municípios do Estado de São Paulo, sendo que o dado utilizado pela CETESB não apresenta estas características. A Tabela 10 apresenta dados para 78 dos 645 municípios paulistas.

Tabela 10 - População urbana em habitantes e TaxaRSU(2007), TaxaRSU(2008) e TaxaRSU(2009) em kg.(hab.dia)⁻¹ dos municípios do Estado de São Paulo

Município	ABRELPE 2007		ABRELPE 2008		ABRELPE 2009	
	Pop _{urb}	TaxaRSU	Pop _{urb}	TaxaRSU	Pop _{urb}	TaxaRSU
Americana	199.094	0,63	203.283	0,68	205.200	0,83
Araraquara	187.917	0,70	191.101	0,73		
Assis	89.639	0,56				
Atibaia	104.642	0,60			111.300	0,97
Barueri					270.200	0,88
Bastos					17.900	1,68
Bauru			352.453	0,68	356.200	0,84
Birigui	100.682	0,60				
Biritiba-Mirim					25.200	0,79
Brodowski					19.600	0,51
Cajamar			59.751	0,69		
Campinas	1.031.035	0,69	1.048.244	0,82	1.056.200	1,06
Cananéia					10.400	0,48
Capivari			37.404	0,65	37.700	0,85
Carapicuíba	379.566	0,57				
Diadema	386.779	0,68	394.266	0,72	397.700	0,89
Elias Fausto					11.400	0,44
Engenheiro Coelho			9.807	0,65	10.100	0,79
Franca			323.735	0,69	327.500	0,73
Gália					4.800	0,85
Garça			36.908	0,64	36.900	0,81
Guararema					22.000	0,82

Município	ABRELPE 2007		ABRELPE 2008		ABRELPE 2009	
	Pop _{urb}	TaxaRSU	Pop _{urb}	TaxaRSU	Pop _{urb}	TaxaRSU
Guariba					33.800	0,37
Guarulhos			1.262.841	0,88	1.282.700	1,03
Holambra					5.600	0,80
Iguape			24.525	0,64	24.700	0,65
Ilhabela					25.900	0,96
Itanhaém			85.721	0,65		
Itapira	63.002	0,69				
Jaguariúna					36.200	1,11
Jandira	103.578	0,55				
Jundiá					327.700	0,90
Lençóis Paulista			60.062	0,68	60.800	0,49
Limeira					271.900	0,81
Lins					71.900	0,76
Lorena			80.040	0,66	80.400	0,87
Louveira			29.938	0,65	30.700	0,94
Mairiporã	57.899	0,62				
Marapoama	1.779	0,53				
Marília	211.551	0,62				
Matão	72.364	0,60				
Mauá			412.753	0,70		
Miguelópolis					19.700	1,53
Moji Mirim			79.482	0,62		
Monte Castelo	2.975	0,57				
Osasco	701.012	0,84			718.600	0,94
Paulínia			81.365	0,66		
Penápolis			55.321	0,64	55.700	0,79
Pereira Barreto					23.100	0,67
Pindamonhangaba	129.341	0,58				
Piracicaba					358.800	0,86
Pontal					38.200	0,84
Porto Ferreira			49.223	0,64		
Potim					19.900	0,25
Presidente Prudente			203.646	0,72		
Promissão					31.200	0,38
Registro					44.600	0,83
Ribeirão Bonito					10.600	0,83
Ribeirão Preto	547.417	0,86			563.100	1,01
Rio Claro			186.123	0,69		
Santa Bárbara d'Oeste	183.593	0,65	187.169	0,65		
Santo Anastácio					19.700	0,76
Santo André	667.891	0,85	671.696	0,88	673.400	1,22
Santópolis do Aguapeí	3.801	0,61				
Santos					417.100	1,24
São Bernardo do Campo	774.590	0,70			803.900	1,01
São José do Rio Preto	382.283	0,74			398.300	0,90
São José dos Campos	592.894	0,66	607.126	0,77	613.700	0,84
São Paulo					10.472.900	1,34
São Vicente	323.599	0,61				
Sorocaba	556.419	0,64	573.490	0,75	581.500	0,91
Sumaré			235.854	0,66	239.800	0,72
Tanabi					19.800	0,51
Taubaté					259.700	0,77
Tremembé			35.131	0,64		
Valparaíso					19.700	0,76
Vargem Grande do Sul					36.700	0,75
Várzea Paulista	100.406	0,53	105.954	0,66		

Fonte: ABRELPE (2007), ABRELPE (2008) e ABRELPE (2009).

Como os estudos da ABRELPE (2007), ABRELPE (2008) e ABRELPE (2009), não atingiram todos os municípios do Estado de São Paulo utilizaram-se os dados da Tabela 10 para elaborar as equações apresentadas abaixo de forma a aplicar o dado da $Taxa_{RSU}$ para todos os municípios do Estado e a partir daí obter um valor médio estadual.

$$Taxa_{RSU_{2007}} = 2,16 \cdot 10^{-7} \cdot pop_{urb_{2007}} + 0,584 \quad (31)$$

onde:

$Taxa_{RSU_{2007}}$ Taxa de geração de RSU por habitante no [kgRSU.(hab.dia)⁻¹] estado de São Paulo em 2007

$$Taxa_{RSU_{2008}} = 1,99 \cdot 10^{-7} \cdot pop_{urb_{2008}} + 0,642 \quad (32)$$

onde:

$Taxa_{RSU_{2008}}$ Taxa de geração de RSU por habitante no [kgRSU.(hab.dia)⁻¹] estado de São Paulo em 2008

$$Taxa_{RSU_{2009}} = 2,94 \cdot 10^{-7} \cdot pop_{urb_{2009}} + 0,768 \quad (33)$$

onde:

$Taxa_{RSU_{2009}}$ Taxa de geração de RSU por habitante no [kgRSU.(hab.dia)⁻¹] estado de São Paulo em 2009

Aplicando os dados aos municípios do Estado é possível obter uma média estadual de $Taxa_{RSU}$ em 2007, 2008 e 2009 ponderada com a população, com estes dados médios em mãos e utilizando a Equação (27) de interpolação linear é possível extrapolar essa $Taxa_{RSU}$ para os anos de 2010 e 2030 estudados nesse trabalho de graduação.

Desta forma, foi possível calcular através de uma média ponderada da $Taxa_{RSU}$ com a população urbana, a $Taxa_{RSU}$ média do Estado de São Paulo para os anos de 2010 e 2030.

Resumidamente utilizou-se a Equação (30) para a obtenção do dado de $Taxa_{RSU}(1990)$ e a Equação (31), (32) e (33) e para obter dados médios estaduais e a partir destes projetar um crescimento linear para a obtenção da $Taxa_{RSU}(2010)$ e $Taxa_{RSU}(2030)$.

Desta forma, obteve-se uma média considerando todos os municípios do Estado de São Paulo para a $Taxa_{RSU}(1990)$ de 0,547, $Taxa_{RSU}(2010)$ de 0,919 e $Taxa_{RSU}(2030)$ de 1,300 $[kg.(hab.dia)^{-1}]$.

A diferença entre o dado de $Taxa_{RSU}$ escolhido para a projeção dos cenários e o dado apresentado na Tabela 1 se deve ao fato deste trabalho considerar uma $Taxa_{RSU}$ média para todos os municípios do Estado de São Paulo e não apenas para os municípios cujas informações foram levantados para o estudo da ABRELPE (2009).

5.2. Dados de Potencial de Emissão de Gases do Efeito Estufa

Todos os dados relativos ao potencial de emissão de GEE para o Estado de São Paulo encontram-se compilados na Tabela 11, todos estes dados são necessários para contabilizar as emissões de GEE e foram apresentados anteriormente nas Equações (3), (4), (5), (6) e (7). Dados que variam com o tempo estão apresentados na tabela com o sinal (^a) e serão explicados mais detalhadamente logo abaixo.

Tabela 11 - Dados compilados do Estado de São Paulo das variáveis relativas ao potencial de emissão de GEE

Dados Compilados do Estado de São Paulo				
Variável	Descrição	Dado	Unidade	Fonte
k	Constante de decaimento	0,17	$[Ano^{-1}]$	^c
F	Fração de Metano no Biogás	50	$[\%]$	^b
MCF	Fator de correção do metano	^a	[Adimensional]	^c
DOC	Carbono Orgânico Degradável	^a	$[gC.gRSU^{-1}]$	^c
R	Metano Recuperado em Aterros	^a	$[GgCH_4]$	^c
OX	Metano Oxidado	^a	[Adimensional]	^c
CCW.FCF	Fração Fóssil no RSU	^a	[Adimensional]	^c
EF	Eficiência de Queima de RSU	95	$[\%]$	^b
EF_{N_2O}	Fator de emissão incineração	60	$[kgN_2O.Gg_{resíduo}^{-1}]$	^b
EF_i	Fator de emissão compostagem	0	$[gCH_4.(kg_{RSU})^{-1}]$	^d
EF_i	Fator de emissão biodigestão	47,49	$[gCH_4.(kg_{RSU})^{-1}]$	^d

^a Discussão do levantamento de dados realizada abaixo.

^b IPCC (2000).

^c Inventário de GEE do Estado de São Paulo (CETESB, 2010).

^d IPCC (2006).

Fator de correção do metano referente ao gerenciamento dos locais de disposição - MCF

O fator de correção de metano (MCF) está associado à operação do aterro. O Guia de Boas Práticas do IPCC de 2000 sugere os seguintes dados que podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados *default* do IPCC (2000) de MCF

Características do local de disposição de RSU	MCF
Aterro sanitário	1,0
Local não gerenciado com profundidade igual ou superior a 5m	0,8
Local não gerenciado com menos de 5m de profundidade	0,4
Depósito de lixo não classificado	0,6

Fonte: IPCC (2000)

Como o órgão ambiental do Estado de São Paulo promove uma coleta periódica de dados referentes à qualidade de operação de sítios de disposição de RSU e compila estas informações num índice denominado “Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos” (IQR). Os dados de IQR devidamente convertidos para MCF e aplicados a todos os municípios permitem a obtenção de um o MCF médio do Estado de São Paulo. O MCF médio foi obtido por média simples dos MCF de todos os municípios do Estado. Para correlacionar os dados de IQR com MCF utilizou-se a Tabela 13.

Tabela 13 - Correlação entre IQR e MCF

IQR	MCF
Inexistente	0,6
0,0 a 6,0	0,4
6,1 a 8,0	0,8
8,1 a 10,0	1,0

Os dados de MCF foram coletados do Inventário Estadual de GEE do Estado de São Paulo (CETESB, 2010) e estão apresentados na Figura 8 bem como a função utilizada para extrapolar esse dado até o ano de 2030.

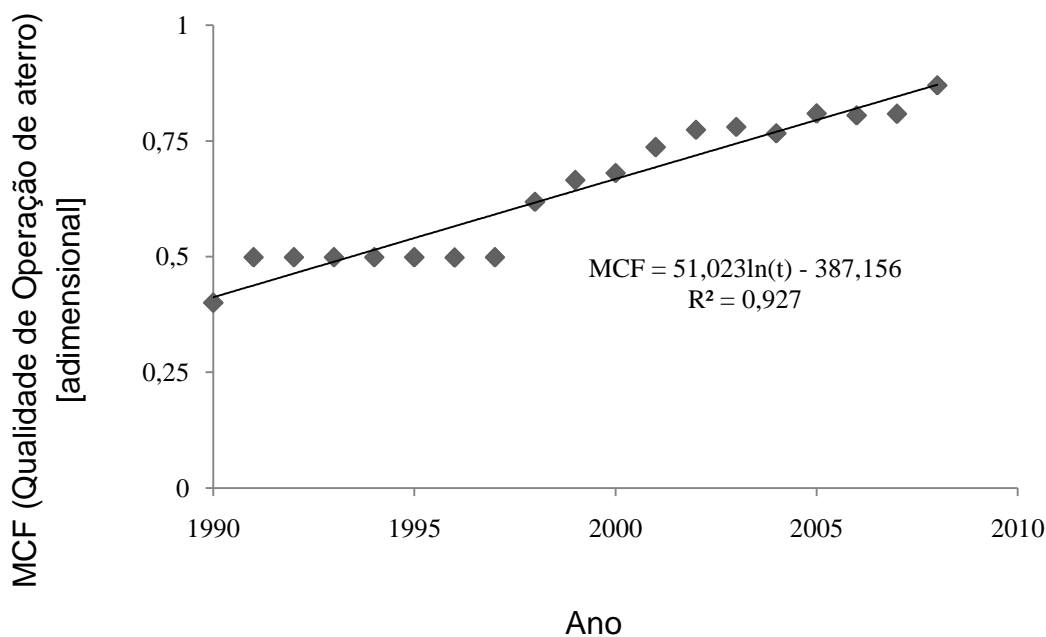


Figura 8 - MCF médio no Estado de São Paulo

O uso da regressão logarítmica apresentada na Equação (34) permite obter um dado de MCF para todos os anos até 2030. Esta regressão foi escolhida, pois o uso de uma função linear geraria em 2030 um valor superior a 1, que é o máximo MCF permitido.

$$MCF = 51,023 \cdot \ln(t) - 387,156 \quad (34)$$

onde:

MCF	Qualidade de operação do aterro.	[adimensional]
t	Tempo	[ano]

Carbono Orgânico Degradável - DOC

Para carbono orgânico degradável dado pela Equação (4) também foi realizado um levantamento de dados, suas variáveis são:

- Fração do resíduo correspondente a papéis e têxteis (A);
- Fração do resíduo proveniente de jardins, parques e outros putrescíveis não alimentares (B);
- Fração do resíduo correspondente a resíduos alimentares (C); e
- Fração do resíduo correspondente a madeira e palha (D).

Para tanto, utilizou-se um estudo interno da CETESB em que uma série de estudos sobre a composição de resíduos sólidos do Estado de São Paulo foram catalogados. Com base nesse estudo, foram obtidos os dados apresentados na Figura 9 para o RSU do Estado de São Paulo, bem como as regressões para a projeção futura destes nos cenários criados.

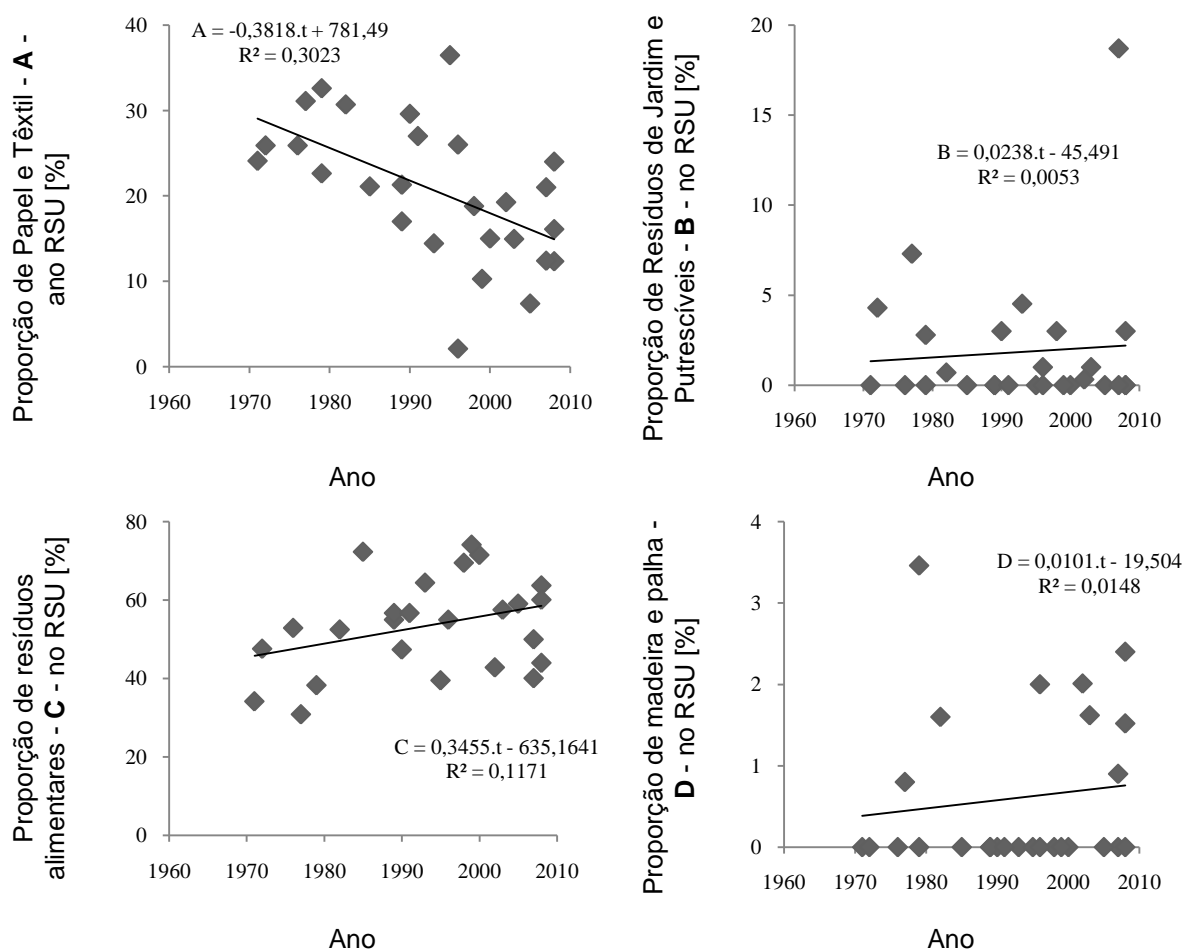


Figura 9 - Dados da evolução da composição dos RSU do Estado de São Paulo, conforme as proporções de (A) papel e têxtil, (B) jardim e putrescíveis, (C) alimentares e (D) madeira e palha. Fonte: OLIVEIRA (2009).

A partir da Figura 9 pode-se obter a Tabela 14 que apresenta os valores de cada composição para os anos de 1990, 2010 e 2030, utilizados para a elaboração dos cenários.

Tabela 14 - Proporção dos constituintes do Carbono Orgânico Degradável (DOC) no RSU do Estado de São Paulo

Ano	Proporção no RSU [%]			
	Papel e têxtil	Jardim e putrescíveis	Alimentares	Madeira e palha
1990	21,78	1,77	52,33	0,58

2010	14,14	2,25	59,24	0,78
2030	6,51	2,72	66,15	0,98

Recuperação de Metano - R

Para o caso do metano recuperado utilizou-se dados da CETESB (2010) e adaptou-os de forma a gerar uma regressão que expresse seu comportamento. Para este caso, será necessário apenas introduzir dados de 1990 e 2010, pois o dado de 2030 será considerado para geração de cenários e constará nos resultados.

A Figura 10 apresenta os valores de CH₄ totais, recuperados e a proporção entre eles no Estado de São Paulo, a CETESB (2010) apresenta dados de 2003 até 2008, sendo necessária a criação de uma regressão para estimar o valor da porcentagem recuperada em 2010.

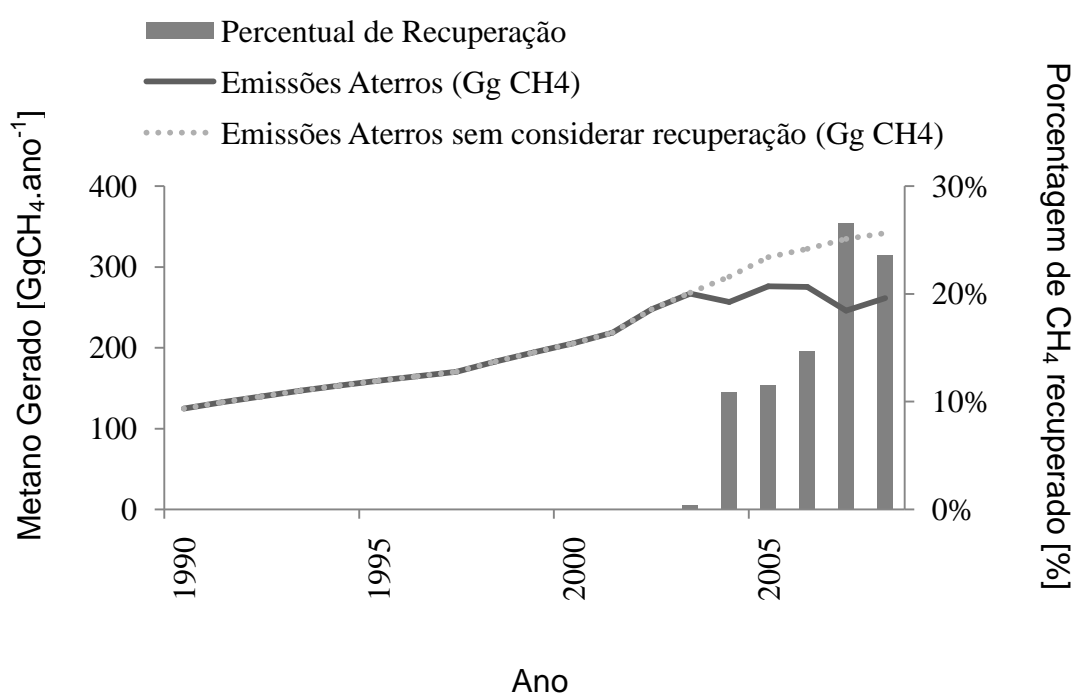


Figura 10 - Porcentagem de metano recuperado em aterros no Estado de São Paulo

Os dados que permitiram a elaboração da figura acima foram obtidos da Tabela 15.

Tabela 15 - Dados de Metano Recuperado no Estado de São Paulo

Ano	Emissões de CH ₄ em Aterros sem considerar recuperação de biogás [GgCH ₄]	Metano Recuperado (R) [GgCH ₄]	Percentual de Recuperação [%]
2010	14,14	2,25	0,78
2030	6,51	2,72	0,98

1990	124,66	0,00	0,00
1991	132,53	0,00	0,00
1992	139,81	0,00	0,00
1993	146,61	0,00	0,00
1994	152,99	0,00	0,00
1995	159,02	0,00	0,00
1996	164,78	0,00	0,00
1997	170,29	0,00	0,00
1998	182,98	0,00	0,00
1999	194,20	0,00	0,00
2000	205,56	0,00	0,00
2001	218,56	0,00	0,00
2002	247,28	0,00	0,00
2003	267,86	1,05	0,39
2004	287,77	31,41	10,91
2005	311,79	35,87	11,50
2006	322,37	47,46	14,72
2007	334,37	88,73	26,54
2008	341,81	80,51	23,55
2009 ^a	363,01	105,59	29,09
2010 ^a	377,87	122,19	32,34

^a Valores projetados linearmente.

Fonte: Adaptado de CETESB (2010).

Logo, em 1990 considerou-se zero a porcentagem de CH₄ recuperado no Estado, enquanto a porcentagem estimada que será recuperada em 2010 é de 32,34%.

Segundo EPA (1996) considera-se que existe um máximo de coleta do total de metano produzido no aterro que varia entre 70 a 85% do total de metano gerado, portanto ao gerar o cenário é necessário considerar esta limitação da tecnologia, desta forma optou-se por considerar para o cenário de recuperação de metano em aterro o máximo de 75% de recuperação.

Fator de Oxidação - OX

Ainda com relação à Equação (3), o termo OX reflete a quantidade de metano dos aterros que é oxidada no solo ou em outro material utilizado na cobertura do aterro. O IPCC recomenda atribuir OX igual a 0 quando a população urbana é inferior a 1.000.000 habitantes e 0,1 quando superiores a 1.000.000 habitantes (IPCC, 2000).

Para a obtenção fator de oxidação utilizou-se uma adaptação dos dados obtidos pela CETESB (2010) em seu inventário de GEE. Utilizou-se uma média ponderada de OX por população sobre a base de dados da CETESB, para obter-se um valor médio para o Estado de São Paulo. O valor médio obtido para o Estado de São Paulo é 0,032649 ou seja, para cada 100 moléculas de metano produzidas por aterramento no Estado de São Paulo aproximadamente 3 são oxidadas.

Fração de Carbono Fóssil no RSU - CCW.FCF

Para o caso da geração de GEE por incineração, anteriormente apresentada na Equação (5), apenas foi necessária a coleta de dados de fração fóssil de carbono contido no RSU (CCW.FCF) do Estado de São Paulo. Este dado foi obtido de OLIVEIRA (2009) e sua representação gráfica está apresentada na Figura 11.

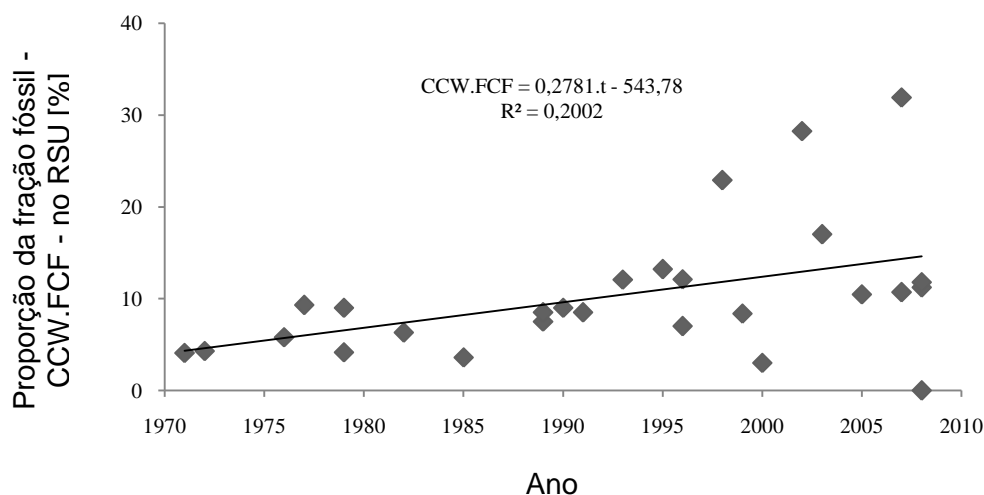


Figura 11 - Representação gráfica da variação da fração fóssil (CCW.FCF) no RSU do Estado de São Paulo

Fonte: OLIVEIRA (2009).

A partir da regressão linear obtida na Figura 11 é possível estimar qual será a proporção de CCW.FCF em 1990, 2010 e 2030, estes dados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Estimativas de CCW.FCF no RSU do Estado de São Paulo

Proporção no RSU [%]	
Ano	CCW.FCF
1990	9,60
2010	15,16
2030	20,72

5.3. Dados de Potencial de Geração Energética

Este trabalho de graduação trouxe dois métodos para a obtenção de energia através de RSU:

- Aproveitamento Energético de Biogás: Este método foi apresentado na Equação (8) e pode ser utilizado tanto para aproveitamento energético de biogás de aterro ou de biodigestor.
- Combustão de RSU: Apresentado na Equação (14) este método é utilizado para estimar o potencial de geração energética em um incinerador.

Aproveitamento Energético de Biogás

Verifica-se que a Equação (8) utilizada para o potencial de energia pelo aproveitamento energético de biogás demanda a vazão de CH_4 em m^3 . A Equação (3) e (7) estimam esta produção de CH_4 em aterros e biodigestores, respectivamente e apresentam como dado de saída a produção de metano em Gg, desta forma verifica-se que é necessário obter o dado de densidade do CH_4 para a conversão de Gg para m^3 .

Segundo a WHITE MARTINS (2010) a densidade do metano, apresentada em sua Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) é de $0,6784 \text{ kg.m}^{-3}$.

Combustão de RSU

A Equação (13), que resulta no PCI utilizado diretamente para estimar o potencial de geração energético pela Equação (14), apresenta como um dos parâmetros de entrada a massa de água no RSU.

Segundo CATAPRETA (2005), a umidade média do RSU brasileiro é 60% e pode variar muito em relação às condições climáticas locais. Para os propósitos deste estudo, considerou-se esta umidade em todo o período do cenário.

5.4. Dados de Potencial de Emissão de Poluentes Atmosféricos

Para a obtenção deste cenário não é necessária a coleta de dados estaduais, pois se baseia unicamente na emissão que é dada por uma massa de RSU

multiplicada a um fator de emissão específico, os fatores de emissão dados pela EPA são apresentados na sequência.

Emissões Controladas de Poluentes

A compilação do EPA (2008) estima taxas de emissão para tecnologias de controle de saída que atuam na recuperação e queima de biogás como *flares*. Para o propósito deste estudo será considerado todo processo de recuperação de biogás, seja ele em aterro sanitário e biodigestores. Utilizou-se a tecnologia de *flare* para estabelecer as taxas de emissão utilizadas neste Trabalho de Graduação, apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17- Taxas de emissão de poluentes por *flares*

Gás	Fator de Emissão [kg.(10 ⁶ .Nm ³ de CH ₄) ⁻¹]
CO	737
NO _x	631
MP	238

Fonte: Adaptado de EPA, 2008.

Desta forma para se obter os resultados provenientes das emissões controladas de poluentes atmosféricos basta aplicar os dados da Tabela 17 e de metano recuperado (R) dado pela Equação (3) na Equação (15).

Emissões não Controladas de Poluentes

A partir das concentrações não controladas de vários NMOC emitidos por gases de aterro, dadas pela compilação da EPA (2008), pode-se estimar a emissão anual de cada NMOC. Para o caso deste estudo utilizou-se o CO (massa molecular 28,01 g.mol⁻¹ e concentração de 20,9 ppmv no biogás) e criou-se uma categoria denominada “Outros Poluentes” que corresponde à soma em massa dos inúmeros outros poluentes emitidos por um aterro, esses poluentes, bem como suas massas moleculares e suas concentrações no biogás, são apresentadas no ANEXO 1.

Para o cálculo de emissão de poluentes não controlados utilizou-se a Equação (18).

Emissões de Poluentes por Combustão de RSU

A EPA (1996) apresenta fatores de emissão para diferentes tecnologias de incineração. Compilou-se o fator de emissão de cada tecnologia para gerar um fator de emissão médio, apresentado na Tabela 18. Este fator médio foi o utilizado para realizar o cálculo de potencial de poluição atmosférica da tecnologia de incineração e reflete razoavelmente a emissão por incineração de um Estado de grandes dimensões, como São Paulo, que pode apresentar diferentes tecnologias dependendo da escolha de cada município ou empreendedor.

Tabela 18 - Fator de emissão médio considerando várias formas de tecnologias de incineração

Poluente	Fator de Emissão Médio [kg.Mg ⁻¹]	Desvio Padrão [kg.Mg ⁻¹]
MP	10,71	10,36
SO ₂	1,00	0,69
NO _x	1,67	1,16
CO	18,22	46,47

Fonte: Adaptado de EPA, 1996.

Para efeito do cálculo de potencial de geração de poluentes atmosféricos na incineração, utilizou-se o fator de emissão que não considera nenhum tipo de sistema de controle de emissões atmosféricas, de forma a obter o potencial de emissão caso ocorra algum vazamento no sistema. A própria compilação de fatores de emissão da EPA sugere esta estratégia para dimensionar o melhor sistema de controle de poluição.

Desta forma para se obter os resultados provenientes das emissões de poluentes atmosféricos por combustão de RSU basta aplicar os dados da Tabela 18 na Equação (15).

5.5. Dados de Potencial de Geração de Efluentes Líquidos

Foram utilizados dois métodos para a quantificação de geração de efluentes líquidos:

- Método Suíço: dado pela Equação (19) e utilizado para o cálculo de geração de efluentes em aterros e compostagens
- Fator de Geração de Efluentes: dado pela Equação (20) e utilizado para o cálculo de geração de efluentes por biodigestores.

Método Suíço - Precipitação Média

Um dos parâmetros necessários para a obtenção deste cenário é a precipitação média anual que foi obtida a partir do portal do INMET (2010) e é apresentada na Figura 12.

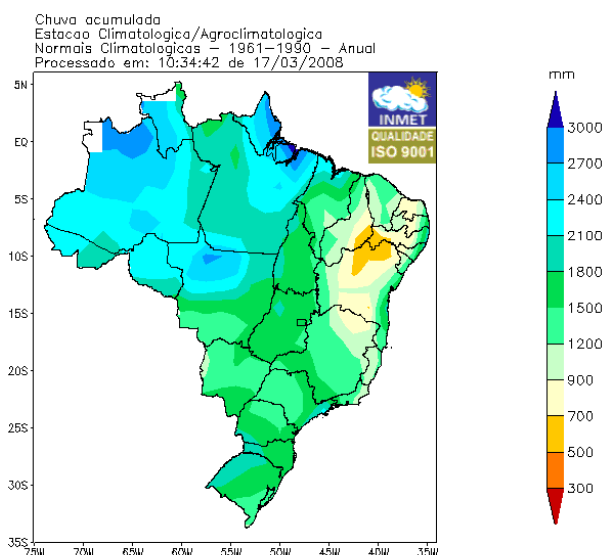


Figura 12 - Dados de precipitação média anual do Brasil

Pode-se notar pela Figura 12 que a precipitação média anual no Estado de São Paulo é de aproximadamente 1500 mm por ano.

Método Suíço - Proporção da Precipitação que é Convertida em Percolado (K)

Outro dado necessário para o cálculo do potencial de geração de efluentes líquidos é a densidade do RSU. Segundo estudos de CATAPRETA (2005), em um aterro experimental a densidade média do RSU encontrada foi $0,75 \text{ t.m}^{-3}$.

Com os dados da Tabela 7, elaborou-se uma função que se ajuste de forma linear aos dados apresentados, sendo estas funções apresentadas na Figura 13.

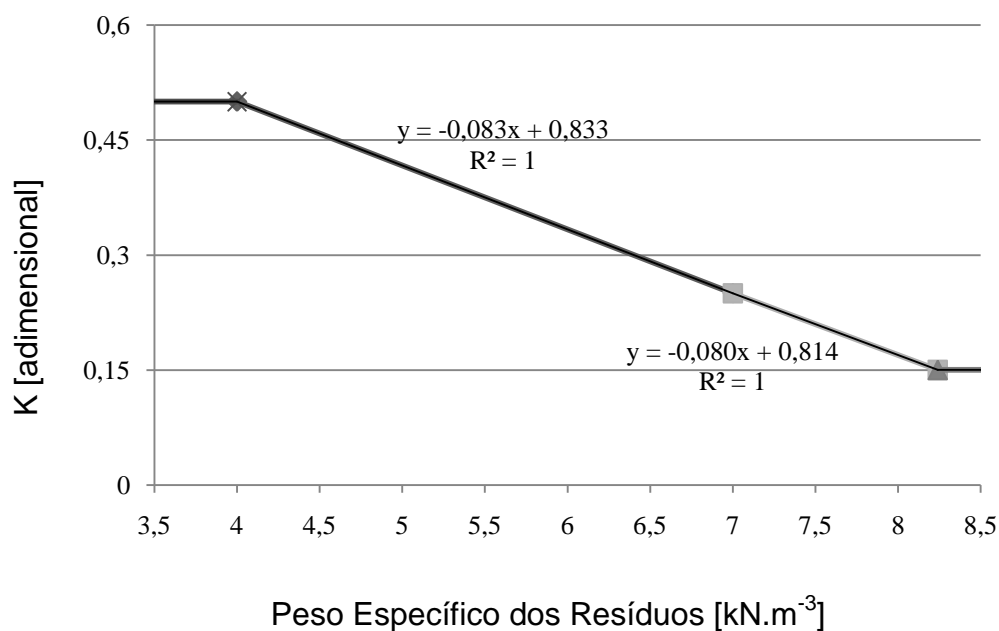


Figura 13 - Funções que linearizam o fator K de percolado

A partir de uma massa específica de aterramento de $0,75 \text{ t.m}^{-3}$, considerando a gravidade como $9,8 \text{ m.s}^{-2}$ temos o peso específico de $7,35 \text{ kN.m}^{-3}$, desta forma a constante k foi definida como 0,2217.

Método Suíço - Área de aterramento ou compostagem

Outra variável presente no método utilizado para a obtenção da geração de efluentes líquidos é a área de cobertura do aterro ou compostagem, para tanto como este trabalho de graduação quantifica a área ocupada cruzou-se os resultados do cenário de área elaborado por este mesmo estudo para gerar os resultados de geração de efluentes líquidos.

Fator de Geração de Efluentes - Biodigestão

Para o caso da alternativa de biodigestão utilizou-se o método de Fator de Geração de Efluentes dado pela Equação (20) onde o único dado que se necessitou coletar foi o do fator de geração de efluente para biodigestores de RSU.

A empresa Kuttner produtora de biodigestores apresentou um fator de geração de efluentes líquidos para o processo de biodigestão de RSU de $300 \text{ l}_{\text{efluente}} \cdot \text{t}_{\text{RSU}}^{-1}$ (KUTTNER, 2010).

5.6. Dados de Potencial de Ocupação de Área

Área Ocupada por Aterramento

A Equação (21) apresenta a ocupação de área por um resíduo aterrado, os dados de entrada para esta equação são a altura da célula de aterramento e massa específica do RSU.

Definiu-se que a altura da célula de aterramento é de 3 metros como sugere o manual com os procedimentos para implantação de aterros sanitários em valas (SÃO PAULO, 2005). Como comentado no item anterior, para a densidade de resíduos aterrados utilizou-se o mesmo dado de $0,75 \text{ t.m}^{-3}$.

Área Ocupada por Incineração

Conforme apresentado anteriormente, a Equação (23) de ocupação de área por incineração foi obtida pela coleta de dados de empresas de incineração de resíduo sólido, para preservar o sigilo tecnológico destas empresas os dados foram compilados e apresentados na Figura 14.

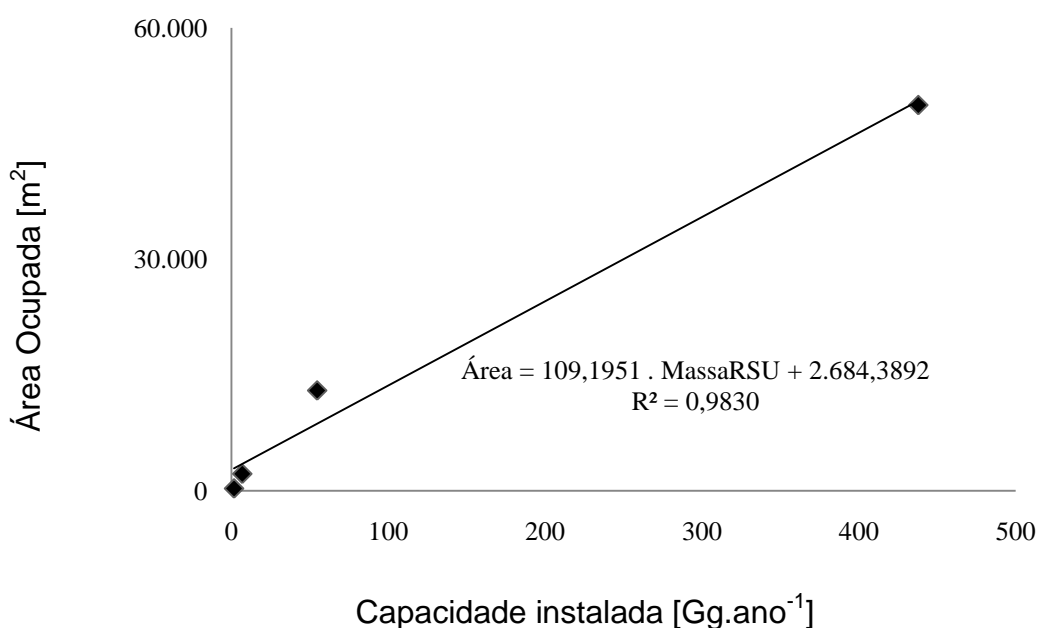


Figura 14 - Relação entre a capacidade instalada e a área ocupada de incineradores

Observação: Considerou-se que os incineradores operaram 24 horas por dia e 365 dias por ano.

Fonte: Essencis (2010), Usina Verde (2010) e Lufttech (2010).

Considerou-se a eficiência de redução de massa de 96%, como sugerido por Henriques (2004), sendo que a cinza resultante deste processo será enviada para aterramento, ocupando uma área proporcional a sua massa neste aterro.

Área Ocupada por Compostagem

A Equação (24) traz a forma de quantificar a área ocupada por um processo de compostagem, necessitando como dados de entrada a densidade do RSU compostado e a altura da leira de compostagem.

Utilizaram-se a densidade e a altura de leira fornecidas pela EMBRAPA (2004) de $0,45 \text{ t.m}^{-3}$ e 1,5 metros, respectivamente.

Como definido na seção “Método” em “4.7. Cenários” a fração não compostada será enviada para aterramento, ocupando uma área proporcional a sua massa nesse aterro.

Área Ocupada por Biodigestão

A Equação (25) permite estimar a ocupação de área por um biodigestor e foi obtida através de coleta de dados de Oliver (2008) e apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Relação entre Volume e Área de um biodigestor

Volume de Resíduos [m^3]	Área superficial [m^2]
3	43
7	68
15	99
20	127
30	161

Fonte: OLIVER (2008).

A partir desta relação foi-se estabelecida uma regressão linear que descreve o comportamento desta relação, apresentada na Figura 15.

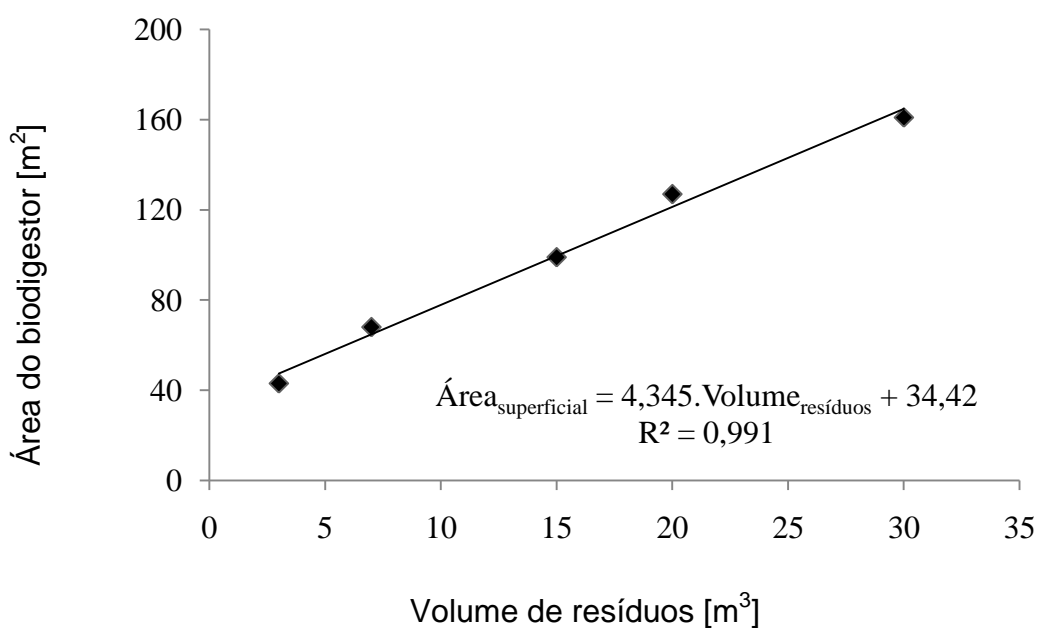


Figura 15 - Regressão linear correspondente a relação entre volume e área de biodigestores

Como definido no método da elaboração de Cenários (4.7) a fração não biodigerida será enviada para aterramento, ocupando uma área proporcional a sua massa nesse aterro.

5.7. Cálculos dos Cenários

A Figura 16 apresenta a evolução prevista para a geração de RSU no Estado de São Paulo. Nota-se que a massa de RSU gerada com o passar dos anos aumenta, porém com taxas diferentes nos 40 anos analisados, devido à premissa de adoção e projeção estipuladas para a taxa de geração de RSU. A quantidade de massa apresentada na Figura 16 após 2010 é a que será destinada para cada alternativa em cada um dos cenários:

- *Aterros*: 100% da massa de RSU será enviada para aterramento, como já vinha ocorrendo de 1990 a 2010.
- *Aterro (Rec.)*: 100% da massa de RSU será enviada para aterramento, como já vinha ocorrendo de 1990 a 2010.
- *Incineração*: 100% da massa de RSU será enviada para incineração, porém 4% dessa massa será convertida em cinzas e enviada para aterramento.

- *Compostagem*: 100% da massa de RSU será enviada para compostagem, porém a fração inorgânica dessa massa, por não ser compostável, será enviada para aterramento.
- *Biodigestão*: 100% da massa de RSU será enviada para biodigestão, porém a fração inorgânica dessa massa, por não ser biodigerida, será enviada para aterramento.
- *Biodigestão (Rec.)*: 100% da massa de RSU será enviada para biodigestão, porém a fração inorgânica dessa massa, por não ser biodigerida, será enviada para aterramento.

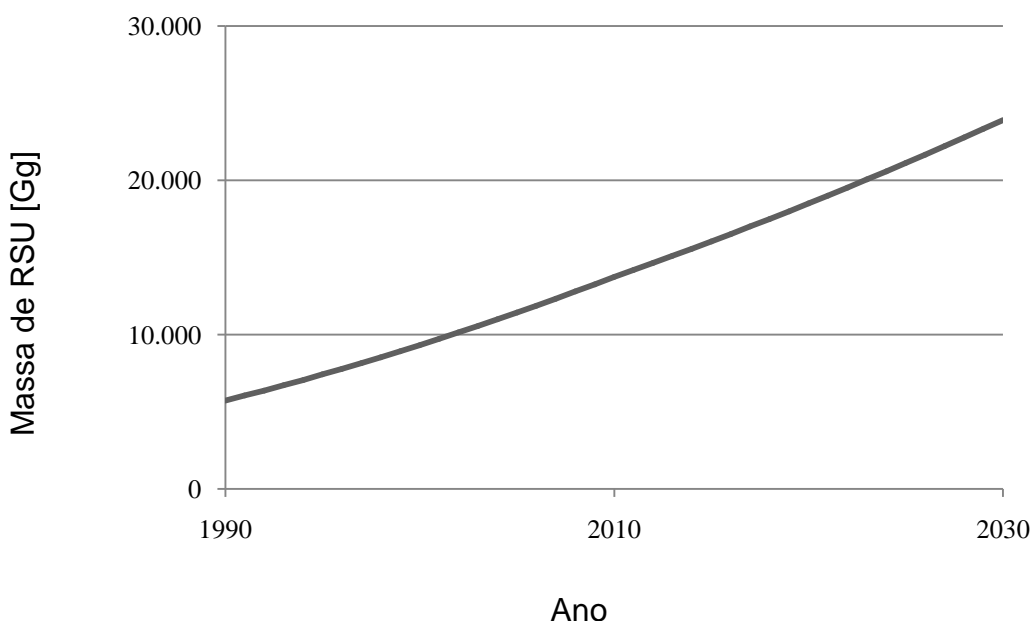


Figura 16 - Massa de RSU gerada no Estado de São Paulo de 1990 a 2030

5.8. Potencial de Emissão de Gases do Efeito Estufa

A Figura 17 apresenta a evolução temporal do potencial de emissão de GEE dos cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).

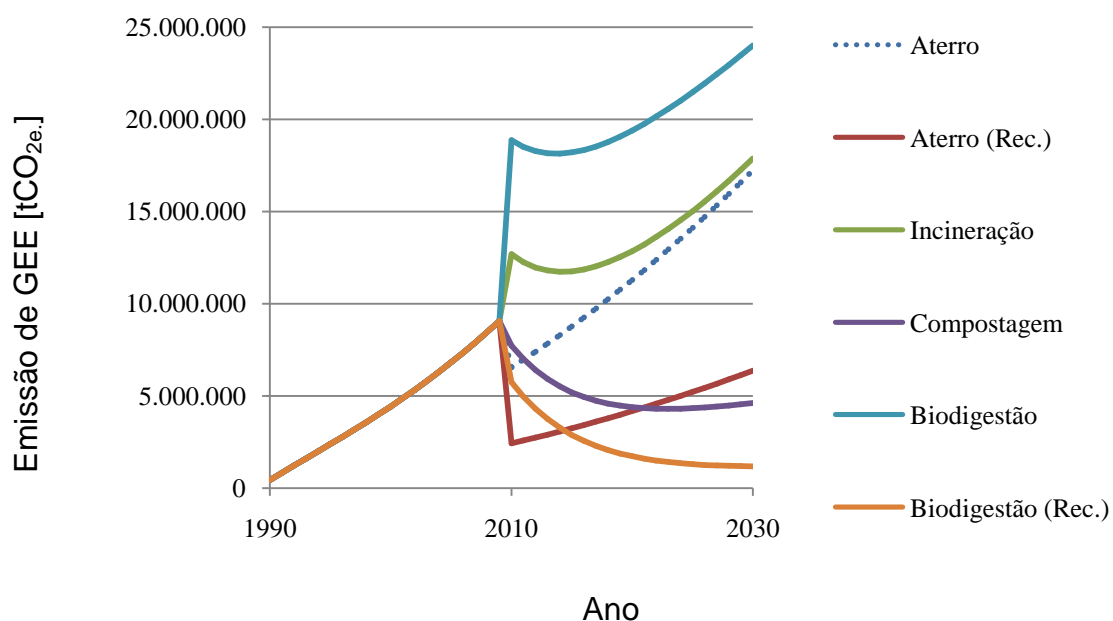


Figura 17 - Comportamento temporal da emissão de GEE para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

A Tabela 20 apresenta os resultados que permitiram a criação da Figura 17.

Tabela 20 - Resultados para o potencial de geração de GEE, de 1990 a 2030, para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

Cenários de Potencial de Emissão de GEE [tCO _{2e}]	
Ano	Aterro
1990	422.078
1991	827.213
1992	1.221.096
1993	1.608.578
1994	1.993.803
1995	2.380.310
1996	2.771.129
1997	3.168.859
1998	3.575.729
1999	3.993.655
2000	4.424.288
2001	4.869.050
2002	5.329.169
2003	5.805.706
2004	6.299.579
2005	6.811.584
2006	7.342.407
2007	7.892.645
2008	8.462.812

2009	9.053.351					
	Aterro	Aterro (Rec.)	Incineração	Compostagem	Biodigestão	Biodigestão (Rec.)
2010	6.539.099	2.416.161	12.677.914	7.723.083	18.868.361	5.744.657
2011	6.962.644	2.572.659	12.251.188	6.998.129	18.505.281	4.955.466
2012	7.396.634	2.733.016	11.963.115	6.400.699	18.275.040	4.292.855
2013	7.841.482	2.897.385	11.794.139	5.911.048	18.157.892	3.737.080
2014	8.297.532	3.065.893	11.727.791	5.512.516	18.137.177	3.271.481
2015	8.765.063	3.238.643	11.750.207	5.191.049	18.198.842	2.882.003
2016	9.244.300	3.415.718	11.849.720	4.934.789	18.331.028	2.556.789
2017	9.735.421	3.597.185	12.016.516	4.733.732	18.523.732	2.285.835
2018	10.238.561	3.783.092	12.242.346	4.579.440	18.768.515	2.060.702
2019	10.753.822	3.973.478	12.520.279	4.464.791	19.058.255	1.874.269
2020	11.281.272	4.168.368	12.844.500	4.383.778	19.386.945	1.720.529
2021	11.820.950	4.367.776	13.210.129	4.331.333	19.749.519	1.594.413
2022	12.372.873	4.571.709	13.613.082	4.303.181	20.141.699	1.491.647
2023	12.937.033	4.780.163	14.049.942	4.295.714	20.559.878	1.408.622
2024	13.513.403	4.993.129	14.517.856	4.305.889	21.001.014	1.342.296
2025	14.101.937	5.210.589	15.014.446	4.331.138	21.462.538	1.290.100
2026	14.702.571	5.432.520	15.537.736	4.369.295	21.942.285	1.249.870
2027	15.315.228	5.658.893	16.086.090	4.418.533	22.438.427	1.219.777
2028	15.939.814	5.889.674	16.658.155	4.477.309	22.949.422	1.198.279
2029	16.576.224	6.124.824	17.252.822	4.544.324	23.473.969	1.184.076
2030	17.224.337	6.364.298	17.869.183	4.618.479	24.010.971	1.176.070

O potencial de emissão de GEE em todo o período pode ser observado na Figura 18. Desta forma é possível comparar quais dos cenários apresentam maior potencial de geração de GEE.

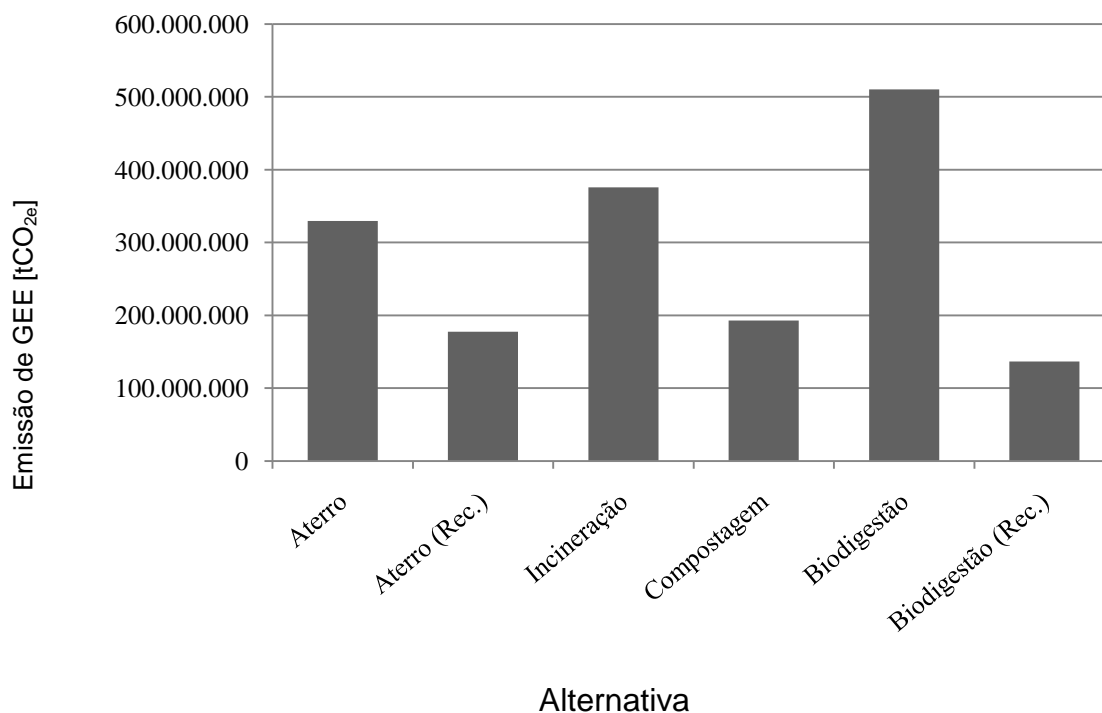


Figura 18 - Potencial de emissão de GEE para todo o período

Para o cenário “Aterro” ocorre apenas a recuperação usual de metano, ou seja, sem a previsão de novos aterros recuperando metano nos 20 anos futuros. Isto explica o comportamento de queda das emissões em 2010 em 32,34%, percentual este proveniente de aterros que já promovem essa prática, como os aterros dos municípios de: Caieiras, Itapevi, Mauá, Paulínia, Santa Isabel, Santos, São Paulo e Tremembé. O potencial de geração de GEE da alternativa “Aterro” seria o segundo maior entre os cenários estudados caso a recuperação de metano no Estado de São Paulo fosse zero para aterros.

No cenário “Aterro (Rec.)”, considerou-se o investimento em novos sistemas de recuperação de metano, com funcionamento a partir de 2010 em todos os aterros do estado e com o máximo da capacidade de coleta (75%). Trata-se do cenário com segundo menor potencial de emissão de GEE.

O cenário “Incineração” é o que apresenta o segundo maior potencial de emissão de GEE, o pico das emissões em 2010 é dado pela soma do metano residual de aterramento, que vinha sendo emitido pelo resíduo aterrado desde 1990 até 2010, com as emissões provenientes da combustão do RSU fóssil a partir de

2010. A queda observada logo após 2010 se dá pela diminuição do metano residual proveniente de aterramento, devido ao RSU parar de ser destinado a aterros. O aumento de emissões após a queda inicial se dá devido ao aumento da fração fóssil (CCW.FCF) somado ao aumento de RSU gerado pela população até 2030, nota-se que CCW.FCF cresce de 15,16% em 2010 para 20,72% em 2030.

A emissão de GEE pelo cenário “Compostagem”, trata-se de um cenário com baixo potencial de emissões de GEE, considerando que para este trabalho de graduação considerou-se que o processo de compostagem se dá de forma completamente aeróbia e desta forma apresenta um fator de emissão de zero $\text{gCH}_4.\text{kg}_{\text{RSU}}^{-1}$. As emissões presentes nesse cenário é a soma das emissões residuais de metano do RSU disposto em aterros antes de 2010 e do N_2O emitido pelas leiras de compostagem.

Dentre todos os analisados, o cenário de “Biodigestão” é o que apresenta maior potencial de emissão de GEE, devido a seu elevado fator de emissão de metano de $47,49 \text{ gCH}_4.\text{kg}_{\text{RSU}}^{-1}$. A queda observada no cenário de “Biodigestão” logo após 2010 se dá pela diminuição do metano residual proveniente de aterramento de RSU de 1990 a 2010. O aumento de emissões após a queda inicial se dá devido ao aumento de RSU gerado pela população até 2030.

O cenário de “Biodigestão (Rec.)” é o que apresenta menor potencial de emissão de GEE, este se caracteriza pela real forma como são operados os biodigestores, que possuem um queimador para destruir o metano gerado no processo.

5.9. Potencial de Geração Energética

A Figura 19 apresenta a evolução temporal para o potencial de geração energética dos cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).

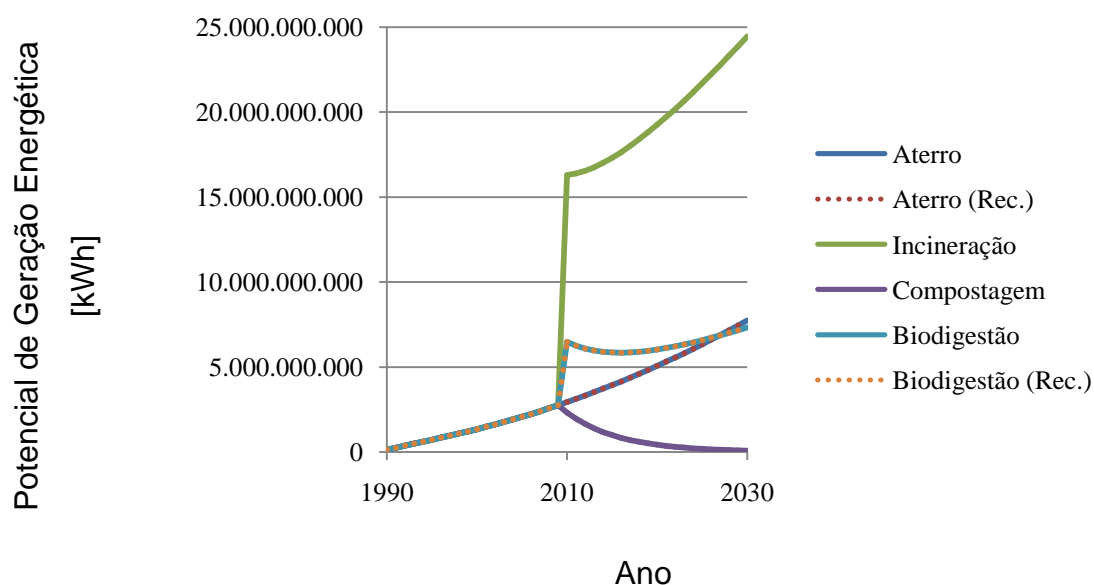


Figura 19 - Comportamento temporal do potencial de geração energética para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

Nota-se um destaque para o potencial de geração energética pelo cenário “Incineração”, desta forma criou-se a Figura 20 que permite a correta interpretação das alternativas dos cenários de Aterro, Aterro (Rec.), Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.) que não aparecem adequadamente por causa da escala da figura anterior.

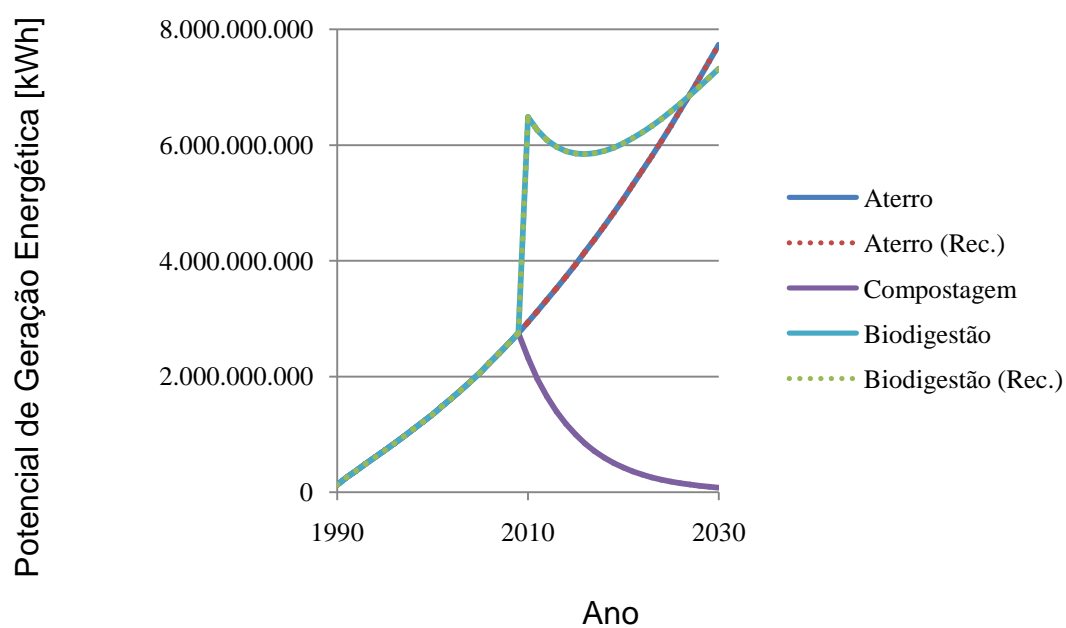


Figura 20 - Comportamento temporal do potencial de geração energética para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

A Tabela 21 apresenta os resultados que permitiram a criação da Figura 19 e da Figura 20.

Tabela 21 - Resultados para o potencial de geração energética para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

Cenários de Potencial de Geração Energética [kWh]						
Ano	Aterro					
1990	128.240.935					
1991	251.334.175					
1992	371.008.626					
1993	488.738.474					
1994	605.782.212					
1995	723.215.569					
1996	841.959.289					
1997	962.802.571					
1998	1.086.422.844					
1999	1.213.402.453					
2000	1.344.242.732					
2001	1.479.375.887					
2002	1.619.175.017					
2003	1.763.962.565					
2004	1.914.017.458					
2005	2.069.581.126					
2006	2.230.862.582					
2007	2.398.042.709					
2008	2.571.277.877					
2009	2.750.702.998					
	Aterro	Aterro (Rec.)	Incineração	Compostagem	Biodigestão	Biodigestão (Rec.)
2010	2.936.434.102	2.936.434.102	16.285.057.536	2.320.671.340	6.483.327.855	6.483.327.855
2011	3.126.630.484	3.126.630.484	16.377.596.656	1.957.868.761	6.255.681.951	6.255.681.951
2012	3.321.516.802	3.321.516.802	16.533.636.597	1.651.784.989	6.086.739.715	6.086.739.715
2013	3.521.279.562	3.521.279.562	16.744.312.891	1.393.552.880	5.967.634.004	5.967.634.004
2014	3.726.072.481	3.726.072.481	17.002.147.320	1.175.691.535	5.890.883.918	5.890.883.918
2015	3.936.021.011	3.936.021.011	17.300.831.194	991.889.583	5.850.178.087	5.850.178.087
2016	4.151.226.155	4.151.226.155	17.635.042.510	836.822.343	5.840.191.829	5.840.191.829
2017	4.371.767.687	4.371.767.687	18.000.291.701	705.997.569	5.856.432.898	5.856.432.898
2018	4.597.706.873	4.597.706.873	18.392.791.498	595.625.309	5.895.111.343	5.895.111.343
2019	4.829.088.761	4.829.088.761	18.809.347.132	502.508.117	5.953.029.717	5.953.029.717
2020	5.065.944.121	5.065.944.121	19.247.263.708	423.948.419	6.027.490.446	6.027.490.446
2021	5.308.291.078	5.308.291.078	19.704.268.059	357.670.365	6.116.217.681	6.116.217.681
2022	5.556.136.488	5.556.136.488	20.178.442.810	301.753.903	6.217.291.370	6.217.291.370
2023	5.809.477.110	5.809.477.110	20.668.170.760	254.579.151	6.329.091.629	6.329.091.629
2024	6.068.300.580	6.068.300.580	21.172.087.951	214.779.473	6.450.251.824	6.450.251.824
2025	6.332.586.248	6.332.586.248	21.689.044.081	181.201.884	6.579.618.971	6.579.618.971

2026	6.602.305.879	6.602.305.879	22.218.069.097	152.873.655	6.716.220.337	6.716.220.337
2027	6.877.424.238	6.877.424.238	22.758.345.018	128.974.124	6.859.235.263	6.859.235.263
2028	7.157.899.602	7.157.899.602	23.309.182.165	108.810.931	7.007.971.388	7.007.971.388
2029	7.443.684.171	7.443.684.171	23.869.999.095	91.799.954	7.161.844.592	7.161.844.592
2030	7.734.724.435	7.734.724.435	24.440.305.685	77.448.391	7.320.362.070	7.320.362.070

O potencial de geração energética em todo o período pode ser observado na Figura 21. Desta forma é possível comparar quais dos cenários apresentam maior potencial de geração energética.

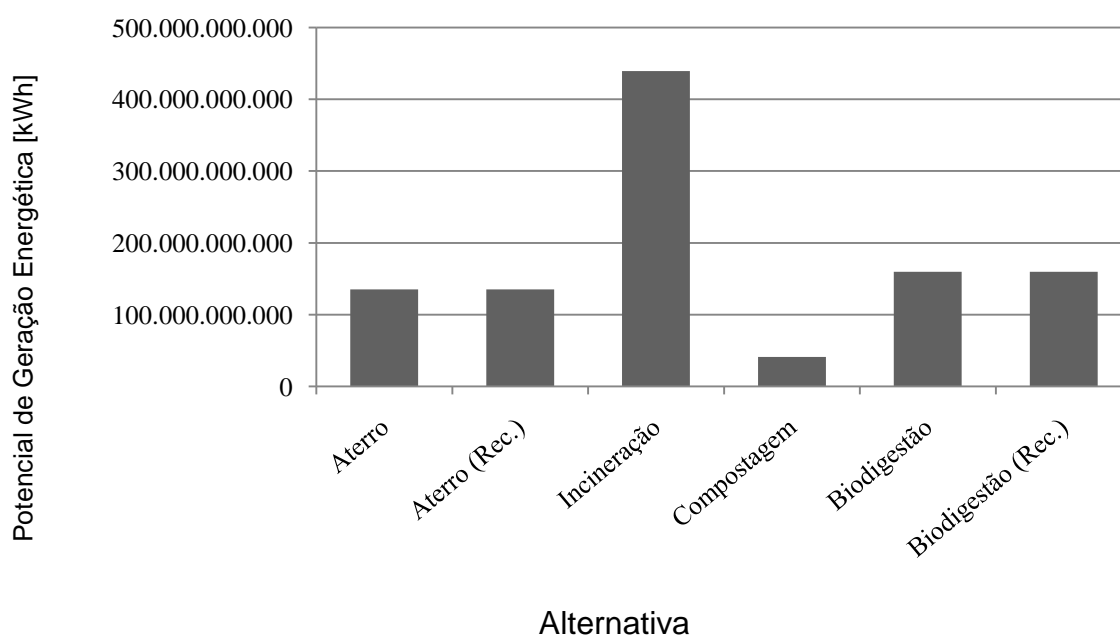


Figura 21 - Potencial de geração de energia para todo o período para cada cenário

Os cenários “Aterro” e “Aterro com Recuperação” apresentam mesmo potencial de geração energética, pois como definido na seção de método considerou-se que todo o metano gerado pelo aterramento, seja ele queimado para fins energéticos ou não, apresenta potencial de geração de energia. Obviamente para aterros que já apresentem sistemas de coleta de biogás é mais simples implantar sistemas de aproveitamento energético. Estes dois cenários se mostram como sendo a terceira opção que apresenta maior potencial de geração de energia.

O cenário “Incineração” apresenta o maior potencial de gerar energia, conforme pode ser observado pela Figura 21, com início da geração em 2010 e com incrementos anuais associados ao aumento da quantidade de RSU. Justamente esse grande potencial energético é um dos fatores mais favoráveis desta alternativa.

Apesar do poder calorífico do metano ser superior ao do poder calorífico médio dos RSU, deve-se lembrar que o biogás não é composto totalmente de metano e também que apenas uma parcela em massa do RSU torna-se biogás. Já a incineração aproveita quase toda a massa de RSU (excluindo, normalmente, materiais metálicos e cerâmicos) para gerar energia.

O cenário “Compostagem”, devido à produção de metano nula, apresenta um baixo potencial de geração energética proveniente unicamente das emissões de metano residuais do RSU que foi aterrado até 2010. O comportamento da curva do cenário “Compostagem” após 2010 é semelhante ao potencial de geração energética de um aterro após o término de sua vida útil, apresentando o decaimento da produção de metano com o tempo.

O cenário “Biodigestão” e “Biodigestão (Rec.)” apresentam um potencial de geração de energia maior que os cenários de “Aterro” e “Aterro (Rec.)” devido a sua elevada produção de metano.

5.10. Potencial de Emissão de Poluentes Atmosféricos

As emissões de outros poluentes que não os GEE, se devem basicamente às emissões não controladas ocasionadas pelo aterro. A lista de poluentes dadas pela EPA para este caso é enorme, contando com a presença de vários compostos perigosos e carcinogênicos. A Figura 22 apresenta a evolução na geração de poluentes pelo cenário “Aterro” de 1990 a 2030 no estado de São Paulo. As emissões apresentadas de SO₂, MP e NO_x se devem principalmente a queima em *flare* dos 32,34% de biogás que são recuperados no Estado.

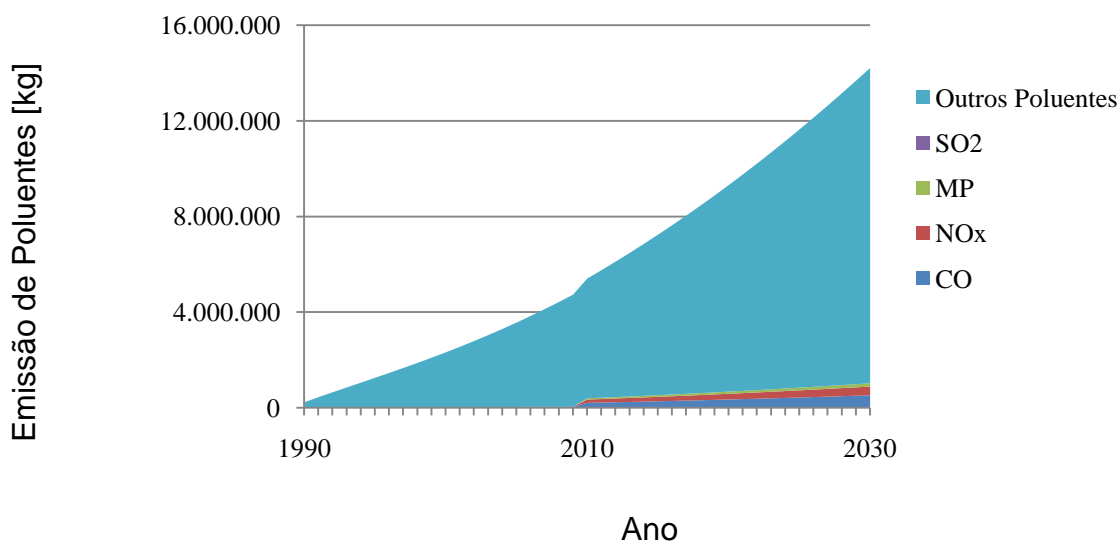


Figura 22 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário "Aterro"

Ao se considerar o aumento da parcela de biogás queimado em aterro, o cenário "Aterro (Rec.)", apresenta um acréscimo também na emissão dos gases SO₂, MP e NO_x gerados, conforme apresentado na Figura 23. Observa-se um comportamento bastante parecido com o do cenário "Aterro" (Figura 22), notando-se um aumento na emissão de poluentes a partir de 2010, fato este se deve a recuperação de 75% do metano produzido ao invés dos 32,34% de costume.

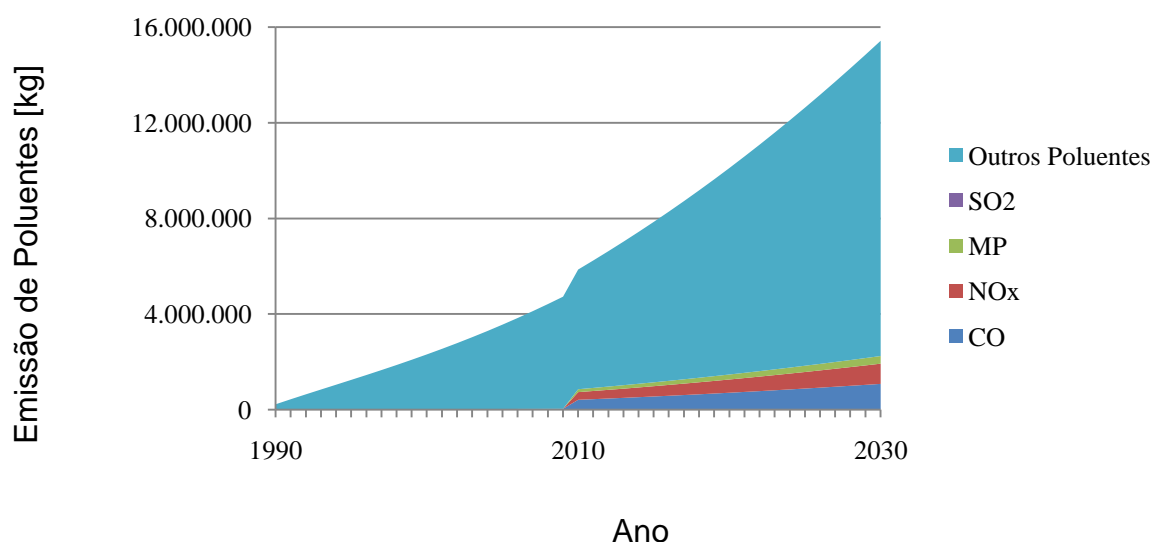


Figura 23 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário "Aterro (Rec.)"

O cenário "Incineração" é o que emite mais poluentes atmosféricos, conforme pode ser observado pela Figura 24 em comparação com os outros cenários. Deve-

se ressaltar, porém, que este estudo foi desenvolvido visando gerar o potencial de emissão de poluentes de forma que para este caso específico não se considerou nenhuma forma de controle das emissões como, por exemplo, filtros de manga, coletores inerciais, coletores úmidos, precipitadores eletrostáticos, pós queimadores ou ciclones. Na categoria “Outros Poluentes” para o caso da incineração de RSU estão incluídos metais pesados, dioxinas, furanos e compostos orgânicos.

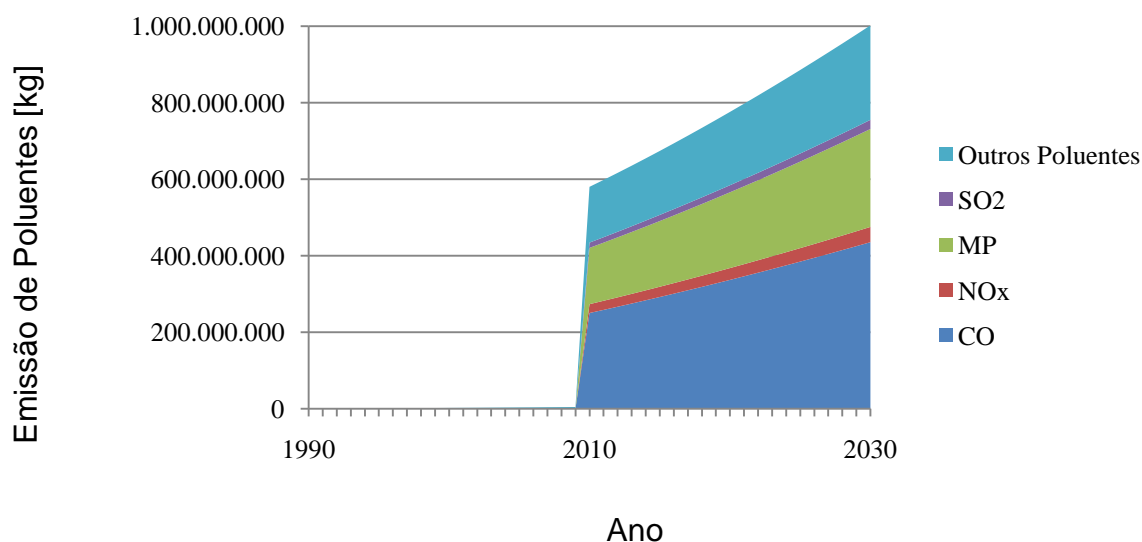


Figura 24 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário “Incineração”

Para o cenário “Compostagem” e “Biodigestão”, a emissão de poluentes se dá totalmente devido às emissões residuais do processo de aterramento e queima de biogás de aterro normalmente realizada pelo Estado de São Paulo para o resíduo que foi depositado de 1990 até 2010. Ou seja, há uma queda na emissão de poluentes, conforme pode ser observado pela Figura 25, devido à estabilização da atividade microbiana em relação aos resíduos aterrados antes de 2010.

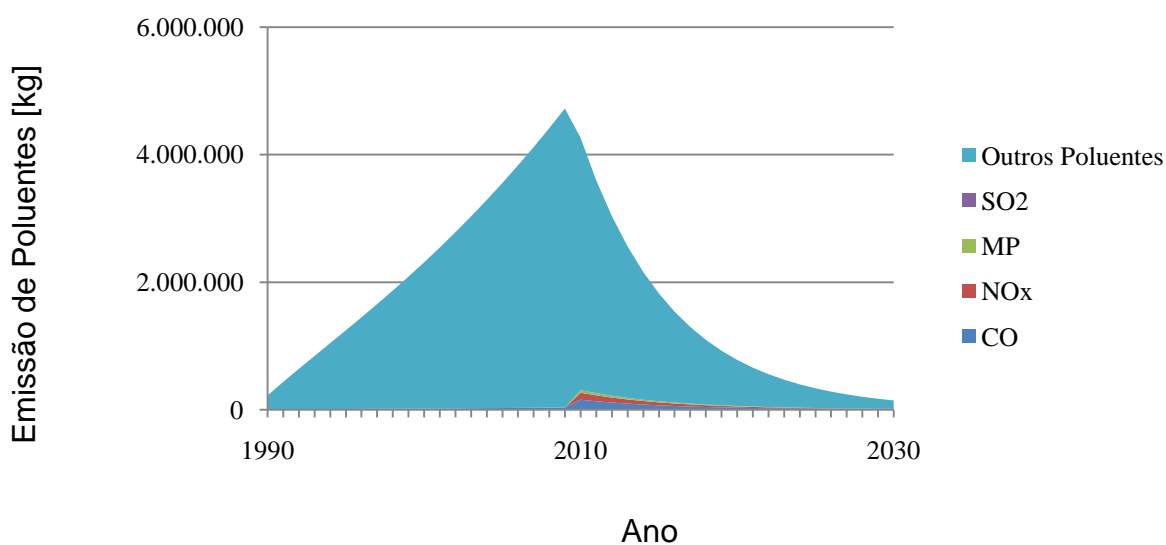


Figura 25 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário "Compostagem" e "Biodigestão"

Para o cenário "Biodigestão (Rec.)", a emissão de poluentes das emissões residuais do processo de aterramento e queima de biogás de aterro normalmente realizada pelo Estado de São Paulo para o resíduo que foi depositado de 1990 até 2010 soma-se a queima do biogás produzido na biodigestão. Como observado na Figura 26, as emissões de poluentes desse cenário são maiores que as observadas no Cenário "Compostagem" e "Biodigestão" devido à queima do biogás produzido na biodigestão.

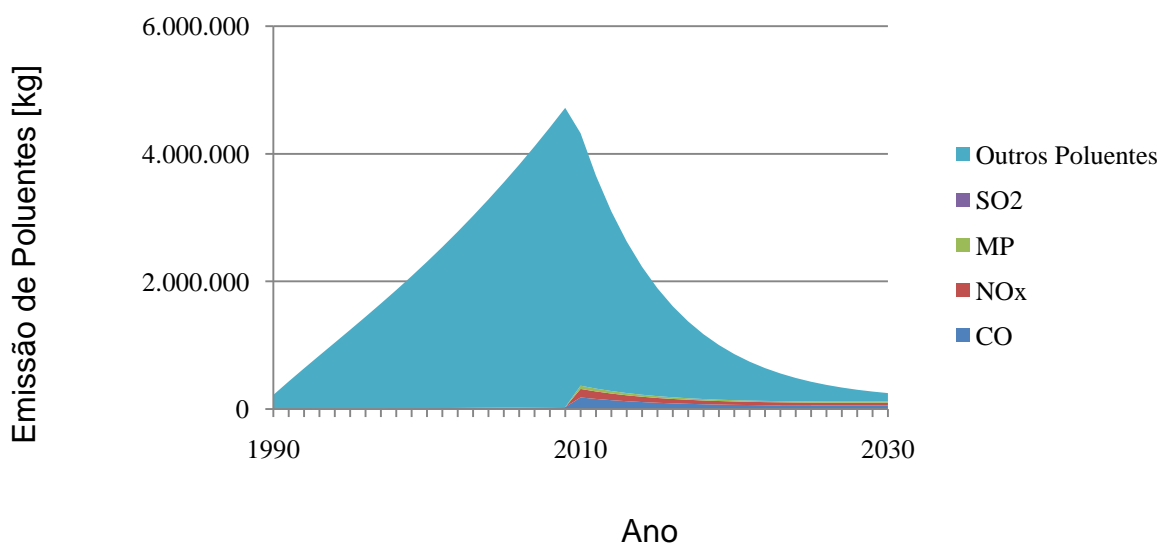


Figura 26 - Comportamento temporal do potencial de geração de poluentes atmosféricos para o cenário "Biodigestão (Rec.)"

O potencial de emissão de geração de poluentes atmosféricos em todo o período pode ser observado na Figura 27. Desta forma é possível comparar quais dos cenários apresentam maior potencial de geração de poluentes atmosféricos.

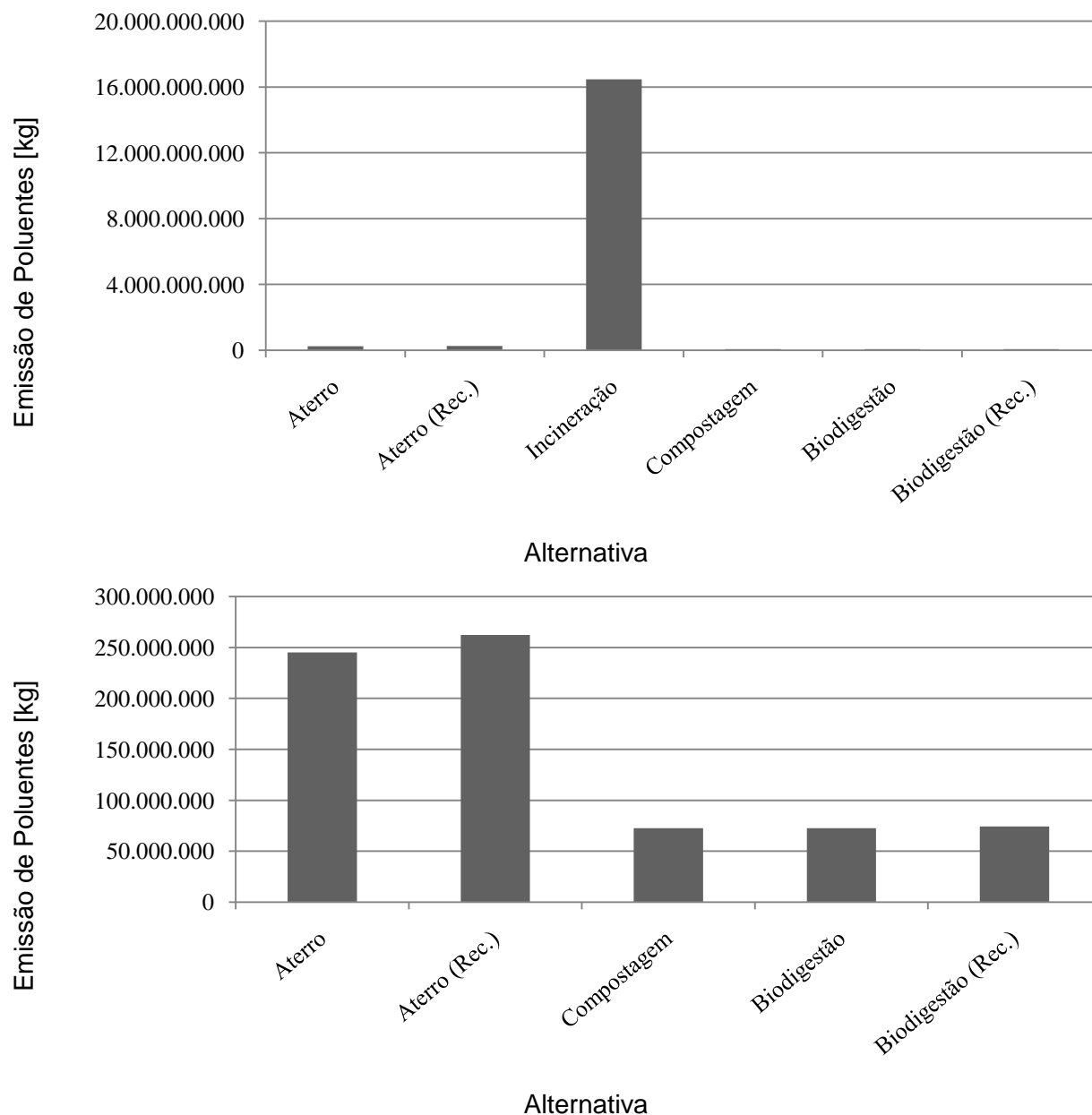


Figura 27 - Potencial de geração de poluentes atmosféricos para todo o período para cada cenário considerando a soma de todos os poluentes atmosféricos observados

A Tabela 27 que apresenta os resultados que permitiram a criação dos cenários de potencial de geração de poluentes atmosféricos encontra-se no ANEXO 3.

5.11. Potencial de Geração de Efluentes Líquidos

A Figura 28 apresenta a evolução temporal do potencial de geração de efluentes líquidos dos cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).

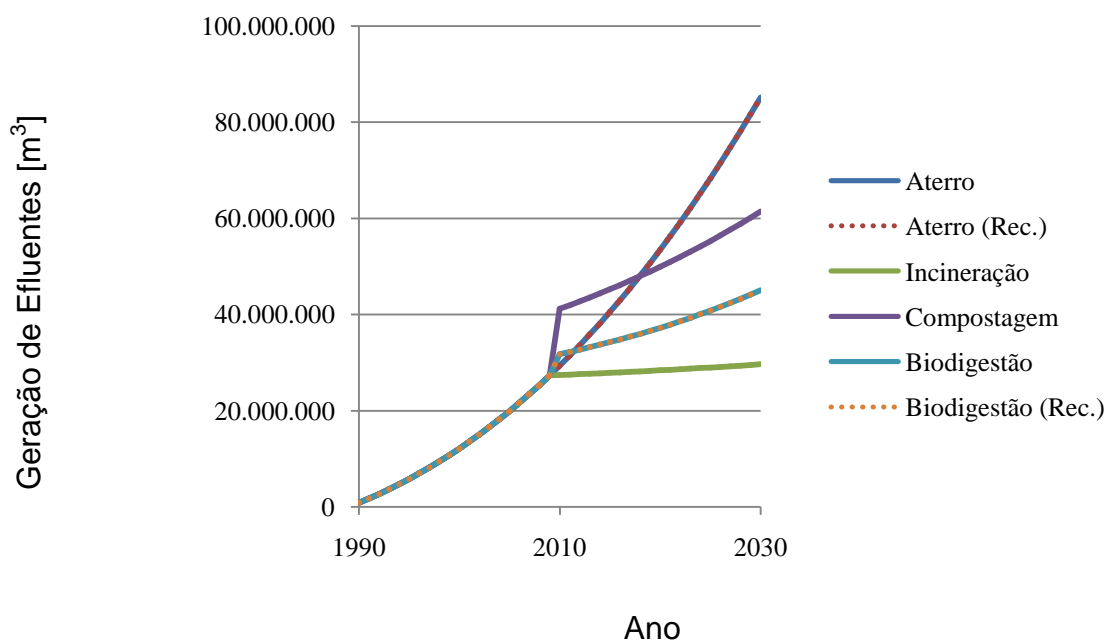


Figura 28 - Comportamento temporal da emissão de efluentes líquidos para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

A Tabela 22 apresenta os resultados que permitiram a criação da Figura 28.

Tabela 22 - Resultados para o potencial de geração de efluentes líquidos para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

Potencial de Geração de Efluentes Líquidos [m ³]	
Ano	Aterro
1990	845.486
1991	1.738.488
1992	2.680.241
1993	3.671.979
1994	4.714.935
1995	5.810.345
1996	6.959.443
1997	8.163.463
1998	9.423.639
1999	10.741.205
2000	12.117.396
2001	13.553.447
2002	15.050.590

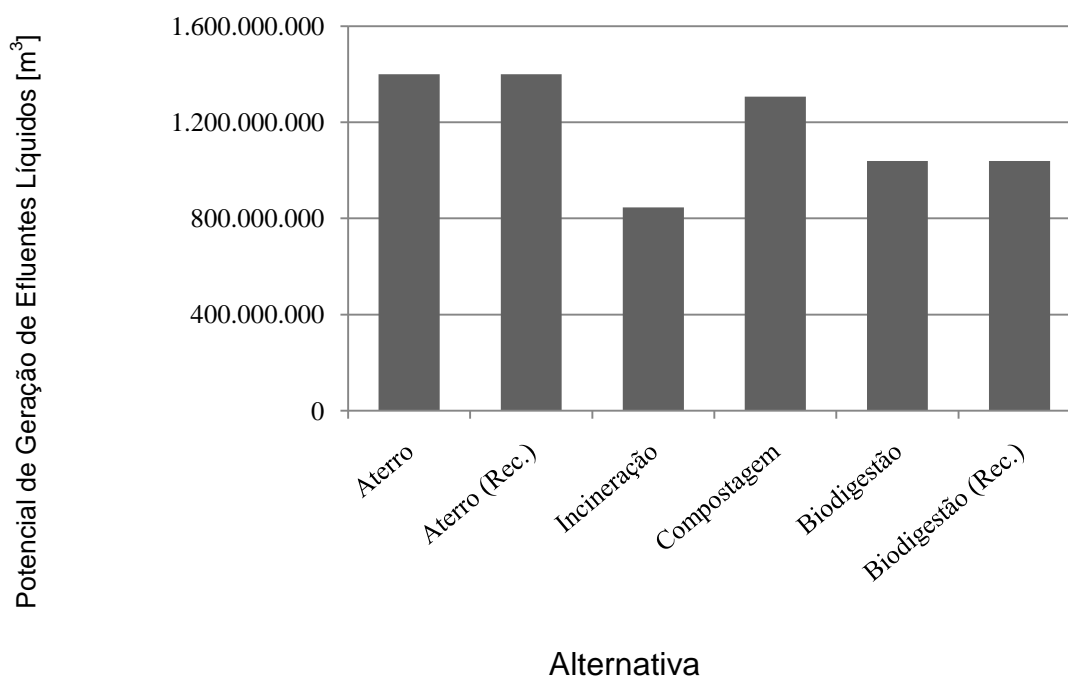


Figura 29 - Potencial de geração de efluentes líquidos para todo o período

O cenário “Aterro” e “Aterro com Recuperação de Biogás” apresentam o mesmo potencial de geração de efluentes líquidos, pois o método suíço, utilizado para estimar a geração de efluentes líquidos por aterramento e compostagem, varia principalmente em função da área, que no caso destes dois cenários é idêntica. Estes cenários apresentam-se como primeira opção em termos de maior potencial de geração de efluentes líquidos.

O cenário “Incineração” não apresenta nenhuma geração de efluentes pela planta de incineração e sim pelo aterramento de RSU feito de 1990 a 2010 somados ao aterramento dos 4% de cinzas provenientes da combustão do RSU. Desta forma é o que apresenta menor potencial de geração de efluentes líquidos, pois no processo de queima de RSU espera-se que toda a massa de água seja convertida em vapor.

O cenário “Compostagem” apresenta o segundo maior potencial de geração de efluentes líquidos, isto se deve ao fato do formato triangular da leira de compostagem, a necessidade de área adicional para o reviramento da leira e sua altura de 1,5 metros. Estes fatores influem de forma que a compostagem se torne a alternativa com segundo maior potencial de geração de efluentes líquidos.

O cenário “Biodigestão” e “Biodigestão (Rec.)” se comportam da mesma maneira e ambos caracterizam-se como segundo que apresenta menor potencial de geração de efluentes líquidos. O comportamento da curva se dá devido à soma dos efluentes gerados pelo aterramento de RSU antes de 2010 com os efluentes gerados pela biodigestão a partir de 2010.

Como visto os cenários que envolvem aterros e compostagem para o estudo da geração de efluentes líquidos apresentam grande correlação com os cenários para a categoria Área (seção 5.12 deste trabalho de graduação), devido ao método suíço utilizado que apresenta a área como uma de suas variáveis.

Outro fator que pode ser analisado é a precipitação anual média, sendo que na metodologia aplicada para este Trabalho de Graduação esta precipitação é a única causa de geração de efluente líquido. Ou seja, se o aterro for coberto de forma a evitar totalmente a infiltração da água da chuva, não haverá geração de efluentes líquidos na massa de RSU aterrada, porém o método suíço utilizado prevê que sempre uma parte da chuva irá infiltrar no maciço de RSU.

5.12. Potencial de Ocupação de Área

A Figura 30 apresenta a evolução temporal do potencial de ocupação de área dos cenários: Aterro, Aterro com Recuperação de Metano, Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.).

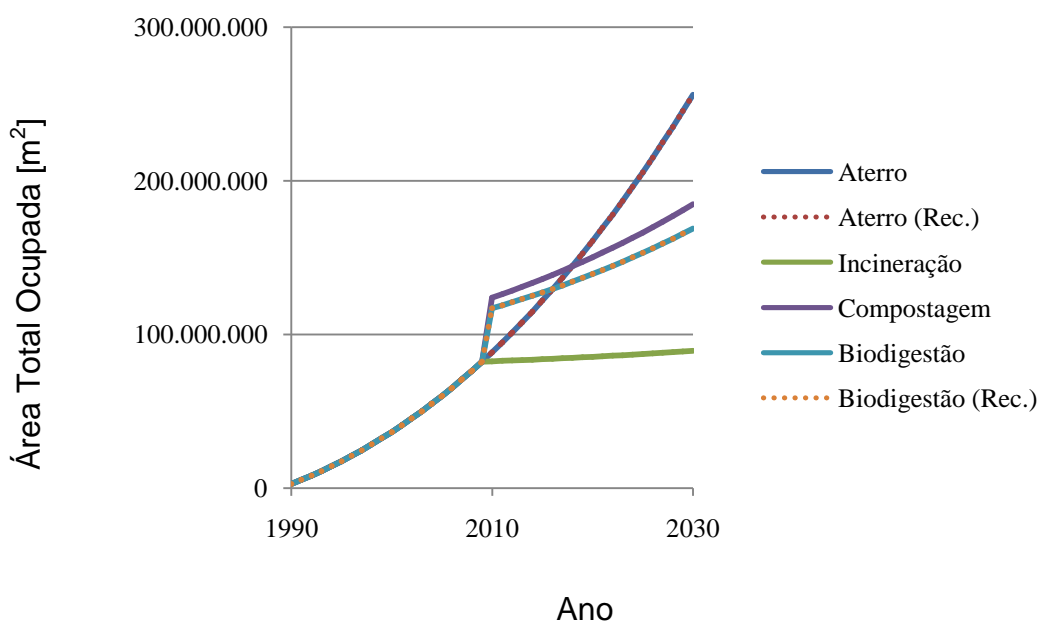


Figura 30 - Comportamento temporal da ocupação de área para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

A Tabela 23 apresenta os resultados que permitiram a criação da Figura 30.

Tabela 23 - Resultados para a ocupação de área para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

Potencial de Ocupação de área [m ²]	
Ano	Aterro
1990	2.542.571
1991	5.228.033
1992	8.060.100
1993	11.042.482
1994	14.178.892
1995	17.473.041
1996	20.928.641
1997	24.549.404
1998	28.339.042
1999	32.301.266
2000	36.439.788
2001	40.758.321
2002	45.260.576
2003	49.950.264
2004	54.831.098
2005	59.906.789
2006	65.181.050
2007	70.657.591
2008	76.340.125

2009	82.232.363					
	Aterro	Aterro (Rec.)	Incineração	Compostagem	Biodigestão	Biodigestão (Rec.)
2010	88.338.018	88.338.018	82.480.707	123.862.347	116.918.893	116.918.893
2011	94.641.917	94.641.917	82.732.996	126.157.167	118.874.049	118.874.049
2012	101.146.971	101.146.971	82.993.334	128.520.534	120.887.151	120.887.151
2013	107.856.090	107.856.090	83.261.836	130.954.033	122.959.626	122.959.626
2014	114.772.188	114.772.188	83.538.619	133.459.271	125.092.924	125.092.924
2015	121.898.174	121.898.174	83.823.800	136.037.881	127.288.520	127.288.520
2016	129.236.960	129.236.960	84.117.495	138.691.520	129.547.912	129.547.912
2017	136.791.459	136.791.459	84.419.820	141.421.870	131.872.622	131.872.622
2018	144.564.580	144.564.580	84.730.892	144.230.636	134.264.199	134.264.199
2019	152.559.235	152.559.235	85.050.827	147.119.547	136.724.213	136.724.213
2020	160.778.336	160.778.336	85.379.742	150.090.358	139.254.261	139.254.261
2021	169.224.794	169.224.794	85.717.754	153.144.846	141.855.963	141.855.963
2022	177.901.520	177.901.520	86.064.978	156.284.815	144.530.962	144.530.962
2023	186.811.426	186.811.426	86.421.531	159.512.091	147.280.928	147.280.928
2024	195.957.423	195.957.423	86.787.530	162.828.526	150.107.553	150.107.553
2025	205.342.421	205.342.421	87.163.090	166.235.995	153.012.554	153.012.554
2026	214.969.334	214.969.334	87.548.330	169.736.397	155.997.674	155.997.674
2027	224.841.071	224.841.071	87.943.364	173.331.657	159.064.677	159.064.677
2028	234.960.545	234.960.545	88.348.310	177.023.723	162.215.354	162.215.354
2029	245.330.667	245.330.667	88.763.283	180.814.567	165.451.519	165.451.519
2030	255.954.347	255.954.347	89.188.401	184.706.187	168.775.011	168.775.011

O potencial de ocupação de área em todo o período pode ser observado na Figura 31. Desta forma é possível comparar quais dos cenários apresentam maior potencial de ocupação de área.

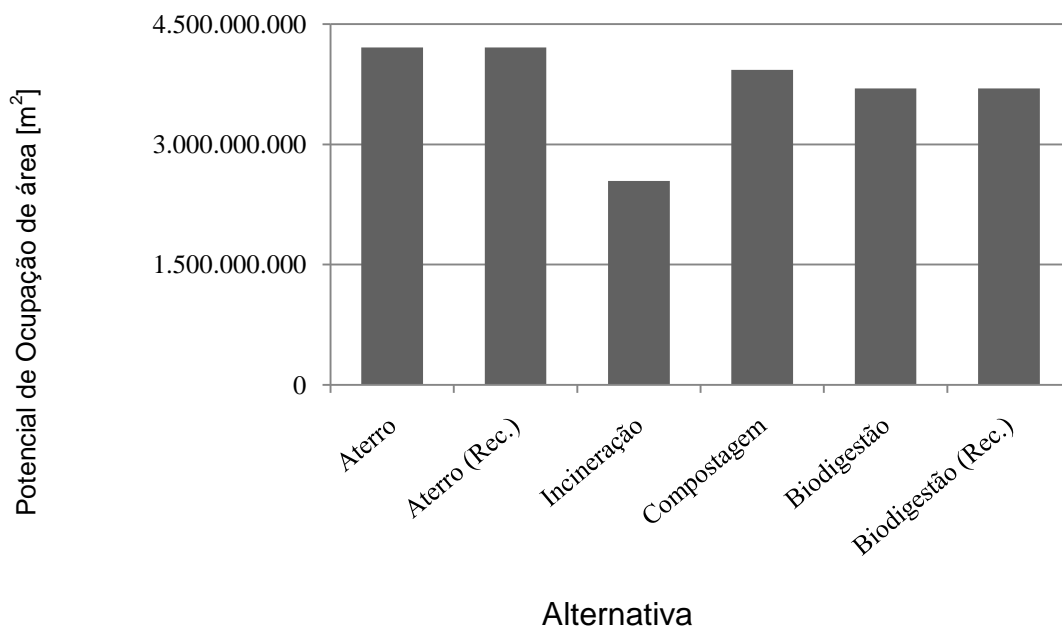


Figura 31 - Potencial de ocupação de área para todo o período

O cenário “Aterro” e “Aterro com Recuperação de Biogás” apresentam o mesmo potencial de ocupação de área. Estes cenários apresentam-se como maior potencial de ocupação de área. Para o caso de aterros o RSU apenas se acumula no local de disposição sem a possibilidade de ser encaminhado para adubação como no caso da compostagem e biodigestão ou mudar de estado físico e ocupar o espaço atmosférico como no caso da incineração. Desta forma, o principal fator para o potencial de ocupação de área deste cenário é o acréscimo de RSU no sítio de disposição a cada ano, sem nunca se retirar do local de disposição final qualquer fração deste RSU.

O cenário “Incineração” apresenta o potencial de ocupação de área inferior frente a outras tecnologias, sendo o cenário de menor ocupação de área de todos os estudados.

O cenário “Compostagem” apresenta o segundo maior potencial de ocupação de área, isto se deve ao fato do formato triangular da leira de compostagem, a necessidade de área adicional para o reviramento da leira, a necessidade de enviar para o aterramento a fração não compostada e sua altura de 1,5 metros. O comportamento da curva a partir de 2010 se dá devido à soma da área do RSU aterrado entre 1990 e 2010 com a área de compostagem a partir de 2010.

O cenário “Biodigestão” e “Biodigestão (Rec.)” apresentam o terceiro maior potencial de ocupação de área, devido à necessidade de enviar para o aterramento a fração não biodigerida. O comportamento da curva a partir de 2010 se dá devido à soma da área do RSU aterrado entre 1990 e 2010 com a área de biodigestão a partir de 2010.

5.13. Compilação dos Resultados

A Tabela 24 traz a soma para todo o período (1990 a 2030) de quanto cada um dos cenários, quais sejam: Aterro Sanitário, Aterro Sanitário (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.), irão contribuir para cada tipo de impacto ambiental analisado, sendo eles: potencial de geração de gases de efeito estufa (GEE), energia, poluentes totais, efluentes líquidos e ocupação de área. A Figura 32 traz a proporção da soma destes valores apresentados para todo o período.

Tabela 24 - Compilação das contribuições de cada cenário, considerando a soma das quantidades de todo o período de 1990 a 2030, para o potencial de geração de: gases de efeito estufa, energia, poluentes totais, efluentes líquidos e a ocupação de área

Cenário	Impactos				
	GEE [tCO _{2e}]	Energia [kWh]	Poluentes Totais [kg]	Efluentes [m ³]	Área [m ²]
Aterro	329.813.242	135.288.665.967	245.165.336	1.399.986.008	4.210.078.912
Aterro (Rec.)	177.508.213	135.288.665.967	262.333.543	1.399.986.008	4.210.078.912
Incineração	375.700.195	439.150.381.565	16.459.190.223	845.482.917	2.542.678.073
Compostagem	193.081.285	41.240.400.774	72.501.891	1.306.972.313	3.930.365.404
Biodigestão	510.193.827	159.678.954.989	72.501.891	1.039.113.848	3.698.178.001
Biodigestão (Rec.)	136.789.854	159.678.954.989	74.274.045	1.039.113.848	3.698.178.001

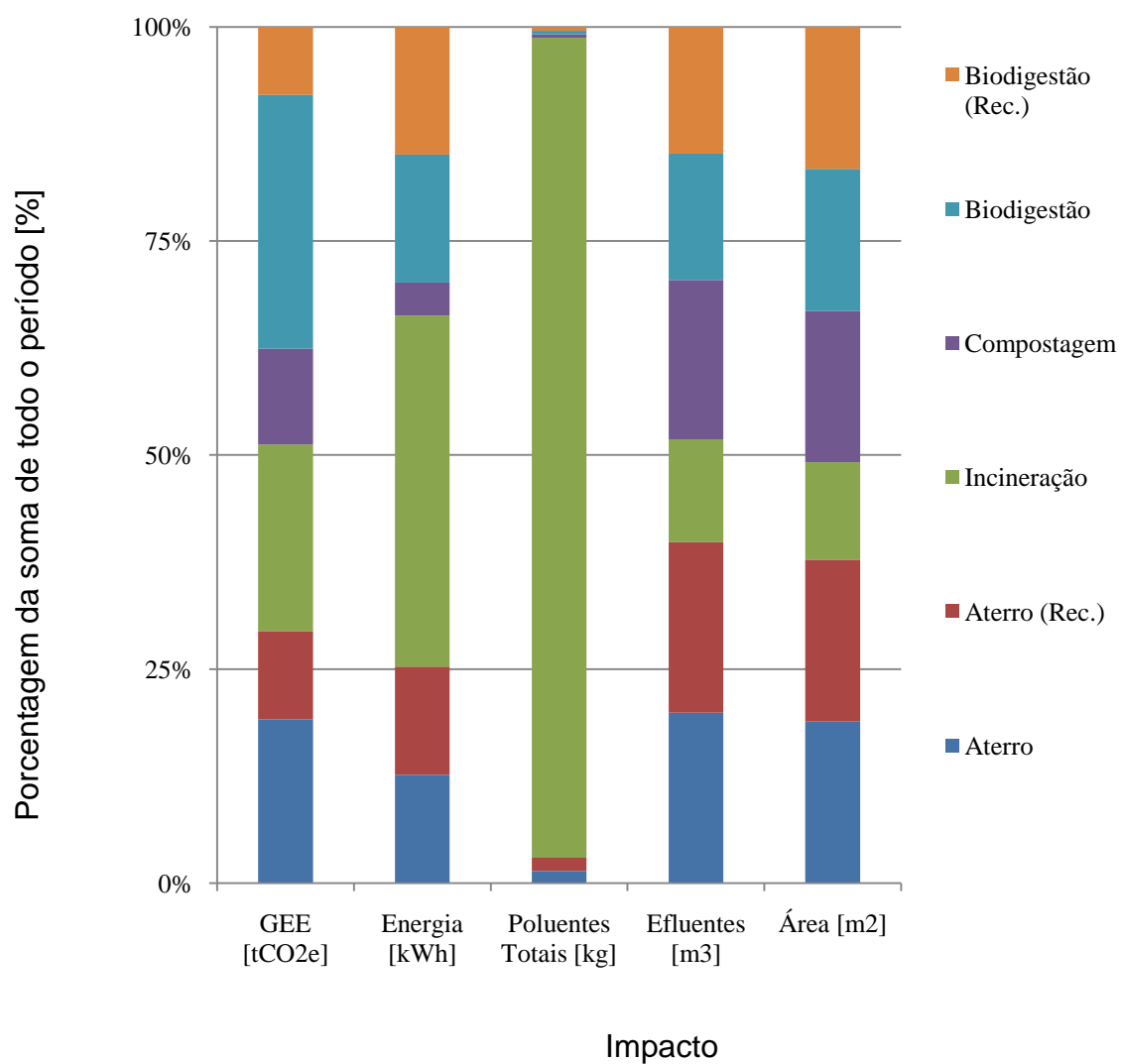


Figura 32 - Comparação dos dados considerando todo o período 1990 - 2030

6. CONCLUSÕES

Primeiramente, é digno de nota a escassez de dados consistentes referentes ao gerenciamento de RSU no Estado de São Paulo.

Este trabalho foi realizado utilizando uma das possíveis ferramentas de apoio à decisão que é a cenarização de fenômenos ambientais. Nota-se que os cenários, muitas vezes, são construídos de forma a possibilitar a tomada de decisão prévia para evitar que o fenômeno de estudo se concretize. Diante disto, a verificação da ocorrência dos resultados quantitativos obtidos pelo cenário não é um objetivo da técnica de cenarização.

Este trabalho serve como base para futuros estudos que visem a cenarização quantitativa de fenômenos ambientais, podendo ser aplicado como alternativa ou complemento aos cenários qualitativos. A análise quantitativa permite a geração de resultados gráficos e comparações que possibilitam a observação do comportamento do elemento analisado ao longo do tempo, de forma a facilitar a visualização do fenômeno pelo tomador de decisões.

A ferramenta computacional produzida se mostrou rápida, simples e eficaz para a elaboração dos cenários e interpretação dos seus resultados. A ferramenta permite, com facilidade, a alteração de premissas e a quantificação das consequências dessas modificações.

Apesar deste trabalho não considerar aspectos políticos e econômicos deve-se ressaltar que estes são chave para a definição de novas medidas referentes ao gerenciamento de RSU, sendo o aspecto ambiental, mais um dos analisados no momento da escolha de qual alternativa será utilizada.

Sem surpresas, os cenários obtidos poderão ter seus aspectos ambientais melhorados se houver um esforço em programas de gerenciamento integrado de RSU, de coleta seletiva, diminuição do consumo, reutilização e reciclagem.

Aterro e Aterro (Rec.)

Nota-se que a estimativa de emissão de GEE deste estudo para 2005 foi de 6.811.584 tCO_{2e} e apresenta-se relativamente próxima a estimativa de 5.794.320 tCO_{2e} obtida para o mesmo ano pelo inventário estadual de GEE por resíduos sólidos no que tange o aterramento de RSU (CETESB, 2010), isto demonstra como

as metodologias apresentadas nesse trabalho de graduação apesar de apresentarem limitações podem ser representativas para a esfera estadual.

A queima de biogás em aterros mostra-se viável no que tange um futuro de baixo carbono apresentando também potencial de geração energética. Porém, aterros apresentam problemas relacionados à ocupação de espaço, geração de efluentes líquidos e emitem diversos tipos de poluentes atmosféricos, com nocivos efeitos para saúde humana.

Para o caso da geração de efluentes líquidos o uso do método suíço apenas subestima a produção de lixiviado gerado pelo maciço de RSU, pois, o método desconsidera a umidade do RSU e como apresentado por BARROS (2004) apresenta um erro de aproximadamente 18% frente às condições experimentais. Como os cenários de aterro e compostagem utilizaram o mesmo método e ambos apresentaram os maiores potenciais de geração de efluentes líquidos mesmo subestimados não há problemas na comparação destes cenários com os outros cenários de incineração e biodigestão.

Incineração

Nota-se que a incineração apresenta uma das maiores emissões de GEE entre todos os cenários observados, porém existe alternativas que possibilitam a diminuição deste potencial de geração de GEE. A solução consiste em retirar completamente a fração fóssil do RSU antes da incineração (podendo ser por meio de coleta seletiva), zerando as emissões de GEE desta alternativa. Em contrapartida a retirada de material fóssil provocaria uma redução no potencial de geração energética, que como apresentado na Figura 19 é um ponto favorável a incineração. Na Figura 11 pode-se notar que o Estado de São Paulo está aumentando a fração fóssil de seu RSU ao longo do tempo, provavelmente devido ao crescimento da utilização do plástico no cotidiano da população, isto provocará um aumento na emissão de GEE e potencial energético caso esta alternativa seja adotada pelo estado.

Nota-se pela Figura 24 que o potencial de geração de poluentes atmosféricos é elevado para esta alternativa, porém ressalta-se que neste trabalho de graduação foram levantados apenas fatores de emissão para incineradores de RSU, sem

considerar sistemas de controle de poluição, de forma a obter o potencial total de emissão de poluentes.

A incineração apresentou baixo potencial de geração de efluentes líquidos e ocupação de área.

Compostagem

A compostagem, apesar de apresentar potencial comparativamente elevado de ocupação de área e geração de efluentes, apresenta boas oportunidades para a utilização consciente do RSU de forma a transformá-lo em composto orgânico, que pode ser absorvido pela agricultura. Esta alternativa apresenta baixo potencial de emissões de poluentes atmosféricos e GEE.

Deve-se ressaltar que para o caso de potencial de geração de efluentes líquidos foi-se analisado apenas o volume de lixiviado produzido e não a qualidade deste.

Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

Caso não sejam utilizados sistemas de recuperação de biogás a alternativa de biodigestão apresenta em comparação aos outros analisados um elevado potencial de geração de GEE, porém nota-se que se utilizados, os sistemas de recuperação de biogás tornam esta alternativa a com menor potencial de geração de GEE.

A biodigestão apresenta elevados valores de ocupação da área, mas pode trazer benefícios energéticos e apresenta baixo potencial de emissões de poluentes atmosféricos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho de graduação utilizou dados que foram obtidos por meio de interpolações e médias estaduais, de forma que para casos específicos devem ser realizados novos cálculos para a correta quantificação das categorias levantadas nesse trabalho.

Para próximas pesquisas sobre tema recomenda-se considerar:

- As formas de controle de emissão de poluentes na incineração;
- Obter dados específicos sobre geração energética (elétrica e térmica) por Unidades de Recuperação Térmica (incineradores) e por projetos de obtenção energética pelo uso de biogás;
- Considerar a eficiência de conversão de energia para diferentes tecnologias de incineração e aproveitamento energético de biogás;
- Considerar as diferentes metodologias de geração de efluentes líquidos já que o método suíço utilizado considera apenas a precipitação como gerador do lixiviado;
- Considerar as diferentes tecnologias de cada categoria abordada;
- Incorporar ao estudo aumentos gradativos na porcentagem de envio de RSU para cada alternativa;
- Buscar dados de fatores de emissão que sejam mais condizentes com a realidade estadual para poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa;
- Analisar a influência econômica na escolha da alternativa a ser utilizada;
- Analisar como serão influenciados os modos de gerenciamento de RSU pelas novas leis como a Política Estadual de Mudanças Climáticas e a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

8. REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2004. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_2004.php>. Acesso em: 22/05/2010.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/download_panorama_2009.php>. Acesso em: 22/05/2010.

AMARAL F. L. M. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos**: Um panorama tecnológico atual. São Paulo, 2004

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. 165f. Dissertação (mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2000.

BANCO MUNDIAL. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**: Relatório de Síntese Técnica - Resíduos. Washington, 2010.

BARROS, H.L. **Estudo do Balanço Hídrico em Aterro Sanitário por Meio de Lisímetros de Grandes Dimensões**. 2004. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

BIOGÁS, **A empresa**, 2009. Disponível em: <http://www.biogas-ambiental.com.br/>. Acesso em: 23/06/2010.

Brasil, Lei 12305, de 02 de agosto de 2010, **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências**, Publicada em D.O.U. de 03/08/2010 - Coluna I - pág. 03.

CATAPRETA, C. A. A. **Avaliação da densidade de resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro experimental**. UFMG, Departamento de Transportes e Geotécnica, 2005.

CETESB. **Manual do usuário do programa de computador Biogás - Geração e uso energético- Aterros versão 1.0**. 59p. São Paulo, 2006.

CETESB. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor de Resíduos e Efluentes do Estado de São Paulo, 1990 a 2008**. p.136 São Paulo, 2010. Em consulta pública.

CETESB. **Poluentes Atmosféricos**. São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_saude.asp>. Acesso em: 22/04/2010.

D`ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA A. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: IPT; CEMPRE, 2000.

DERISIO, J. C. **Introdução ao Controle da Poluição Ambiental**. 1ªed., São Paulo, CETESB, 1992.

EMBRAPA. **Uso da Compostagem em Sistemas Agrícolas Orgânicos**. Fortaleza, 2004 . Disponível em:
<http://www.cnpat.embrapa.br/publica/pub/SerDoc/doc_89.pdf>. Acesso em:
15/05/2010.

EPA. **A guide for methane mitigation projects: Gas to energy at landfills and open dumps**. EPA 430-B-96-081, USEPA, Washington, D.C.; USEPA, pág. 29, 1996.

ESSENCIS. **Dados sobre o processo de incineração de resíduos sólidos da empresa**. Comunicação pessoal. 2010.

ETHERIDGE, L.P. STEELE, R.J. FRANCEY, & R.L. LANGENFELDS. **Historic Historical CH₄ Records Since About 1000 A.D. From Ice Core Data**. Departamento de Energia, Oak Ridge, 2002.

ETHERIDGE, S. P. **Biogas use in industrial anaerobic wastewater treatment. Energy from Biogas**. São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, 2003.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. Rio de Janeiro, 2004.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2**. Rio de Janeiro: Gráfica Digital, 2000.

_____. **Censo Demográfico 1991**. Banco de Dados. Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_est/>. Diretório:
"Censo_Demográfico_1991\Populacao_Residente_Urbana_Rural". Acesso em: abr. 2010.

_____. **Censo Demográfico 2000**. Banco de Dados. Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_est/>. Diretório:
"Censo_Demográfico_2000\populacao". Acesso em: abr. 2010.

_____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - Síntese de Indicadores: 2007**. Banco de dados. Disponível em
<http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#download> e Diretório:
"Trabalho_e_Rendimento\Pesquisa_Nacional_por_Amostra_de_Domicilios_anual" e na página de Internet do SIDRA <<http://sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: mar. 2009.
Digital, 2000.

Instituto Brasileiro de Administração Municipal - IBAM. **Boletins sobre resíduos sólidos: Compostagem**. 2010. Disponível

em:<<http://www.ibam.org.br/publique/media/Boletim5rs.pdf>>. Acesso em: 20/06/2010.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Mapas de Condições Registradas**. Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>> Acesso em: fev. 2010.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance and Uncertainly Management in National Greenhouse Gas Inventories**. Japan: IPCC, 2000.

_____. **2006 IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories**. Japan: IPCC, 2006.

_____. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Nova York: IPCC, 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html> Acesso em: fev. 2010.

_____. **Compilation of air pollutant emission factors : mobile sources - v.2 Supplement A**. 1991.

_____. **Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual Revised**. United Kingdom: IPCC, 1996.

_____. **Mudança do Clima 2007: A Base das Ciências Físicas**. 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/portuguese/ar4-wg1-spm.pdf>>. Acesso em: 22/06/2010.

_____. **Summary for Policymakers: Emissions Scenarios**. 2000. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>>. Acesso em: 22/06/2010.

JARDIM & WELLS. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**, IPT/CEMPRE S. Paulo. IPT, 1995.

KATHIRAVALE, S. **Modeling the heating value of Municipal Solid Waste**. Revista: Fuel. 2003.

KUTTNER. **Beneficiamento do lixo urbano**. Informações gerais. 2010.

LIMA, L. M. Q. **Tratamento e Biorremediação**, 3a edição, Editora HEMUS, Rua da Glória 312, São PAULO-SP, 265pp, 1995.

LUFTECH, **A empresa**, 2010. Disponível em:< <http://www.luftech.com.br/>>. Acesso em: 26/06/2010.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME: EPE, 2007.

NBR 13.086/05. **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** BRASIL, 2005.

NBR 8.419/92. **Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos.** BRASIL, 1992.

NISHIMURA, R. **Análise do balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos:** Implementação de aplicativo computacional. Campo Grande, 2009. Disponível em: <http://www.cbc.ufms.br/tesdesimplificado/tde_arquivos/5/TDE-2009-08-07T092551Z-421/Publico/Rafael.pdf>. Acesso em: 23/06/2010.

OLIVER, A. P. M. **Manual de Treinamento em Biodigestão.** Instituto Winrock, 2008. 2ª Edição. Disponível em: <<http://wp2.oktiva.com.br/ider/files/2010/01/16.Manual-de-Treinamento-em-Biodigestao.pdf>>. Acesso em: 02/06/2010.

OLIVEIRA, B. P. **Dados de Composição de RSU no Estado de São Paulo**, a ser publicado.

WALSH, J. L. J.; ROSS, C.C.; SMITH, M.S.; HARPER, S.R. e WILKINS, W.A. **Biogas Utilization Handbook.** Departamento de energia dos Estados Unidos. Georgia Tech Research Institute. 1988.

SÃO PAULO, Lei 13.798, de 09 de novembro de 2009, **Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas**, Publicada em D.O.E. de 10/11/2009 - Seção I - pág. 01.

SÃO PAULO, Decreto 44.760, de 13 de março de 2000, **Autoriza o Secretário do Meio Ambiente a celebrar convênios com Municípios Paulistas.**

SÃO PAULO, Lei 45.001, de 27 de junho de 2000, **Autoriza o Secretário do Meio Ambiente a celebrar convênios com Municípios Paulistas.**

SAUER, I. **Métodos de levantamento de dados, análise e previsão de demanda de energia.** 2010.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Procedimentos para Implantação de Aterros Sanitários em Valas.** São Paulo, 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors - Volume I: Stationary Point and Area Sources.** 5ª ed.1995.

USINA VERDE. **Reciclagem Energética de Resíduos Sólidos Urbanos: Informações Gerais.** 2010.

WHITE MARTINS. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos.** Disponível em:<<http://www.whitemartins.com.br/site/fispq/WM040085.pdf>>. Acesso em: 20/10/2010.

ANEXO 1 - Emissão de Poluentes Atmosféricos não Controlados por Aterros Sanitários inseridos na categoria “Outros Poluentes”.

Na Tabela 25 estão apresentados os poluentes atmosféricos enquadrados na categoria “Outros Poluentes” na seção de potencial de emissão atmosférica, emissões não controladas.

Tabela 25 - Poluentes atmosféricos enquadrados na categoria “Outros Poluentes” de emissões não controladas em aterros

Componente do biogás de aterro	Massa Molecular [g.mol ⁻¹]	Concentração no biogás [ppmv]
<i>NMOC (as hexane)</i>	86,180	838,000
<i>1,1,1-Trichloroethanec</i>	133,400	0,243
<i>1,1,2,2-Tetrachloroethanec</i>	167,850	0,535
<i>1,1,2,3,4,4-Hexachloro-1,3-butadiene (Hexachlorobutadiene)c</i>	260,760	0,003
<i>1,1,2-Trichloro-1,2,2-Trifluoroethane (Freon 113)</i>	187,370	0,067
<i>1,1,2-Trichloroethanec</i>	133,400	0,158
<i>1,1-Dichloroethanec</i>	98,960	2,080
<i>1,1-Dichloroethene (1,1-Dichloroethylene)c</i>	96,940	0,160
<i>1,2,3-Trimethylbenzene</i>	120,190	0,359
<i>1,2,4-Trichlorobenzenec</i>	181,450	0,006
<i>1,2,4-Trimethylbenzene</i>	120,190	1,370
<i>1,2-Dibromoethane (Ethylene dibromide)c</i>	187,860	0,005
<i>1,2-Dichloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane (Freon 114)</i>	170,920	0,106
<i>1,2-Dichloroethane (Ethylene dichloride)c</i>	98,960	0,159
<i>1,2-Dichloroethene</i>	96,940	11,400
<i>1,2-Dichloropropanec</i>	112,990	0,052
<i>1,2-Diethylbenzene</i>	134,220	0,020
<i>1,3,5-Trimethylbenzene</i>	120,190	0,623
<i>1,3-Butadiene (Vinyl ethylene)c</i>	54,090	0,166
<i>1,3-Diethylbenzene</i>	134,220	0,066
<i>1,4-Diethylbenzene</i>	134,220	0,262
<i>1,4-Dioxane (1,4-Diethylene dioxide)c</i>	88,110	0,008
<i>1-Butene</i>	56,110	1,220
<i>2-Methylbutene</i>	70,130	1,220
<i>1-Butene</i>	56,110	1,100
<i>2-Methylpropene</i>	56,110	1,100
<i>1-Ethyl-4-methylbenzene (4-Ethyl toluene)</i>	120,190	0,989
<i>1-Ethyl-4-methylbenzene (4-Ethyl toluene) + 1,3,5-Trimethylbenzene</i>	120,190	0,579
<i>1-Heptene</i>	98,190	0,625
<i>2-Methyl-1-pentene</i>	84,160	0,089
<i>1-Hexene</i>	84,160	0,089
<i>1-Methylcyclohexene</i>	96,170	0,023
<i>1-Methylcyclopentene</i>	82,140	0,025
<i>1-Pentene</i>	70,130	0,220
<i>1-Propanethiol (n-Propyl mercaptan)</i>	76,160	0,125
<i>2,2,3-Trimethylbutane</i>	100,200	0,009
<i>2,2,4-Trimethylpentanec</i>	114,230	0,614
<i>2,2,5-Trimethylhexane</i>	128,260	0,156
<i>2,2-Dimethylbutane</i>	86,180	0,156
<i>2,2-Dimethylpentane</i>	100,200	0,061

Componente do biogás de aterro	Massa Molecular [g.mol ⁻¹]	Concentração no biogás [ppmv]
<i>2,2-Dimethylpropane</i>	72,150	0,027
<i>2,3,4-Trimethylpentane</i>	114,230	0,312
<i>2,3-Dimethylbutane</i>	86,180	0,167
<i>2,3-Dimethylpentane</i>	100,200	0,310
<i>2,4-Dimethylhexane</i>	114,230	0,222
<i>2,4-Dimethylpentane</i>	100,200	0,100
<i>2,5-Dimethylhexane</i>	114,230	0,166
<i>2,5-Dimethylthiophene</i>	112,190	0,064
<i>2-Butanone (Methyl ethyl ketone)c</i>	72,110	4,010
<i>2-Ethyl-1-butene</i>	84,160	0,018
<i>2-Ethylthiophene</i>	112,190	0,063
<i>2-Ethyltoluene</i>	120,190	0,323
<i>2-Hexanone (Methyl butyl ketone)</i>	100,160	0,613
<i>2-Methyl-1-butene</i>	70,130	0,179
<i>2-Methyl-1-propanethiol (Isobutyl mercaptan)</i>	90,190	0,170
<i>2-Methyl-2-butene</i>	70,130	0,303
<i>2-Methyl-2-propanethiol (tert-Butylmercaptan)</i>	90,190	0,325
<i>2-Methylbutane</i>	72,150	2,260
<i>2-Methylheptane</i>	114,230	0,716
<i>2-Methylhexane</i>	100,200	0,816
<i>2-Methylpentane</i>	86,180	0,688
<i>2-Propanol (Isopropyl alcohol)</i>	60,100	1,800
<i>3,6-Dimethyloctane</i>	142,280	0,785
<i>3-Ethyltoluene</i>	120,190	0,780
<i>3-Methyl-1-pentene</i>	84,160	0,007
<i>3-Methylheptane</i>	114,230	0,763
<i>3-Methylhexane</i>	100,200	1,130
<i>3-Methylpentane</i>	86,180	0,740
<i>3-Methylthiophene</i>	98,170	0,093
<i>4-Methyl-1-pentene</i>	84,160	0,023
<i>4-Methyl-2-pentanone (MIBK)c</i>	100,160	0,883
<i>4-Methylheptane</i>	114,230	0,249
<i>Acetaldehydec</i>	44,050	0,077
<i>Acetone</i>	58,080	6,700
<i>Acetonitrilec</i>	41,050	0,556
<i>Benzenec</i>	78,110	2,400
<i>Benzyl chloridec</i>	126,580	0,018
<i>Bromodichloromethane</i>	163,830	0,009
<i>Bromomethane (Methyl bromide)c</i>	94,940	0,021
<i>Butane</i>	58,120	6,220
<i>Carbon disulfidec</i>	76,140	0,147
<i>Carbon tetrachloridec</i>	153,820	0,008
<i>Carbon tetrafluoride (Freon 14)</i>	88,000	0,151
<i>Carbonyl sulfide (Carbon oxysulfide)c</i>	60,080	0,122
<i>Chlorobenzene</i>	112,560	0,484
<i>Chlorodifluoromethane (Freon 22)c</i>	86,470	0,796
<i>Chloroethane (Ethyl chloride)c</i>	64,510	3,950
<i>Chloromethane (Methyl chloride)c</i>	50,490	0,244
<i>cis-1,2-Dichloroethene</i>	96,940	1,240
<i>cis-1,2-Dimethylcyclohexane</i>	112,210	0,081
<i>cis-1,3-Dichloropropene</i>	110,970	0,003
<i>cis-1,3-Dimethylcyclohexane</i>	112,210	0,501
<i>cis-1,4-Dimethylcyclohexane /</i>	112,210	0,248
<i>trans-1,3-Dimethylcyclohexane</i>	112,210	0,248
<i>cis-2-Butene</i>	56,110	0,105
<i>cis-2-Heptene</i>	98,190	0,025
<i>cis-2-Hexene</i>	84,160	0,017

Componente do biogás de aterro	Massa Molecular [g.mol ⁻¹]	Concentração no biogás [ppmv]
<i>cis-2-Octene</i>	112,210	0,220
<i>cis-2-Pentene</i>	70,130	0,048
<i>cis-3-Methyl-2-pentene</i>	84,160	0,018
<i>Cyclohexane</i>	84,160	1,010
<i>Cyclohexene</i>	82,140	0,018
<i>Cyclopentane</i>	70,130	0,022
<i>Cyclopentene</i>	68,120	0,012
<i>Decane</i>	142,280	3,800
<i>Dibromochloromethane</i>	208,280	0,015
<i>Dibromomethane (Methylene dibromide)</i>	173,840	0,001
<i>Dichlorobenzenec,e</i>	147,000	0,940
<i>Dichlorodifluoromethane (Freon 12)</i>	120,910	1,180
<i>Dichloromethane (Methylene chloride)c</i>	84,930	6,150
<i>Diethyl sulfide</i>	90,190	0,086
<i>Dimethyl disulfide</i>	94,200	0,137
<i>Dimethyl sulfide</i>	62,140	5,660
<i>Dodecane (n-Dodecane)</i>	170,330	0,221
<i>Ethane</i>	30,070	9,050
<i>Ethanol</i>	46,070	0,230
<i>Ethyl acetate</i>	88,110	1,880
<i>Ethyl mercaptan (Ethanediol)</i>	62,140	0,198
<i>Ethyl methyl sulfide</i>	76,160	0,037
<i>Ethylbenzenec</i>	106,170	4,860
<i>Formaldehydec</i>	30,030	0,012
<i>Heptane</i>	100,200	1,340
<i>Hexanec</i>	86,180	3,100
<i>Hydrogen sulfide</i>	34,080	32,000
<i>Indane (2,3-Dihydroindene)</i>	34,080	0,067
<i>Isobutane (2-Methylpropane)</i>	58,120	8,160
<i>Isobutylbenzene</i>	134,220	0,041
<i>Isoprene (2-Methyl-1,3-butadiene)</i>	68,120	0,017
<i>Isopropyl mercaptan</i>	76,160	0,175
<i>Isopropylbenzene (Cumene)c</i>	120,190	0,430
<i>Mercury (total)c</i>	200,590	0,000
<i>Mercury (elemental)c</i>	200,590	0,000
<i>Mercury (monomethyl)c</i>	216,630	0,000
<i>Mercury (dimethyl)c</i>	258,710	0,000
<i>Methanethiol (Methyl mercaptan)</i>	48,110	1,370
<i>Methyl tert-butyl ether (MTBE)c</i>	88,150	0,118
<i>Methylcyclohexane</i>	98,190	1,290
<i>Methylcyclopentane</i>	84,160	0,650
<i>Naphthalenec</i>	128,170	0,107
<i>n-Butylbenzene</i>	134,220	0,068
<i>Nonane</i>	128,260	2,370
<i>n-Propylbenzene (Propylbenzene)</i>	120,190	0,413
<i>Octane</i>	114,230	1,080
<i>p-Cymene (1-Methyl-4-Isopropylbenzene)</i>	134,220	3,580
<i>Pentane</i>	72,150	4,460
<i>Propane</i>	44,100	15,500
<i>Propene</i>	42,080	3,320
<i>Propyne</i>	40,060	0,038
<i>sec-Butylbenzene</i>	134,220	0,068
<i>Styrene (Vinylbenzene)c</i>	104,150	0,411
<i>Tetrachloroethylene (Perchloroethylene)c</i>	165,830	2,030
<i>Tetrahydrofuran (Diethylene oxide)</i>	72,110	0,969
<i>Thiophene</i>	84,140	0,349
<i>Toluene (Methyl benzene)c</i>	92,140	29,500

Componente do biogás de aterro	Massa Molecular [g.mol ⁻¹]	Concentração no biogás [ppmv]
<i>trans-1,2-Dichloroethene</i>	96,940	0,029
<i>trans-1,2-Dimethylcyclohexane</i>	112,210	0,404
<i>trans-1,3-Dichloropropene</i>	110,970	0,009
<i>trans-1,4-Dimethylcyclohexane</i>	112,210	0,205
<i>trans-2-Butene</i>	56,110	0,104
<i>trans-2-Heptene</i>	98,190	0,003
<i>trans-2-Hexene</i>	84,160	0,021
<i>trans-2-Octene</i>	112,210	0,241
<i>trans-2-Pentene</i>	70,130	0,035
<i>trans-3-Methyl-2-pentene</i>	84,160	0,016
<i>Tribromomethane (Bromoform)c</i>	252,730	0,012
<i>Trichloroethylene (Trichloroethene)c</i>	131,390	0,828
<i>Trichlorofluoromethane (Freon 11)</i>	137,370	0,248
<i>Trichloromethane (Chloroform)c</i>	119,380	0,071
<i>Undecane</i>	156,310	1,670
<i>Vinyl acetatec</i>	86,090	0,248
<i>Vinyl chloride (Chloroethene)c</i>	62,500	1,420
<i>Xylenes (o-, m-, p-, mixtures)</i>	106,170	9,230

Fonte: Retirado integralmente de EPA (2008).

ANEXO 2 - Emissão de Poluentes Atmosféricos inseridos na categoria “Outros Poluentes” por Combustão de RSU.

Na estão Tabela 26 apresentados os poluentes enquadrados na categoria “Outros Poluentes” por incineraçaõ de RSU.

Tabela 26 - Poluentes atmosféricos enquadrados na categoria “Outros Poluentes” por incineraçaõ de RSU

Poluente	Fator de Emissãõ [kg _{poluente} ·Mg _{RSU} ⁻¹]
As	0,0003906432
Cd	0,0007889289
CDD/CDF ^a	0,0000022289
Cr	0,0009396432
HCl	0,5550017861
Hg	0,0006017861
Ni	0,0006353575
Pb	0,0147875004
Componentes Orgânicos Totais	9,7500011311

^a *tetra- through octa- chlorinated dibenzo-p-dioxin/chlorinated dibenzofurans*
 Fonte: Adaptado de EPA (2008).

ANEXO 3 - Tabela com os resultados que possibilitaram obter os cenários de potencial de emissão de poluentes atmosféricos.

Na Tabela 27 estão apresentados os resultados que permitiram a elaboração dos cenários de potencial de emissão de poluentes atmosféricos.

Tabela 27 - Resultados para o potencial de emissão de poluentes atmosféricos para os cenários: Aterro, Aterro (Rec.), Incineração, Compostagem, Biodigestão e Biodigestão (Rec.)

Emissões de Poluentes Atmosféricos de 1990 a 2010					
Cenário "Aterro" [kg]					
Ano	CO	NO _x	MP	SO ₂	Outros Poluentes
1990	1.419	0	0	0	218.650
1991	2.780	0	0	0	428.523
1992	4.104	0	0	0	632.568
1993	5.407	0	0	0	833.296
1994	6.701	0	0	0	1.032.855
1995	8.001	0	0	0	1.233.079
1996	9.314	0	0	0	1.435.536
1997	10.651	0	0	0	1.641.573
1998	12.019	0	0	0	1.852.345
1999	13.423	0	0	0	2.068.845
2000	14.871	0	0	0	2.291.926
2001	16.366	0	0	0	2.522.328
2002	17.912	0	0	0	2.760.685
2003	19.514	0	0	0	3.007.547
2004	21.174	0	0	0	3.263.389
2005	22.895	0	0	0	3.528.624
2006	24.679	0	0	0	3.803.608
2007	26.528	0	0	0	4.088.650
2008	28.445	0	0	0	4.384.015
2009	30.430	0	0	0	4.689.934

Emissões de Poluentes Atmosféricos de 2010 a 2030					
Cenário "Aterro" [kg]					
Ano	CO	NO _x	MP	SO ₂	Outros Poluentes
2010	194.176	138.436	52.215	0	5.006.604
2011	206.753	147.403	55.597	0	5.330.879
2012	219.640	156.590	59.063	0	5.663.143
2013	232.848	166.007	62.614	0	6.003.713
2014	246.389	175.661	66.256	0	6.352.851
2015	260.271	185.558	69.989	0	6.710.772
2016	274.500	195.702	73.815	0	7.077.648
2017	289.081	206.098	77.736	0	7.453.614
2018	304.019	216.748	81.753	0	7.838.776

2019	319.317	227.654	85.866	0	8.233.209
2020	334.976	238.819	90.077	0	8.636.965
2021	350.999	250.241	94.386	0	9.050.077
2022	367.384	261.923	98.792	0	9.472.554
2023	384.132	273.864	103.296	0	9.904.391
2024	401.243	286.063	107.897	0	10.345.568
2025	418.714	298.519	112.595	0	10.796.047
2026	436.545	311.231	117.390	0	11.255.781
2027	454.732	324.197	122.280	0	11.724.709
2028	473.272	337.415	127.266	0	12.202.760
2029	492.164	350.884	132.346	0	12.689.852
2030	511.402	364.600	137.519	0	13.185.893

Cenário "Aterro (Rec.)" [kg]

Ano	CO	NO _x	MP	SO ₂	Outros Poluentes
2010	407.466	321.049	121.093	0	5.006.604
2011	433.857	341.843	128.936	0	5.330.879
2012	460.899	363.150	136.972	0	5.663.143
2013	488.616	384.989	145.210	0	6.003.713
2014	517.031	407.377	153.654	0	6.352.851
2015	546.160	430.329	162.311	0	6.710.772
2016	576.019	453.855	171.185	0	7.077.648
2017	606.617	477.964	180.278	0	7.453.614
2018	637.964	502.662	189.594	0	7.838.776
2019	670.065	527.955	199.134	0	8.233.209
2020	702.925	553.846	208.899	0	8.636.965
2021	736.546	580.337	218.891	0	9.050.077
2022	770.930	607.429	229.109	0	9.472.554
2023	806.075	635.120	239.554	0	9.904.391
2024	841.981	663.411	250.225	0	10.345.568
2025	878.643	692.298	261.120	0	10.796.047
2026	916.059	721.778	272.240	0	11.255.781
2027	954.223	751.848	283.581	0	11.724.709
2028	993.129	782.503	295.144	0	12.202.760
2029	1.032.772	813.738	306.925	0	12.689.852
2030	1.073.142	845.547	318.923	0	13.185.893

Cenário "Incineração" [kg]

Ano	CO	NO _x	MP	SO ₂	Outros Poluentes
2010	250.454.783	23.051.405	147.172.286	13.737.724	145.773.300
2011	258.557.789	23.779.201	151.943.010	14.183.772	149.759.345
2012	266.783.895	24.520.611	156.784.898	14.636.370	153.909.717
2013	275.132.516	25.275.216	161.697.793	15.095.519	158.209.297
2014	283.603.156	26.042.663	166.681.562	15.561.219	162.645.331
2015	292.195.399	26.822.656	171.736.092	16.033.469	167.207.058
2016	300.908.891	27.614.942	176.861.289	16.512.270	171.885.399
2017	309.743.337	28.419.311	182.057.073	16.997.621	176.672.695
2018	318.698.486	29.235.583	187.323.377	17.489.522	181.562.484

2019	327.774.126	30.063.608	192.660.143	17.987.975	186.549.315
2020	336.970.078	30.903.259	198.067.324	18.492.977	191.628.588
2021	346.286.193	31.754.428	203.544.879	19.004.530	196.796.424
2022	355.722.343	32.617.025	209.092.774	19.522.634	202.049.547
2023	365.278.421	33.490.973	214.710.981	20.047.288	207.385.197
2024	374.954.337	34.376.208	220.399.474	20.578.493	212.801.043
2025	384.750.014	35.272.676	226.158.234	21.116.248	218.295.119
2026	394.665.389	36.180.331	231.987.243	21.660.553	223.865.767
2027	404.700.406	37.099.134	237.886.487	22.211.409	229.511.588
2028	414.855.021	38.029.052	243.855.953	22.768.816	235.231.401
2029	425.129.194	38.970.059	249.895.631	23.332.773	241.024.211
2030	435.522.893	39.922.130	256.005.512	23.903.281	246.889.176

Cenário "Compostagem" e "Biodigestão" [kg]

Ano	CO	NO _x	MP	SO ₂	Outros Poluentes
2010	153.458	109.407	41.266	0	3.956.732
2011	129.467	92.303	34.815	0	3.338.156
2012	109.227	77.872	29.372	0	2.816.284
2013	92.151	65.698	24.780	0	2.376.000
2014	77.744	55.427	20.906	0	2.004.548
2015	65.590	46.762	17.638	0	1.691.166
2016	55.336	39.451	14.880	0	1.426.778
2017	46.685	33.284	12.554	0	1.203.722
2018	39.387	28.080	10.591	0	1.015.538
2019	33.229	23.690	8.936	0	856.774
2020	28.034	19.987	7.539	0	722.830
2021	23.652	16.862	6.360	0	609.826
2022	19.954	14.226	5.366	0	514.489
2023	16.834	12.002	4.527	0	434.056
2024	14.203	10.126	3.819	0	366.198
2025	11.982	8.543	3.222	0	308.948
2026	10.109	7.207	2.718	0	260.649
2027	8.529	6.080	2.293	0	219.900
2028	7.195	5.130	1.935	0	185.522
2029	6.070	4.328	1.632	0	156.518
2030	5.121	3.651	1.377	0	132.049

Cenário "Biodigestão (Rec.)" [kg]

Ano	CO	NO _x	MP	SO ₂	Outros Poluentes
2010	182.041	133.878	50.496	0	3.956.732
2011	158.978	117.569	44.344	0	3.338.156
2012	139.679	103.945	39.206	0	2.816.284
2013	123.558	92.589	34.922	0	2.376.000
2014	110.121	83.147	31.361	0	2.004.548
2015	98.949	75.323	28.410	0	1.691.166
2016	89.691	68.866	25.975	0	1.426.778
2017	82.050	63.562	23.974	0	1.203.722
2018	75.775	59.235	22.342	0	1.015.538

2019	70.655	55.733	21.021	0	856.774
2020	66.511	52.929	19.964	0	722.830
2021	63.192	50.716	19.129	0	609.826
2022	60.573	49.003	18.483	0	514.489
2023	58.545	47.713	17.996	0	434.056
2024	57.018	46.783	17.646	0	366.198
2025	55.916	46.158	17.410	0	308.948
2026	55.176	45.792	17.272	0	260.649
2027	54.741	45.647	17.217	0	219.900
2028	54.568	45.689	17.233	0	185.522
2029	54.616	45.892	17.309	0	156.518
2030	54.854	46.231	17.437	0	132.049
