

Bruna Patrícia de Oliveira

Estimativa de emissões de gases de efeito estufa provenientes da disposição de resíduos sólidos municipais em Sorocaba-SP e a potência disponível nessas emissões.

Sorocaba / SP

2009

Bruna Patrícia de Oliveira

Estimativa de emissões de gases de efeito estufa provenientes da disposição de resíduos sólidos municipais em Sorocaba-SP e a potência disponível nessas emissões.

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:

Sorocaba / SP

2009

Bruna Patrícia de Oliveira

Estimativa de emissões de gases de efeito estufa provenientes da disposição de resíduos sólidos municipais em Sorocaba-SP e a potência disponível nessas emissões.

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, 25 de junho de 2009.

Orientador – Prof. Dr. André Henrique Rosa.

Banca examinadora – Prof. Dr. Leonardo Fernandes Fraceto.

Banca examinadora – Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini.

Sorocaba / SP

2009

Sumário

| | |
|--|----|
| Acrônimos | 7 |
| Abreviaturas e unidades de medida | 8 |
| Listas de tabelas | 9 |
| Lista de figuras | 10 |
| Lista de equações | 11 |
| Agradecimentos | 12 |
| Resumo | 13 |
| Abstract | 14 |
| Introdução | 15 |
| O resíduo sólido no Brasil | 15 |
| A classificação dos resíduos..... | 16 |
| Fatores que influenciam as características dos resíduos: | 17 |
| Os resíduos sólidos e a emissão de biogás | 19 |
| O efeito estufa | 21 |
| Mudanças climáticas..... | 22 |
| UNFCCC..... | 23 |
| Protocolo de Quioto | 23 |
| Geração de energia pelo gás de lixo (GDL)..... | 25 |
| Projeto para uso do biogás do aterro | 26 |
| Estimativa do potencial de consumo | 26 |
| Coleta | 27 |
| Tratamento | 28 |
| Compressão | 28 |
| Transporte | 29 |
| Queimador | 29 |
| Custo simplificado do projeto..... | 30 |

| | |
|---|----|
| O estudo de caso: O aterro de Sorocaba..... | 31 |
| A cidade de Sorocaba..... | 31 |
| O aterro municipal da cidade | 32 |
| Os índices que qualidade de operação do aterro (IQR)..... | 33 |
| Objetivo | 34 |
| Método | 35 |
| Estimativa do biogás gerado pelo modelo First Order Decay (FOD) | 35 |
| Estimativa de potência do fluxo de biogás | 40 |
| A planilha | 41 |
| Dados..... | 42 |
| Para a estimativa das emissões do CH ₄ do aterro | 42 |
| A constante de decaimento (k) | 42 |
| Taxa de RSU disposto no aterro (R _x) | 44 |
| Fator de correção do CH ₄ (MCF) | 46 |
| Carbono orgânico degradável (DOC) | 48 |
| Fração de carbono orgânico dissociado (DOC _f) | 49 |
| Fração de CH ₄ em um aterro (F)..... | 49 |
| Potencial de CH ₄ gerado (L ₀) | 50 |
| Metano recuperado (R)..... | 50 |
| Fator de oxidação (OX)..... | 51 |
| Para a estimativa da potência disponível de biogás | 52 |
| Incertezas..... | 53 |
| Incertezas associadas ao método..... | 53 |
| Incertezas associadas aos parâmetros..... | 53 |
| Fator de correção de CH ₄ (MCF) | 55 |
| Carbono orgânico degradável (DOC) | 55 |
| Fração de degradabilidade de carbono orgânico, que decompõe (DOC _f) | 55 |

| | |
|--|----|
| Fração de CH ₄ no GDL (F) | 55 |
| Recuperação de metano (R)..... | 56 |
| Fator de oxidação (OX)..... | 56 |
| A meia-vida (k)..... | 56 |
| Resultados e análises | 57 |
| Conclusão | 65 |
| Anexos | 66 |
| Anexo A - Conversão da massa de CH ₄ (Gg) para volume (m ³) | 66 |
| Anexo B - Composições de RSU | 69 |
| Referências da Tabela 16..... | 70 |
| Referências bibliográficas | 71 |
| Páginas da Internet..... | 73 |

Acrônimos

| | |
|---------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABRELPE | Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais |
| CEMPRE | Compromisso Empresarial para Reciclagem |
| CEPAGRI | Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura |
| CETESB | Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental |
| CDM | Clean Development Mechanism |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| COV | Carbono Orgânico Volátil |
| EIA | Estudo de Impacto Ambiental |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| GDL | Gás de lixo |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GWP | Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential) |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| IPCC | Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change) |
| LDRSM | Locais de Disposição de Resíduos Sólidos Municipais |
| MCT | Ministério da Ciência e Tecnologia |
| MDL | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo |
| MSW | Municipal Solid Waste |
| NUPLAN | Núcleo de Planejamento de Sorocaba |
| NBR | Norma Brasileira |
| RCE | Redução Certificada de Emissões |
| RSM | Resíduo Sólido Municipal |
| SEADE | Sistema Estadual de Análise de Dados |
| SNIS | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento |
| UNFCCC | Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (United Nations Framework Convention on Climate Change) |
| URBES | Empresa de Desenvolvimento Urbano e Social de Sorocaba |

Abreviaturas e unidades de medida

| | | |
|------|-------------|--------------------------------|
| k = | quilo = | 10^3 |
| M = | mega = | 10^6 |
| G = | giga = | 10^9 |
| g = | grama = | 10^0g |
| Kg = | kilograma = | 1000g |
| t = | tonelada = | $1000\text{kg} = 10^6\text{g}$ |
| Gg = | gigagrama = | $1000\text{t} = 10^9\text{g}$ |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Composição média do biogás em aterros | 21 |
| Tabela 2 – Potencial de Aquecimento Global (GWP)..... | 22 |
| Tabela 3 –Avaliação das Condições dos aterros municipais por meio do IQR | 33 |
| Tabela 4 – Dados da constante de decaimento (k) | 43 |
| Tabela 5 – Dados de população municipal | 45 |
| Tabela 6 - Dados de população regional..... | 45 |
| Tabela 7 – Geração de RSU per capita para 1970 em função da população urbana. | 45 |
| Tabela 8 – Dados default do IPCC para o MCF | 47 |
| Tabela 9 – IQR do Aterro Municipal de Sorocaba (1997 -2008)..... | 48 |
| Tabela 10 – Frações de Carbono orgânico degradável (DOC) por diferentes tipos de resíduos | 48 |
| Tabela 11 – Dados de fatores de Oxidação (OX) para LDRSM. | 51 |
| Tabela 12 - Dados para a estimativa de potência do fluxo de biogás. | 52 |
| Tabela 13 – Emissões de CH ₄ no aterro (Gg de CH ₄) | 59 |
| Tabela 14 – Emissões evitada (tCO _{2eq})..... | 60 |
| Tabela 15 – Dados para a conversão de massa de CH ₄ emitido, para volume..... | 67 |
| Tabela 16 - Composições de RSU | 69 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Destinação do resíduo sólido brasileiro..... | 15 |
| Figura 2 - Composição do biogás de aterro ao longo do tempo..... | 19 |
| Figura 3- Projetos de MDL no mundo. | 25 |
| Figura 4 - Projeto simplificado para o uso de biogás..... | 27 |
| Figura 5 - Coleta de biogás em aterro..... | 27 |
| Figura 6 - Tratamento..... | 28 |
| Figura 7 - Compressor. | 29 |
| Figura 8 - Transporte do gás..... | 29 |
| Figura 9 - Flare..... | 30 |
| Figura 10 – Aterro São João, Sorocaba/SP. | 32 |
| Figura 11- Geração de RSU em 1970..... | 37 |
| Figura 12 - Planilha empregada para realizar as estimativas de CH ₄ gerado e potência disponível no aterro de Sorocaba..... | 41 |
| Figura 13 – Totais anuais de chuva em Sorocaba (1965-2000)..... | 43 |
| Figura 14 - RSU coletado em Sorocaba (1970 a 2007) | 46 |
| Figura 15 - Emissões de CH ₄ para recuperação a partir de 2010. | 57 |
| Figura 16 - Emissões de CH ₄ para recuperação a partir de 2013. | 58 |
| Figura 17 - Potência disponível..... | 62 |
| Figura 18 - Potência disponível..... | 62 |
| Figura 19 - Potência disponível..... | 63 |

Lista de equações

| | |
|--|----|
| Equação 1 – Conversão de CH ₄ a CO ₂ | 22 |
| Equação 2- Consumo energético | 26 |
| Equação 3- Consumo energético total mensal..... | 26 |
| Equação 4 – Número de drenos..... | 27 |
| Equação 5 – Tubulação total de drenagem..... | 27 |
| Equação 6 – Estimativa de geração..... | 35 |
| Equação 7 – Estimativa da constante de | 35 |
| Equação 8 – Normalização de soma..... | 35 |
| Equação 9 - Geração de RSU em 1970..... | 37 |
| Equação 10 – Transição da TaxaRSU do ano de 1970 para a TaxaRSU do ano de 2007 | 37 |
| Equação 11 – Estimativa populacional..... | 37 |
| Equação 12 – Estimativa do índice de crescimento populacional | 38 |
| Equação 13 – Estimativa de geração de CH ₄ pelos resíduos sólidos | 38 |
| Equação 14 – Estimativa do Potencial de geração de CH ₄ (L ₀) | 38 |
| Equação 15 – Estimativa de Carbono Orgânico Degradável (DOC)..... | 38 |
| Equação 16 – Estimativa da fração assimilada do DOC..... | 39 |
| Equação 17 - Estimativa linearizada de L ₀ | 39 |
| Equação 18 – Somatório das estimativas anuais de emissão de CH ₄ | 40 |
| Equação 19 – Potência disponível | 40 |
| Equação 20 – TaxaRSU para o ano período de 1970 a 2007..... | 46 |
| Equação 21 – Estimativa linearizada de L ₀ para o período de 1986 a 2013..... | 50 |
| Equação 22 – Equação de estado dos gases perfeitos | 66 |
| Equação 23 - Volume ocupado por uma massa qualquer de CH ₄ | 67 |

Agradecimentos

Agradeço a DEUS e aos meus pais (Cida e José Djalma) pelo apoio, ao meu irmão Alisson, ao orientador André Henrique Rosa, ao amigo João Wagner Silva Alves pela motivação e contribuições, a todos os professores e funcionários da UNESP Sorocaba, em especial ao Prof. Antônio Cesar Germano Martins, Prof. Sandro Donnini Mancini, Prof. Leonardo Fernandes Fraceto, Prof. José Arnaldo Frutuoso Roveda, Prof^a. Luiza Amália Pinto Cantão, Prof^a. Marcela Pellegrini Peçanha, Prof. Volney, Prof. José R. R. Bortoleto, ao Lucas Zago, a Célia, a Janete e ao João. Aos amigos Carlos Simões, Eliane da Cruz, Eduardo Shimabokuro, George Henrique Magalhães Cunha, Francisco do Espírito Santo, Sônia Maria Manso Vieira e Josilene Ferrer pelas contribuições. As amigas da $\Theta\Sigma\pi \int \Sigma\beta\theta$ (Érica Tachibana, Késia Dell Ducas e Fernanda Bello) e a Fabiane Godoy pela amizade e companheirismo. Aos amigos da 3^o turma de Engenharia Ambiental da UNESP Sorocaba, em especial a REP .G que por muitas vezes fizeram as aulas e as festas muito mais divertidas. Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para conclusão deste trabalho, para a minha formação como Engenheira ou para o meu crescimento pessoal, OBRIGADA!

Resumo

Este estudo apresenta uma estimativa das emissões de CH₄ no aterro de Sorocaba e a possível potência gerada com o aproveitamento deste gás.

O atual aterro encontra-se com sua capacidade praticamente esgotada, sua previsão de fechamento é para o final de 2.012, porém os resíduos depositados, gerarão CH₄ por aproximadamente trinta anos após seu fechamento.

Nesse estudo, é aplicado o método de estimativa de emissões do IPCC e são reunidas as melhores informações disponíveis para esse levantamento. Tal prática se deve à elevação da concentração dos gases de efeito estufa. O CH₄ tem GWP 21 superior ao do CO₂.e é um dos principais gases de efeito estufa.

Hoje, o Brasil conta com quase 30 projetos de recuperação e uso de biogás no âmbito do Protocolo de Quioto e MDL e o aterro de Sorocaba tem plenas condições para ser mais um projeto nesse contexto.

Abstract

This study shows an estimate of methane emission at Sorocaba's landfill and possibilities power generation through the energy use of this gas.

The current landfill is almost finished, its forecast for closing is to end of 2,012. However, the waste remaining in this landfill, will generate methane for almost thirty years after its closing.

In this study is used the IPCC methodology to estimate CH₄ emission and is used the best available data to perform its estimative. The methane recovery and its destruction is increasing all around the world because the rising of level of concentration of greenhouse gases in the atmosphere. The CH₄ has GWP 21, if compared with CO₂. Also, the CH₄ is one of the most important greenhouse gases.

Today, there are almost 30 CDM projects in Brazil about CH₄ destruction. The Sorocaba's Landfill is ready to become one more CDM project in this country.

Introdução

O resíduo sólido no Brasil

O território brasileiro está dividido em cinco grandes regiões: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, totalizando uma extensão territorial de aproximadamente 8 514 466,6 Km². Diante de um extenso território e do fato de o Brasil ter uma economia caracterizada por grande desigualdade social, é pertinente que ocorra uma variação nas formas de disposição final e perfis qualitativos e quantitativos dos resíduos nas diferentes regiões.

As diferenças regionais, físicas e econômicas, não permitem o estabelecimento de uma política nacional de gerenciamento e dificultam as obtenções de dados estatísticos. (ALVES; VIEIRA, 2000).

Observa-se na Figura 1, a destinação dos resíduos sólidos brasileiros, segundo a ABRELPE, em 2007.

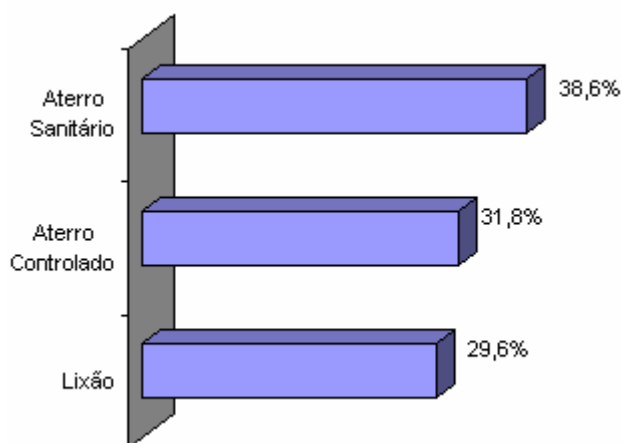


Figura 1 – Destinação do resíduo sólido brasileiro

Fonte: ABRELPE, 2007, Adaptado.

Nas estimativas serão considerados apenas os resíduos sólidos urbanos que segundo a ABRELPE em 2007 são definidos como:

Resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos de saúde, industriais e dos portos, aeroportos e zonas de fronteira e ainda aqueles estabelecidos em legislação específica de responsabilidade exclusiva de seu gerador.

A classificação dos resíduos

A classificação mais usual para os resíduos sólidos é de acordo com a periculosidade, ABNT/NBR 10.004/04:

- Resíduos classe I – Perigosos;
- Resíduos classe II – Não perigosos;
- Resíduos classe II A – Não inertes e
- Resíduos classe II B – Inertes.

Os resíduos classe I são aqueles que apresentam periculosidade como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Os resíduos classe II, são considerados não perigosos e dividem-se em classe II A - Não Inertes e classe II B - Inertes.

Os resíduos pertencentes a classe II A podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, já os inseridos na classe II B, correspondem aos resíduos inertes. Nesta classe enquadram-se os resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10.007 e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados de forma a ocasionar concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção dos parâmetros de cor, dureza, sabor e turbidez (ABNT, 2004).

Porém, para a realização das estimativas, tal classificação não será a mais adequada. Para que fosse possível a aplicação do método IPCC 2000 na estimativa de emissões de GEE no aterro de Sorocaba foi necessária uma classificação a qual permitia o enquadramento dos resíduos em quatro categorias principais, representados por:

- Papéis e têxteis;
- Folhas, podas de Jardim e material putrescível não alimentar;
- Resíduos alimentares;
- Madeira e palha;

Segundo o IPCC (2000), apenas estas categorias são empregadas para as estimativas das emissões. Os demais resíduos foram classificados como Inertes e Fósseis, não influenciando as estimativas de GEE

Fatores que influenciam as características dos resíduos:

Os resíduos sólidos sofrem influência de diversos fatores, sejam culturais, econômicos e sociais. Observam-se no Quadro 1, alguns desses fatores e suas possíveis influências nas análises gravimétricas.

Quadro 1 – Fatores que influenciam as características do resíduo.

| Fatores | Influência |
|---|---|
| Climáticos | |
| Chuva | Aumento dos teores de umidade |
| Outono | Aumento da quantidade de folhas |
| Verão | Aumento da quantidade de embalagens de bebidas (latas, vidros e plásticos) |
| Períodos comemorativos | |
| Carnaval /Ano Novo | Aumento da quantidade de embalagens (latas vidros e plásticos) |
| Natal/ Ano Novo/ Páscoa | Aumento de embalagens (papéis, papelão, plásticos e metais). Aumento de matéria orgânica. |
| Dia dos Pais/ Dias das mães/ Dia das crianças | Aumento de embalagens (papel, papelão,plásticos e metais). |
| Férias escolares | Esvaziamento de áreas da cidade em locais não turísticos, conseqüentemente,diminuição da geração de resíduos. Aumento populacional em locais turísticos, conseqüentemente, aumento da geração de resíduos. |
| Demográficos | |
| População urbana | Quanto maior a população urbana, maior é a geração Per Capta. |
| Socio econômicos | |
| Nível cultural/ Nível educacional | Quanto maior o nível cultural maior é a incidência de materiais inorgânicos e menor a de matéria orgânica. |
| Poder aquisitivo | Quanto maior o poder aquisitivo, maior é a incidência de materiais inorgânicos e menor a de matéria orgânica. |
| Poder aquisitivo (periódico) | Maior consumo de supérfluos em períodos próximos a recebimentos de salário e finais de semana. |
| Desenvolvimento tecnológico | Introdução de materiais cada vez mais leves, reduzindo o peso específico aparente dos resíduos |
| Lançamento de novos produtos | Aumentos de embalagens |
| Promoções de lojas comerciais | Aumento de embalagens |
| Campanhas ambientais | Redução de materiais não-biodegradáveis e aumento de materiais recicláveis e/ou biodegradáveis. |

Fonte: Adaptado IBAM, 2001.

Os resíduos sólidos e a emissão de biogás

O biogás ou gás de lixo (GDL) é produto da decomposição anaeróbia de matéria orgânica e pode ser emitido durante anos até que a matéria orgânica seja decomposta. A composição dos principais constituintes do biogás é variável ao longo do tempo, como visto na Figura 2 e sua formação apresenta-se por meio de fases:

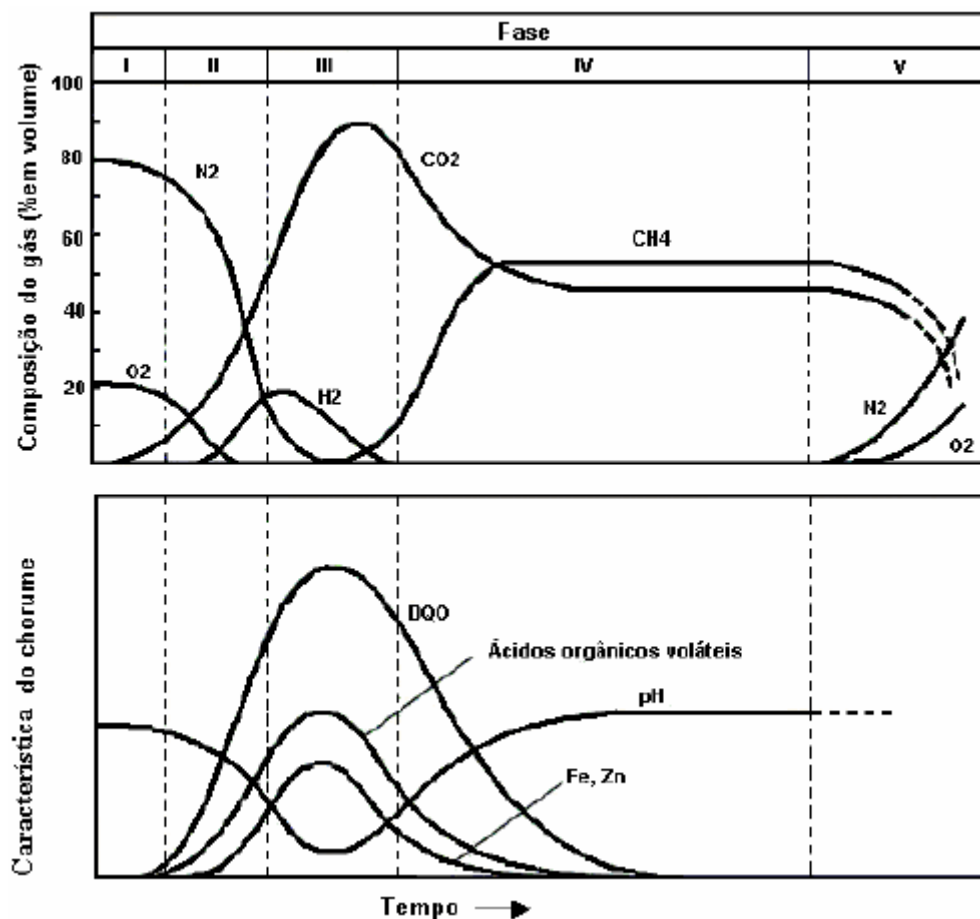


Figura 2 - Composição do biogás de aterro ao longo do tempo

Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) apud Ensinas (2003).

Segundo Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) apud Ensinas (2003), as fases apresentadas no gráfico correspondem a:

1. Fase I (Ajuste inicial): A decomposição da matéria orgânica ocorre principalmente em condições aeróbias e os microrganismos para o desenvolvimento do processo, são provenientes da terra utilizada como cobertura dos resíduos.
2. Fase II (Transição): A quantidade de oxigênio no interior do aterro decai e as reações anaeróbias intensificam-se. As reações de oxido redução podem ser

monitoradas e com a queda do potencial de oxidação-redução; os microorganismos responsáveis pela conversão de matéria orgânica em CH₄ e em gás carbônico, iniciam a transformação do material em ácidos orgânicos e outros produtos. Nessa fase o pH do chorume cai devido a presença desses ácidos e das elevadas concentrações de CO₂.

3. Fase III (Ácida): Com maiores quantidades de ácidos orgânicos e menores de gás hidrogênio, as reações da fase de Transição são aceleradas. Primeiramente, ocorre a hidrólise de compostos de maior massa molecular (lipídeos, polissacarídeos, ácidos nucleicos e proteínas). A segunda etapa seria acidogênese, que envolve a transformação dos produtos resultantes da primeira etapa, em compostos de massa molecular menor como ácido acético e alguns outros de maior complexidade. Devido a dissolução de ácidos orgânicos no chorume, a DBO, a DQO e a condutividade aumentam significativamente. Nessa fase, metais pesados são solubilizados e o CO₂ é o principal gás gerado.
4. Fase IV (Metanogênica) – Ocorre a formação de ácidos, CH₄ e CO₂ por microorganismos estritamente anaeróbios. O pH dessa fase tende a ser mais básico, variando de 6,8 a 8,0.
5. Fase V (Maturação) – Nessa fase, grande parte do material orgânico foi convertido em CH₄ e CO₂, a taxa de geração de gás diminui, dependendo as medidas de fechamento do aterro, podem-se encontrar pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio.

A duração de cada fase depende da disposição de material no aterro, teor de umidade, compactação e disponibilidade de nutrientes, Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) apud Ensinas (2003).

O biogás em aterros apresenta a seguinte composição média:

Tabela 1 - Composição média do biogás em aterros

| Composição | Porcentagem (Base seca) |
|-----------------------------|-------------------------|
| Metano | 45-60 |
| Dióxido de Carbono | 40-60 |
| Nitrogênio | 2-5 |
| Oxigênio | 0,1-1 |
| Enxofre, Mercaptanas | 0-1,0 |
| Amônia | 0,1-1,0 |
| Hidrogênio | 0-0,2 |
| Monóxido de Carbono | 0-0,2 |
| Gases em menos concentração | 0,01-0,6 |

Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) apud Ensinas (2003).

O efeito estufa

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente no planeta e é responsável pela temperatura da atmosfera terrestre. A Terra recebe incidência dos raios solares, estes, sofrem reflexões em partículas existentes na atmosfera, porém a maior parte deles incide sobre a superfície, aquecendo-a. Na superfície, os raios sofrem reflexão e a fração correspondente ao comprimento de onda na faixa do infravermelho, é absorvido por alguns gases que retêm esse calor, ocasionando o efeito estufa (ALVES, 2000).

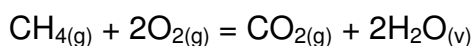
Os gases apresentados na Tabela 2 adaptada do IPCC (1995) representam os principais contribuintes para o aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE). A temperatura do planeta depende também de outros fatores, como quantidade de energia solar incidente, composição atmosférica, quantidade de aerossóis provenientes de emissões vulcânicas, entre outros (LEGGETT, 1.992 apud ALVES, 2000).

Tabela 2 – Potencial de Aquecimento Global (GWP) de alguns gases.

| Compostos | Fórmula Química | Tempo de vida (anos) | Potencial de Aquecimento Global (Horizonte de Tempo) | | |
|--------------------|--------------------|-------------------------|---|-----|-----|
| | | | 20 | 100 | 500 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | Variável | 1 | 1 | 1 |
| Metano | CH ₄ | 12±3 | 56 | 21 | 6,5 |
| Óxido nitroso | N ₂ O | 120 | 280 | 310 | 170 |

Fonte: Adaptado IPCC, 1995.

Os resíduos, quando dispostos em aterros sanitários, têm a decomposição anaeróbia favorecida, originando CH₄. A queima do gás, de acordo com a Equação 1, tem como produto o CO₂, que possui GWP inferior ao CH₄, como é observado na Tabela 2. Essa conversão pode gerar RCEs¹ ou créditos de carbono.



Equação 1 – Conversão de CH₄ a CO₂

Mudanças climáticas

Segundo o MMA em 2007, uma mudança climática é ocasionada por mudanças internas dentro dos sistemas climáticos ou na interação de seus componentes por razões naturais ou antrópicas e geralmente não é possível fazer atribuições claras as causas. As projeções de mudanças climáticas do IPCC geralmente consideram apenas a influência sobre o clima dos gases de efeito estufa provenientes de ações antrópicas (IPCC apud MMA, 2007).

A temperatura média global da superfície, incluindo os oceanos, aumentou aproximadamente 0,6 °C no Século XX. No Brasil, para este mesmo século a temperatura média aumentou aproximadamente 0,75 °C. As temperaturas têm aumentado em todo o país alcançando até 1,4 °C por década. (MMA, 2007).

As mudanças climáticas, especialmente o aumento da temperatura, estão afetando o clima, os recursos hídricos, o nível do mar e os ecossistemas, sendo estes muitas

¹ Uma Redução Certificada de Emissão (RCE), é uma unidade emitida em conformidade com o Artigo 12 do Protocolo de Quioto, seus requisitos e disposições pertinentes. É igual a uma tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono, calculada com o uso dos potenciais de aquecimento global (CGEE, 2008).

vezes prejudicados irreversivelmente, além disso a saúde humana, a disponibilidade hídrica, o transporte fluvial e vêm desencadeando também desastres naturais (MMA, 2007).

UNFCCC

Uma resposta internacional à mudança climática tomou forma com a criação da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC, sigla em inglês), adotada em 1992, quando se realizou a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Eco-92 (CETESB, 2009).

A UNFCCC era bastante ampla e após a sua regulamentação foi instituído um Órgão Supremo da Convenção, a Conferência das Partes, na qual instituíam reuniões espaçadas e compostas de altos representantes diplomáticos dos Estados-Partes, com poderes inclusive de emendar a Convenção e referendar as decisões dos dois Órgãos Subsidiários (CETESB, 2009).

A Conferência das Partes – COP, é o órgão supremo da Convenção e tem a responsabilidade de manter regularmente sob exame a implementação da Convenção, assim como quaisquer instrumentos jurídicos que a Conferência das Partes vier a adotar (CETESB, 2009).

A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima foi adotada na Sede das Nações Unidas, na cidade de Nova York em 9 de maio de 1992.

No Brasil, foi aprovada pelo Congresso Nacional mediante o Decreto Legislativo n.º 1, de 03.02.1994 e promulgada pelo Decreto n.º 2.652, de 01.07.1998. A Convenção começou a vigorar em 21 de março de 1994, 90 dias após sua 50ª ratificação (CETESB, 2009).

Protocolo de Quioto

O Protocolo de Quioto surgiu na 3ª Conferência das Partes (COP-3) da UNFCCC. Esta conferência aconteceu no Japão na cidade de Quioto em 1997 (PROCLIMA, 2009).

O Protocolo entrou em vigor 90 dias após o cumprimento de duas exigências do próprio Protocolo. A primeira: a ratificação de pelo menos 55 das Partes. E a

segunda: que pelo menos 55% das emissões totais observadas em 1990 estivessem incluídas (PNUD, 2002).

O Protocolo de Quioto estabeleceu metas para que as emissões antrópicas fossem reduzidas. Essas metas foram diferenciadas entre os participantes e deveriam ser atingidas entre 2008 e 2012, primeiro período de compromisso. As metas foram atribuídas exclusivamente às Partes relacionadas no Anexo I da Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, devido principalmente a compromissos exclusivos e responsabilidades históricas. (MCT, 2008).

Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

O Protocolo de Quioto estabeleceu também, como complementação às medidas e políticas domésticas das Partes Anexo I, mecanismos adicionais de implementação permitindo que a redução das emissões e/ou o aumento da remoção de CO₂ pelas Partes Anexo I, fossem obtidos além de seus territórios, instituindo mecanismos adicionais como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), a Implementação Conjunta e o Comércio de Emissões.

Dentre estes mecanismos estabelecidos no protocolo de Quioto, o MDL é o único que permite a participação de países em desenvolvimento, como o Brasil. Os países que não possuem metas de reduções são geralmente países em desenvolvimento, chamados Partes Não Anexo I. (FGV, 2002).

As quantidades relativas à diminuição de emissões de GEE ou remoção de CO₂ podem resultar em Reduções Certificadas de Emissões (RCE). Essas RCEs representam créditos que podem ser comercializadas entre países Anexo I e Não Anexo I, tendo por principal finalidade um benefício econômico para os Não Anexo I e um auxílio para que os países do Anexo I cumpram suas metas para com o Protocolo (MCT, 2008).

Observa-se na Figura 3 a disposição mundial dos projetos de MDL.

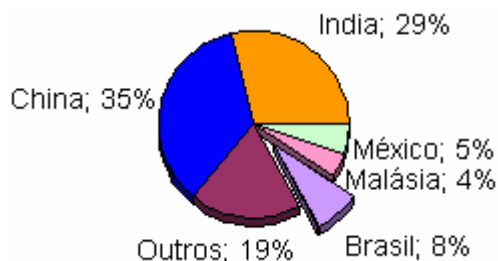


Figura 3- Projetos de MDL no mundo.

Fonte: MCT (2008).

O país ocupa a terceira posição em termos de reduções de emissões de gases de efeito estufa. Nesse cenário, o Brasil permanece atrás da China e da Índia. Nesses países a matriz energética é muito dependente do consumo de combustíveis fósseis, especialmente o carvão mineral, o que torna mais factível um projeto de redução de emissões. No caso brasileiro, essa viabilidade é menor, uma vez que possuímos uma matriz energética baseada em fontes hidroelétricas e com uso expressivo de combustíveis originados de biomassa renovável e, portanto, muito menos agressiva do ponto de vista de emissões de GEE (MIGUEZ, 2008).

Geração de energia pelo gás de lixo (GDL)

O aproveitamento do GDL para a geração de energia proporciona benefícios ambientais e econômicos. O GDL não é uma fonte renovável de energia, ao contrário das demais fontes energética, todos os esforços são voltados para que não se gere lixo, para que esse não seja colocado no aterro, para que não existam os aterros e, finalmente, não seja emitido o GDL. Como se sabe, a sociedade está longe de não gerar resíduos e de não necessitar da existência dos aterros. A boa prática recomenda que o GDL pode ser aproveitado de diferentes maneiras, seja para uso direto como combustível, para motores de combustão interna ou para o acionamento de turbinas na produção energética (GOLDEMBERG; NIGRO e COELHO, 2008).

No caso dos aterros sanitários, a implantação de um projeto para aproveitamento energético do biogás deve levar em consideração basicamente: vazão de CH₄ gerada, sistema de coleta, tratamento, compressão, queima e transporte (CETESB, 2006).

Projeto para uso do biogás do aterro

A estrutura para um projeto de uso do biogás de aterro foi baseada nas etapas sugeridas no Manual Biogás - Geração e uso energético 1.0 da CETESB (2006).

Estimativa do potencial de consumo

Uma visita ao aterro é necessária para se observar as condições do local e identificar possíveis usos internos para o biogás realizando um levantamento dos equipamentos que utilizam energia para o funcionamento, por eletricidade ou por queima direta de combustíveis fósseis como, carvão, óleo, GLP e gás natural.

No caso do aterro de Sorocaba, como possíveis consumidores externos existem indústrias e residências nas proximidades do aterro.

Para usos internos dos equipamentos elétricos realiza-se um levantamento das suas respectivas potências e tempo de uso. Utilizando a Equação 2, estima-se o consumo mensal de energia elétrica para cada equipamento e empregando a Equação 3 estima-se o consumo total mensal.

$$C = P.\Delta t.30 \quad \text{Equação 2- Consumo energético}$$

onde:

C = consumo energético [kW.h/mês]

P = potência do equipamento [W]

Δt = tempo de consumo [h/dia]

$$\sum C = \sum P.\Delta t.30 \quad \text{Equação 3- Consumo energético total mensal.}$$

Identificados os consumos, na Figura 4 abaixo sugere-se uma estrutura simplificada com as principais etapas de um projeto de captação e uso de biogás em aterros.

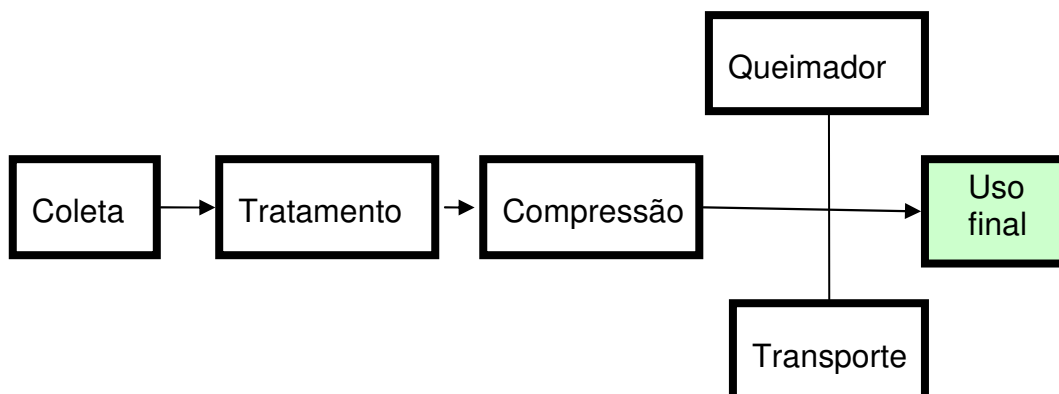


Figura 4 - Projeto simplificado para o uso de biogás
 Fonte: Adaptado, Programa BIOGÁS (CETESB, 2006).

Coleta

A coleta do gás inicia-se após o fechamento da célula de disposição de resíduos. O sistema pode ter a configuração de trincheiras horizontais ou poços verticais, o tipo mais utilizado. Os gases são transportados para um coletor principal (OLIVEIRA et al, 2006). A Figura 5, representa a disposição dos coletores verticais.

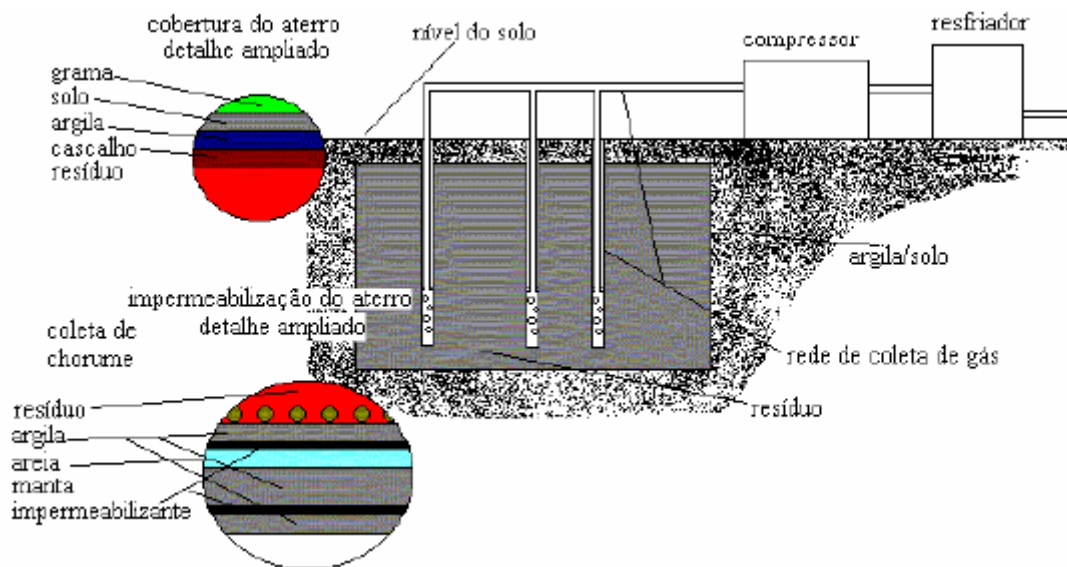


Figura 5 - Coleta de biogás em aterro.

Fonte: Adaptado (ALVES, 2000).

Para a coleta do biogás realiza - se a estimativa do número de drenos necessários:

$$N_d = \frac{A_a}{A_d} \quad \text{Equação 4 – Número de drenos}$$

onde,

$$A_a = \text{Área do aterro} \quad [m^2]$$

$$A_d = \text{Área de abrangência de um dreno} \quad [m^2]$$

$$A_d = \pi.r^2$$

$$r = \text{raio de abrangência do dreno} \quad [m]$$

N_d = número de drenos

$$T_d = (N_d - 1).50 \quad \text{Equação 5 – Tubulação total de drenagem}$$

onde,

N_d = número de drenos [m]

50 = distância entre os drenos [m/drenos]

T_d = Total da tubulação de drenagem[m]

Tratamento

O GDL produzido no interior do aterro ao ser coletado e transportado se resfria sofrendo processos de condensação. Se o condensado não for removido, podem ocorrer bloqueios no sistema, conseqüentemente, interrupções nos processos de geração de energia.

Antes de o gás ser utilizado na conversão de energia, é necessário remover particulados e impurezas. As aplicações dos tratamentos dependem da finalidade do uso (OLIVEIRA et al, 2006).

O tratamento para a purificação do biogás pode ser feito por diferentes métodos e de acordo com a metodologia é definido um custo.

Os métodos mais freqüentemente empregados são: H₂O filtro coalescente, H₂S Siloxina, CO₂ (CETESB, 2006).



Figura 6 - Tratamento

Fonte: Programa BIOGÁS (CETESB, 2006).

Compressão

O compressor tem a função de gerar a pressão negativa necessária para a retirada do gás por exaustão e a pressão positiva para o armazenamento e uso (CETESB, 2006).

O tipo e número de compressores dependem da taxa de fluxo de gás e do nível de compressão que se deseja, variando de acordo com o equipamento (OLIVEIRA et al, 2006).



Figura 7 - Compressor.

Fonte: CETESB, 2006.

Transporte

Para que o gás seja aproveitamento na vizinhança do aterro, este deve ser transportado até os locais de consumo através de dutos.



Figura 8 - Transporte do gás.

Fonte: CETESB, 2006.

Queimador

Converte o CH_4 em CO_2 . Os queimadores permitem a queima controlada do CH_4 (CETESB, 2006).

O dispositivo responsável pela queima é o *flare*².

² Equipamento utilizado para a queima de gases, é considerado também um equipamento de segurança.



Figura 9 - Flare.

Fonte: CETESB, 2006.

O biogás que não for aproveitado energeticamente pode ser apenas queimado, podendo conferir Reduções de Emissões Certificadas ou Créditos de Carbono³.

O benefício alcançado com a venda dos créditos varia de acordo com o valor da tCO₂ vigente no mercado.

Custo simplificado do projeto

| | |
|--------------------------|---|
| Custo de coleta [R\$] = | Número de drenos [dreno]xcusto do dreno[R\$/dreno] |
| Custo compressão [R\$] = | vazão biogás [Nm ³ /h]xcusto da compressão[R\$/(Nm ³ /h)] |
| Custo gasômetro [R\$] = | volume [Nm ³]xcusto[R\$/Nm ³] |
| Custo queimador [R\$] = | número de queimadores[queimador]xcusto[R\$/queimador] |
| Custo transporte [R\$] = | custo transporte[R\$/m]x distância de destino [m] |

Para os usos internos do aterro e das residências há o custo para adaptação ou substituição de equipamentos.

³ O crédito de carbono corresponde aos recursos oriundo do projeto certificado de acordo com as regras do Protocolo de Quito e correspondente ao valor pago pelo total de toneladas de Dióxido de carbono (CETESB, 2006).

O estudo de caso: O aterro de Sorocaba

Realizou-se o estudo para a cidade de Sorocaba, abordando as emissões potencialmente geradas na cidade pela disposição dos resíduos sólidos no aterro da cidade.

A cidade de Sorocaba.

A cidade de Sorocaba está localizada na região sudoeste do Estado de São Paulo, a 96 Km de distancia da Capital - São Paulo, limitando-se ao norte com Porto Feliz; ao sul com Votorantim; ao leste com Mairinque; ao nordeste com Itu; ao oeste com Araçoiaba da Serra; ao sudoeste com Salto de Pirapora e a Noroeste com Iperó (PREFEITURA, 2008).

A área total da cidade é de aproximadamente 456,0 km². Estimando-se cerca de 206,8 km² de área rural e 249,2 km² de área urbana (PREFEITURA, 2008).

Sua população estimada é de 586.680 habitantes e possui uma taxa urbanização de 98,63% para o ano de 2000 (SEADE, 2009).

Para o período de 1991 a 2003, Sorocaba apresenta um índice de aproximadamente 100% de coleta dos resíduos municipais na área urbana e iniciou em 2003 um programa de coleta seletiva em parceria entre a Prefeitura e as Cooperativas de reciclagem (SEADE, 2009 e PREFEITURA, 2009).

A cidade de Sorocaba foi fundada em 1654 por um bandeirante, o capitão Baltazar Fernandes personagem que deu o nome a cidade de Sorocaba que em Tupi-Guarani significa "Terra Rasgada". A cidade serviu como entreposto comercial e ponto de partida de expedições rumo ao interior. Depois, devido à sua localização estratégica, tornou-se a capital mercantil da Colônia, no período em que o Brasil conheceu a "febre do ouro" (PREFEITURA, 2008).

Foi precursora da industrialização paulista registrando, já em 1852, a primeira experiência de se implantar uma fábrica de fiação e tecelagem no Estado de São Paulo. É berço de uma das primeiras ferrovias do Brasil com a fundação, em 1875, da Estrada de Ferro Sorocabana, que tornou -se a mais importante do setor antes da unificação da malha ferroviária estadual (PREFEITURA, 2008).

A cidade de Sorocaba conta hoje com uma política de estímulo à implantação de novas empresas e expansão das antigas indústrias da cidade. Sua proximidade com

grandes aeroportos, rodovias, ferrovias, hidrovias, portos marítimos e seu alto potencial de consumo, favorecem seu desenvolvimento (PREFEITURA, 2008).

O aterro municipal da cidade



Figura 10 – Aterro de Sorocaba/SP.

Fonte: NUPLAN, 2004.

O Aterro Sanitário Municipal da cidade é conhecido como, possui uma área de 400.000 m² e está localizado na Av. Victor Andrew, s/n, no bairro Retiro São João. Foi construído para substituir o antigo lixão do Ipatinga, em setembro de 1985 (WALM, 2007) com a finalidade de acomodar resíduos Classe II e III.

No Aterro Sanitário de Sorocaba, as células ou etapas possuem entre 2,5m e 3,0m de altura, havendo compactação com tratores e recobrimento com terra. Possui sistema de dreno para escoamento dos gases gerados, porém este não recebe nenhum tipo de tratamento ou aproveitamento.

Sua implantação contou com o apoio da CETESB e não foi realizado um licenciamento formal, pois a própria CETESB foi a responsável pelo projeto. Ressalta-se que o início de operação do aterro foi anterior a Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986, onde consta no Artigo 2º a obrigatoriedade da elaboração de EIA a ser submetido à aprovação do órgão estadual competente e do IBAMA para o licenciamento de aterros sanitários, visto como uma atividade impactante (WALM, 2007).

Inicialmente o projeto previa quatro etapas de implantação, mas a URBES em 1993, solicitou à CETESB o acréscimo de mais uma camada e depois houve a implantação de mais duas, totalizando sete (WALM, 2007).

No período de setembro/85 à dezembro/08 foram coletadas mais de 2 milhões de toneladas de lixo domiciliar. No ano de 2008 a média está em 11, 5 mil t/mês.

Atualmente, o aterro recebe pouco mais de 400 t/dia de resíduos domiciliares e cerca de 5 t/dia de resíduos Industriais Classe I, depositados em valas específicas e está com sua capacidade se esgotando. A previsão de uso é para no máximo mais três anos e por questões políticas e ambientais ainda não há um local definido para o novo aterro da cidade.

Os índices que qualidade de operação do aterro (IQR)

A implantação do aterro em 1985 contou com o apoio da CETESB, mas não existem registros das condições de operação até o ano de 1997, quando começou a ser avaliado por meio do Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos (IQR). Tal índice busca avaliar as condições de operação dos aterros de uma forma padronizada, utilizando índices que variam entre 1 e 10, de acordo com a classificação da

Tabela 3:

Tabela 3 –Avaliação das Condições dos aterros municipais por meio do IQR

| Condições | IQR |
|-----------------------|------------|
| Condições inadequadas | 0,0 a 6,0 |
| Condições controladas | 6,1 a 8,0 |
| Condições adequadas | 8,1 a 10 |

Fonte: Adaptado CETESB, 2007.

Objetivo

Estimar o CH₄ gerado no aterro de Sorocaba desde sua abertura em 1986, até 2042, passando pelo seu encerramento que deve ocorrer por volta do ano de 2012. Estimar também a possível potência disponível no período com o aproveitamento deste gás.

Método

A estimativa de emissão de CH₄, gás de efeito estufa, para o aterro de Sorocaba será baseada seguindo o método Workbook, Guia de Boas Práticas e de Gerenciamento de Incertezas para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (2000), Volume Único do IPCC.

Estimativa do biogás gerado pelo modelo First Order Decay (FOD)

O modelo utilizado para a estimativa será o First Order Decay (FOD), onde a emissão do CH₄ é tratada como uma função dependente do tempo (IPCC, 2000). Este tem sido amplamente utilizado para realizar estimativas em aterros sanitários, sendo um importante instrumento para a realização de inventários Nacionais de emissões (IPCC, 1996).

$$Q = (k.A.MSW_T.MSW_F.L_0.e^{-kt} - R).(1 - OX)$$

Equação 6 – Estimativa de geração de CH₄ pelos resíduos sólidos

onde:

Q = quantidade de CH₄ gerada ao ano [GgRSU/ ano]

k = constante de decaimento [1/ano]

$$k = \ln 2 / t_{1/2}$$

Equação 7 – Estimativa da constante de decaimento.

t_{1/2} = Tempo de meia vida do resíduo

A = Fator de normalização para a soma [%]

$$A = \frac{1 - e^{-kt}}{k}$$

Equação 8 – Normalização de soma

MSW_T = Total de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no ano t; [GgRSU/ ano]

MSW_F [%] = Fração de RSU disposto ano t; [adimensional]

Devido a dificuldade na obtenção de informações, optou-se por substituir o produto $MSW_T.MSW_F$, sem perda de qualidade da informação:

$$MSW_T.MSW_F = R_x = \text{Pop}_x * \text{TaxaRSU no ano } t;$$

onde :

R_x = Taxa RSU disposto no aterro [kgRSU/ano]

Pop_x = População atendida pelo aterro no ano x [habitantes]

TaxaRSU = Taxa de geração de resíduo [kgRSU/hab.dia]

A TaxaRSU é variável no tempo, os dados quantitativos relativos aos resíduos sólidos urbanos estão diretamente relacionados ao porte da comunidade geradora desses resíduos (ABRELPE, 2007). Ocorrendo um incremento populacional, a tendência é que a geração de RSU per capita aumente. Adotou-se para realizar essa variação temporal os dados da CETESB não datados, porém, arbitrados para o ano de 1970, e o dado publicado pela ABRELPE, 2007 para a cidade de Sorocaba.

Os dados da CETESB relacionam a geração de resíduos per capita por faixa populacional. Atribuiu-se a taxa de RSU para 5.581 municípios brasileiros de acordo com as respectivas populações para o ano de 1970, segundo o IBGE, excluindo São Paulo e Rio de Janeiro, pois estes dois municípios apresentavam uma população muito superior aos demais que se enquadravam na mesma faixa de geração de RSU per capita. Então, atribuir a mesma taxa de geração implicaria em um deslocamento da curva de tendência a um comportamento inadequado comprometendo a representatividade.

Após atribuir os dados da CETESB aos municípios brasileiros traçou-se uma curva de tendência linear para suavizar a variação de geração de RSU per capita por faixa populacional obtendo-se assim a Equação 9 que define a geração de RSU por faixa populacional para o ano de 1970.

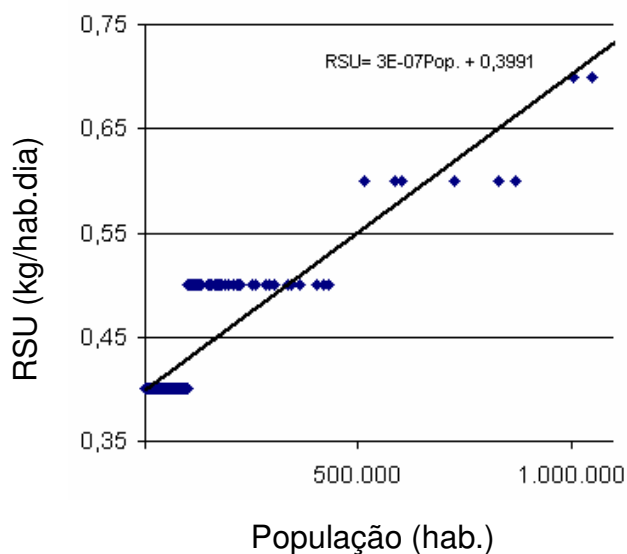


Figura 11- Geração de RSU em 1970

$$RSU_{1970} = 3.10^{-7} \cdot Pop + 0,3991 \quad \text{Equação 9 - Geração de RSU em 1970.}$$

Para o ano de 2007, empregou-se o dado de RSU para a cidade de Sorocaba, segundo a ABRELPE. Interpolou-se esses dados, como é possível observar na Equação 10 de forma a considerar essa variação na geração per capita no tempo e estendendo até 2012, ano de possível fechamento do aterro.

$$TaxaRSU = TaxaRSU_{1970} + (TaxaRSU_{2007} - TaxaRSU_{1970}) \cdot \frac{(ano - 1970)}{(2007 - 1970)}$$

Equação 10 – Transição da TaxaRSU do ano de 1970 para a TaxaRSU do ano de 2007

Foi necessário realizar estimativas populacionais e para tal finalidade, empregou-se as Equações Equação 11 e Equação 12:

$$Pop_b = Pop_a \cdot (1 + i)^{(b-a)} \quad \text{Equação 11 – Estimativa populacional}$$

Fonte: Alves e Vieira (2000)

Pop_a = População atendida pelo aterro no ano inicial

Pop_b = População atendida pelo aterro no ano seguinte

i = Índice de crescimento populacional do período

a= ano

b = ano posterior

$$i = \left(\frac{Popb}{Popa} \right)^{1/(b-a)} - 1$$

Equação 12 – Estimativa do índice de crescimento populacional

Fonte: Alves e Vieira (2000)

Após a substituição do produto $MSW_T.MSW_F$ por R_x a equação empregada para a estimativa foi a Equação 13:

$$Q = (k.A.Rx.L_0.e^{-kt} - R).(1 - OX)$$

Equação 13 – Estimativa de geração de CH₄ pelos resíduos sólidos

Fonte: Adaptada IPCC (2000).

onde k, A e Rx foram descritos anteriormente.

L_0 = Potencial de geração de CH₄ [GgCH₄/GgRSU]

$$L_0 = MCF.DOC.DOC_f.F.16/12$$

Equação 14 – Estimativa do Potencial de geração de CH₄ (L_0)

MCF= Fator de correção do CH₄ referente ao gerenciamento dos locais de disposição

DOC= Carbono orgânico degradável

$$DOC = (0,4.A) + (0,17.B) + (0,15.C) + (0,3.D)$$

Equação 15 – Estimativa de Carbono Orgânico Degradável (DOC)

A= Fração do resíduo correspondente a papéis e têxteis [%]

B= Fração do resíduo proveniente de jardins, parques e outros putrescíveis não alimentares [%]

C= Fração do resíduo correspondente a resíduos alimentares [%]

D= Fração do resíduo correspondente a madeira e palha [%]

$DOC_f =$ Fração assimilada do DOC

$$DOC_f = 0,014.T + 0,28 \quad \text{Equação 16 – Estimativa da fração assimilada do DOC.}$$

Fonte: (TABASARAN,1981 apud PCC,1996).

onde;

| | | |
|---------|-------------------------------------|----------------|
| T= | Temperatura no interior do aterro | [°C] |
| F= | Fração de CH ₄ no aterro | [%] |
| 16/12 = | Conversão de C a CH ₄ | [adimensional] |

As condições de operação do aterro não foram constantes durante o período de estudo, sendo avaliadas anualmente pelo IQR ou outras formas de avaliação descritas mais adiante.

De acordo com o Quadro 1, fatores demográficos e sócio econômicos influenciam a característica dos RSU. Logo, o potencial de geração de CH₄ para o aterro de Sorocaba não é estático.

Para as estimativas reuniram-se diversos dados de L₀ para diferentes municípios no Estado de São Paulo em diferentes anos e traçou-se uma curva de tendência, na qual obedece a seguinte relação:

$$L_0' = L_{0i} + ((L_{0f} - L_{0i}) / (ano_{fec} - ano_i)) \cdot (ano_{fec} - ano_{corrente}) \quad \text{Equação 17 - Estimativa linearizada de } L_0$$

onde:

| | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|
| L ₀ ' | = | Estimativa linearizada de L ₀ | [adimensional] |
| L _{0i} | = | L ₀ inicial | [adimensional] |
| L _{0f} | = | L ₀ final | [adimensional] |
| ano _{fec} | = | ano de fechamento do aterro | [ano] |
| ano _i | = | ano de abertura do aterro | [ano] |
| ano _{corrente} | = | ano corrente | [ano] |

e voltando à Equação 13

| | | | |
|------|---|--------------------------------|--------------------------|
| R = | = | Recuperação do CH ₄ | [GgCH ₄ /ano] |
| OX = | = | Fator de oxidação | [adimensional] |

Com os dados anuais para a estimativa de CH₄, empregando-se a Equação 18, foi possível construir um perfil de emissões durante sua vida útil:

$$\sum_i^f Q = \sum_i^f [(k.A.Rx.L_0.e^{-kt} - R).(1 - OX)] \quad \text{Equação 18 – Somatório das estimativas anuais de emissão de CH}_4$$

onde,

$$\sum_i^f Q = \text{soma das vazões de CH}_4 \text{ ano a ano}$$

i = ano de abertura do aterro

f = ano de encerramento do aterro

Estimativa de potência do fluxo de biogás

A estimativa do uso potencial do biogás do aterro de Sorocaba foi baseada metodologicamente no Manual do usuário do programa de Computador “Biogás Geração e uso energético” para aterros, versão 1.0 desenvolvido para a CETESB em 2006. Para a aplicação direta da Equação 19 para a estimativa de potência disponível apresentada no manual, realizou-se a conversão da massa de CH₄ estimada (Gg) para volume ocupado (Nm³).

Conhecendo-se o volume (Nm³) ocupado para cada Gg de CH₄ nas condições apresentadas, conforme *Anexo A - Conversão da massa de CH₄ (Gg) para volume (Nm³)*, o poder calorífico do CH₄ e a eficiência de coleta, realizou-se uma estimativa da potência disponível no aterro para o CH₄ gerado;

Para a estimativa de potência, empregou-se a Equação 19, adaptada da CETESB (2006) e obteve-se um coeficiente de equivalência de potência disponível por massa de metano em MW/GgCH₄.

$$CP = Q_{CH_4} \cdot P_{cal} \cdot E_c \quad \text{Equação 19 – Potência disponível}$$

onde:

| | | | |
|------------------|---|--|------------------------|
| CP | = | Coeficiente de equivalência de potência disponível | $[\frac{MW}{GgCH_4}]$ |
| QCH ₄ | = | vazão de CH ₄ | [Nm ³ /ano] |
| Pcal | = | poder calorífico do CH ₄ | [J/Nm ³] |
| Ec | = | eficiência de coleta | [%] |

De acordo com o coeficiente encontrado foi possível estimar a potência disponível por um período.

Identificou-se a vazão máxima de gás e a potência máxima de gás disponíveis no período de 1986 a 2042 com o fechamento do aterro em 2012.

A planilha

Para realizar as estimativas de CH₄ e potência disponíveis ao ano, empregou-se uma ferramenta desenvolvida em EXCEL versão 2000.

Os dados e as estimativas preliminares necessárias às estimativas foram planejados e reunidos na planilha 'Dados.exe' de forma a otimizar a inclusão de novos dados a medida que os estudos foram avançando.

Os dados contidos na planilha 'Dados.exe' são os dados de entrada da planilha 'Estimativa.exe', onde realizaram-se efetivamente estimativas.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following content:

| | A | B | C |
|----|--|-----------|---|
| 1 | $Q = (k * A * MSW_1 * MSW_2 * L_0 * MCF * e^{-(kt)} - R) * (1 - OX) \text{ [GgCH}_4\text{/ano]}$ | | |
| 2 | | Município | |
| 3 | | | |
| 4 | | 1980 | 1991 |
| 5 | Sorocaba | 265.975 | 374.108 |
| 6 | | 265.975 | 374.108 |
| 7 | Fonte: IBGE, citado pelo MUNINET, 2003 | | |
| 8 | Resultados: | | |
| 9 | Município | 1986 | 1987 |
| 10 | Sorocaba | 0,75 | 1,41 |
| 11 | emissões em tCO ₂ e | 15.778,1 | 29.682,6 |
| 12 | $Q = (k * A * MSW_1 * MSW_2 * L_0 * MCF * e^{-(kt)} - R) * (1 - OX) \text{ [GgCH}_4\text{/ano]}$ | | |
| 13 | k | | |
| 14 | onde: | | |
| 15 | k (para resíduo misturado) = Constante de decaimento | | Seco (MAP < 1000 mm) Úmido (MAP > = 1000 mm) |
| 16 | Fonte: IPCC, 2000 | | |
| 17 | MAP = Precipitação anual média | | acima de 1000 mm/ano |
| 18 | k = | | 0,17 úmido |
| 19 | A $(1 - e^{-(k)})/k =$ | | 0,92 |
| 20 | onde : A = Fator de normalização de soma | | |
| 21 | Fonte: IPCC, 2000;2006 | | |
| 22 | i | | |

Figura 12 - Planilha empregada para realizar as estimativas de CH₄ gerado e potência disponível no aterro de Sorocaba.

Dados

Os dados foram separados em duas etapas, A primeira refere-se aos dados para se realizar a estimativa de CH₄ gerado no aterro. A segunda refere-se à estimativa de potência disponível.

Para a estimativa das emissões do CH₄ do aterro

A constante de decaimento (k)

A constante de decaimento k é expressa pela Equação 7, onde t é o tempo de meia vida do resíduo.

Segundo IPCC 2006, a meia-vida é o tempo necessário para que o resíduo atinja metade de sua massa inicial. Esta é afetada por uma ampla variedade de fatores relacionados com a composição dos resíduos, condições climáticas e características dos locais de disposição.

Níveis mais altos de k estão relacionados à meias vidas mais curtas, ou seja, resíduos de degradabilidade mais rápida, como resíduos alimentares e os níveis mais baixos, com resíduos de degradabilidade mais lenta, como madeira e palha (IPCC, 2000).

Para o estudo, utilizaram-se dados padrões para o k, sugeridos por Jensen e Pipatti, (2002) apud IPCC (2006), baseados em uma média ponderada da composição dos RSU, onde a degradação é diferente para cada tipo de resíduo e difere também para uma mistura de resíduos. Devido à insuficiência de dados sobre a composição dos resíduos, foram adotados *defaults*⁴ para resíduos misturados, presentes na Tabela 4 e estimados em função da zona climática e precipitação média.

⁴ O termo default significa “na falta de”. O método IPCC (2000) sugere o uso de default quando não se dispõe de melhor informação.

Tabela 4 – Dados da constante de decaimento (k)

| Zona Climática boreal e temperado | | | | Zona Climática tropical | | | |
|-----------------------------------|-------------|------------------------|------------|-------------------------|-------------|-----------------------|------------|
| MAT ≤ 20° C | | | | MAT ≥ 20° C | | | |
| Seco (MAP/PET < 1) | | Úmida (MAP/PET > 1) | | Seco (MAP < 1000mm) | | Úmida MAP ≥ 1000mm | |
| default | Faixa | default | faixa | default | faixa | default | faixa |
| 0,05 | 0,05 – 0,06 | 0,09 | 0,08 – 0,1 | 0,065 | 0,05 – 0,08 | 0,17 | 0,15 - 0,2 |

Fonte: Adaptado IPCC, 2006.

onde:

MAT: Temperatura média anual

MAP: Precipitação média anual

A temperatura média anual da cidade é de 22,1°C para o período de 1988 a 2003 (CEPAGRI/Unicamp apud WALM, 2007) e encontra-se na Zona Climática Tropical.

Para a determinação do regime de chuva, utilizou-se um estudo de Daniel e Ferreira, (1993), baseados em dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

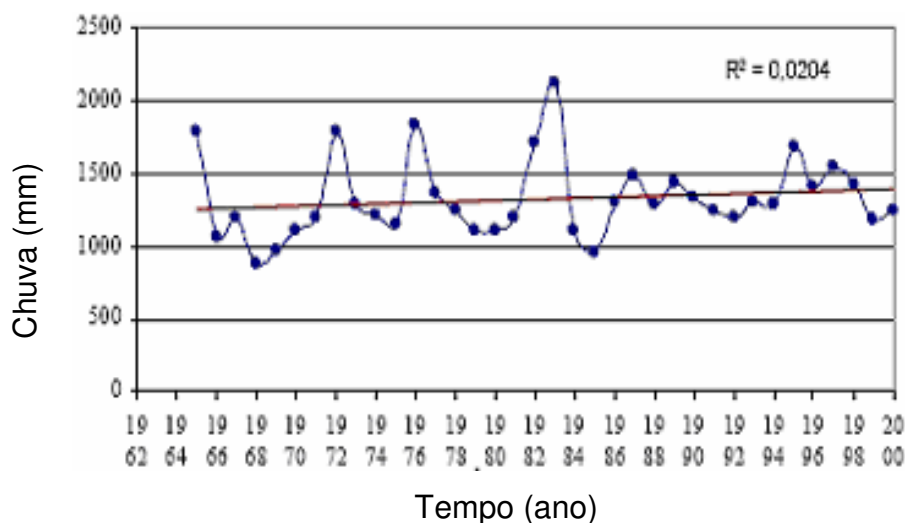


Figura 13 – Totais anuais de chuva em Sorocaba (1965-2000).

Fonte: DANIEL ;FERREIRA, 1993.

Segundo DANIEL e FERREIRA em 1993, a análise dos totais anuais mostrou que as chuvas em Sorocaba oscilaram em torno de 1.327mm e revelaram tendência de aumento ao longo da série histórica utilizada.

Com a temperatura média superior a 20°C e precipitação média superior a 1000 mm/ano, optou-se por utilizar o *default* de 0,17.

Taxa de RSU disposto no aterro (R_x)

A variável R_x (kg/hab.ano) substituiu o produto $MSW_t.MSW_f$ por $Pop_x(hab.).TaxaRSU(Kg/hab.ano)$, sem ocasionar perda da qualidade da informação como mencionado no método. Esta variável depende de dados de estimativas da população urbana de Sorocaba e da taxa de RSU coletado.

População urbana (Pop)

A população utilizada para os cálculos foi a população urbana, de acordo com a Tabela 5, pois foi considerado que apenas a fração urbana da população é beneficiada com a coleta de resíduos com destino ao aterro sanitário. Segundo o IPCC em 1996, para locais onde ocorre disposição de resíduos em áreas rurais, ou seja, onde os resíduos não são dispostos em aterros, é recomendado o emprego somente da população urbana, então, por não ter obtido este tipo de informação e por Sorocaba ter sua população quase total em área urbana, se realizou as estimativas utilizando apenas dados de população urbana.

Os dados de população urbana municipal foram obtidos dos censos do IBGE 1980, 1991, 2000 e os dados de população urbana regional, retirados do Plano Nacional de Energia (PNE) para 2030

Para a estimativa da população intermediária entre as décadas de 1980, 1991, 2000 empregou-se a Equação 11 e Equação 12.

A partir de 2000, realizou-se a soma da população urbana dos municípios da região Sudeste, de acordo com os dados do IBGE para 2000 e juntamente com os dados de população urbana da região Sudeste em 2005 segundo o PNE, estimou-se o índice de crescimento para este período (2000 a 2005), de acordo com a Equação 12 e aplicou-se para a população urbana de Sorocaba em 2000 conforme Equação 11, extrapolando até 2005 com este mesmo índice.

Para o período de 2006 a 2010, utilizou-se os dados de população urbana da região Sudeste segundo o PNE para os anos de 2005 e 2010, calculou-se o índice de crescimento populacional conforme Equação 12 e aplicou-se o mesmo para a população urbana estimada de Sorocaba no ano de 2005, conforme Equação 11, extrapolando até 2010 com este mesmo índice.

Para o período de 2011 a 2012, utilizou-se os dados de população urbana da região Sudeste segundo o PNE para os anos de 2010 e 2015, calculou-se o índice de

crescimento populacional conforme Equação 12 e aplicou-se o mesmo para a população urbana estimada de Sorocaba no ano de 2010, conforme Equação 11, extrapolando até 2012 com este mesmo índice.

Tabela 5 – Dados de população municipal

| Sorocaba | 1980 | 1991 | 2000 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| População | 265.975 | 374.108 | 486.726 |

Fonte: IBGE (1980, 1991, 2000).

Tabela 6 - Dados de população regional

| Região Sudeste | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| População | 65.549.194 | 72.520.000 | 78.205.000 | 83.384.000 |

Fonte: IBGE (2000); PNE (2005).

Taxa de RSU coletado (TaxaRSU)

A CETESB emprega a Tabela 7 para a estimativa de resíduos produzidos em função da população urbana a muitos anos e não há indícios do ano em se iniciou a aplicabilidade destes dados (informação verbal)⁵, então, para o estudo, arbitrou-se para o ano de 1970.

Tabela 7 – Geração de RSU per capita para 1970 em função da população urbana.

| População | Geração de RSU |
|--------------------------|-----------------------|
| (hab) | (kg/hab.dia) |
| Hab. ≤ 100.000 | 0,4 |
| 100.001 ≤ hab. ≤ 200.000 | 0,5 |
| 200.001 ≤ hab. ≤ 500.000 | 0,6 |
| hab. ≥ 500.000 | 0,7 |

Fonte: Adaptado, CETESB, 2007.

Segundo o IBAM (Quadro 1), quanto maior a população urbana, maior a geração per capita de RSU, logo, a taxa de geração de resíduos para o ano de 1970 não se aplica a realidade atual. Neste contexto, para as estimativas de geração de RSU per capita no município de Sorocaba para o período de vida útil do aterro, foi realizada

⁵ Informação obtida em reunião com setor de resíduos sólidos domésticos da CETESB em 2008.

uma interpolação entre um dado da CETESB e um dado publicado pela ABRELPE em 2007.

Aplicando-se a Equação 9, para a população urbana de Sorocaba segundo Censo IBGE de 1970, (169.571 hab.). Verificou-se que Sorocaba apresentava uma taxa de RSU de aproximadamente 0,4499713 kgRSU/hab.dia. Este dado refere-se a RSU urbano gerado, porém arbitrou-se que este foi 100% coletado.

A ABRELPE em 2007 realizou um estudo para a geração per capita de RSU baseada no tratamento estatístico de dados ABRELPE e SNIS, apresentando uma tendência na qual a geração per capita de RSU é diretamente proporcional a população. Para 2007, a ABRELPE atribuiu a Sorocaba 0,640kg de RSU coletado.

Com a finalidade de observar a variação quantitativa de RSU ao longo dos anos e incluí-la na estimativa das emissões, interpolou-se as taxas de geração de RSU de 1970 e 2007, obtendo-se a Figura 14 e a Equação 20.

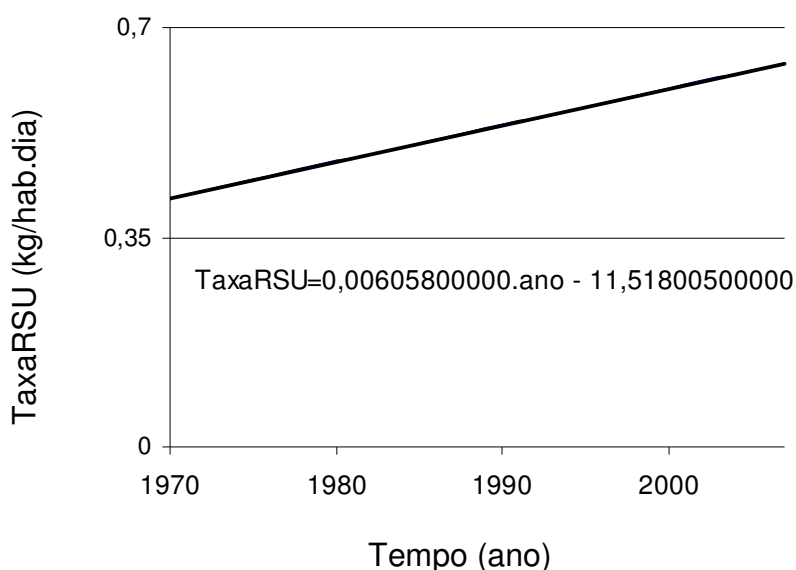


Figura 14 - RSU coletado em Sorocaba (1970 a 2007)

$$\text{TaxaRSU} = 0,006058.\text{ano} - 11,518005 \quad \text{Equação 20} - \text{TaxaRSU para o ano período de 1970 a 2007}$$

Fator de correção do CH₄ (MCF)

O MCF é um fator de correção do CH₄ referente ao gerenciamento da disposição dos resíduos, como material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento de resíduo. Tal gerenciamento incentiva o desenvolvimento e manutenção da atividade anaeróbia (IPCC, 1996).

Segundo o método utilizado, os fatores de MCF são definidos de acordo com as condições de operação do aterro e profundidade das camadas de resíduo. Na Tabela 8, é possível observar o tipo de local de disposição e o respectivo fator MCF:

Tabela 8 – Dados default do IPCC para o MCF

| Classificação dos LDRSM e correspondente FCM | |
|--|--|
| Tipo de local | Fatores de correção do CH ₄ |
| Aterro sanitário | 1,0 |
| Aterro não gerenciado > 5m profundidade | 0,8 |
| Aterro não gerenciado < 5m profundidade | 0,4 |
| Não classificados | 0,6 |

Fonte: Adaptado IPCC, 1996.

Por se ter a necessidade de informações históricas de gerenciamento do local de disposição de resíduos para se atribuir o dado de MCF, efetuou-se uma correspondência entre o IQR e o MCF. O IQR avalia os condições gerais de operação dos aterros considerando diversos fatores, sendo assim, mais representativo para um diagnóstico de gerenciamento do que a análise apenas pela profundidade como sugerida na Tabela 8.

Por esse motivo, na planilha de cálculo, vinculou-se o MCF ao IQR da seguinte forma:

Para notas acima de 8,1 atribuiu-se MCF=1.

Para notas entre 6,1 e 8,1 atribuiu-se MCF=0,8

Para notas inferiores a 6,1 atribuiu-se MCF=0,4

Obs: Na ausência de informação (de 1986 a 1996; 2009 a 2012) foi atribuída a média das notas dos IQRs no período de 1997 a 2008 : 8,416667 implicando, de acordo com a relação estabelecida, em um MCF = 1.

Na Tabela 9, observa-se os dados históricos do IQR do aterro de Sorocaba, para o período de 1997 a 2008:

Tabela 9 – IQR do Aterro Municipal de Sorocaba (1997 -2008)

| Ano | IQR | Condições |
|------|-----|-------------|
| 1997 | 8,0 | Controladas |
| 1998 | 7,5 | Controladas |
| 1999 | 8,0 | Controladas |
| 2000 | 8,7 | Adequadas |
| 2001 | 8,4 | Adequadas |
| 2002 | 8,5 | Adequadas |
| 2003 | 8,6 | Adequadas |
| 2004 | 8,6 | Adequadas |
| 2005 | 8,8 | Adequadas |
| 2006 | 8,6 | Adequadas |
| 2007 | 8,7 | Adequadas |
| 2008 | 8,6 | Adequada |

Fonte: Adaptado CETESB, 2008.

Carbono orgânico degradável (DOC)

Segundo o IPCC, 2000 o Carbono orgânico degradável é o carbono acessível para a decomposição bioquímica. É baseado na composição do resíduo e pode ser calculado por peso médio do teor de carbono dos seus componentes Equação 15. Os dados padrão de DOC podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Frações de Carbono orgânico degradável (DOC) por diferentes tipos de resíduos

| Dado default de DOC | |
|---|-----------------------------|
| Fração do resíduo | Percentual do DOC (em peso) |
| A – Papéis e têxteis | 40 |
| B – Resíduos de parques jardins e outros orgânicos putrecíveis, exceto alimento. | 17 |
| C – Resíduos alimentares | 15 |
| D – Resíduos de madeira e palha* | 30 |

* excluindo a lignina C.

Fonte: Adaptado Bingemer e Crutzen (1986) apud IPCC (1996).

Segundo Kollmann e Cote (1968) apud Bingemer e Crutzen (1987), cerca de 30% da madeira é lignina. Esta não decai ou é muito lentamente degradada, Braun (1982) apud Bingemer e Crutzen (1987), por esta razão foram excluídos 30% dos compostos de madeira presentes nas composições de resíduos municipais empregadas no estudo.

A cidade de Sorocaba não possui análise gravimétrica dos resíduos coletados no município, por esta razão, houve tentativas de atribuir a Sorocaba, análises de outros municípios por semelhança de PIB e IDH, porém, por não se obter uma correlação satisfatória, optou-se por reunir composições dos resíduos municipais do Estado de São Paulo em diferentes anos (ANEXO B) e construiu-se uma regressão a qual representou a variação média da composição dos resíduos estaduais no decorrer do tempo, sendo esta regressão empregada no estudo.

Todas as composições estão apresentadas e referenciadas no Anexo B - Composições de RSU, na página 69 desse documento.

Fração de carbono orgânico dissociado (DOC_f)

De acordo com o IPCC, o DOC_f é a estimativa da fração de carbono finalmente liberada no local de disposição. Reflete o fato de que alguns carbonos orgânicos não degradam, ou degradam muito lentamente quando depositadas em um aterro, correspondendo à fração de DOC que efetivamente degrada. Baseado em revisões de literatura, o IPCC sugere o cálculo conforme a Equação 16, em 1996 e estabeleceu um default de 0.77, em 2000, apresentando como temperatura média no interior do aterro 35°C, dado adotado no presente estudo.

O DOC_f depende de fatores como temperatura, umidade, pH e composição dos resíduos (IPCC, 2006).

Fração de CH_4 em um aterro (F)

O gás de aterro é constituído principalmente por CH_4 e gás carbônico, a proporção de CH_4 é de aproximadamente 50%, mas pode variar entre 45% e 60% como visto na Tabela 1, dependendo de alguns fatores, como a composição do resíduo.

O IPCC em 2006 apresentou um default de 50% para CH_4 no gás de aterro.

Potencial de CH₄ gerado (L₀)

O potencial de CH₄ gerado considera as condições de operação do aterro (MCF), composição do resíduo (DOC), fração do DOC que realmente degrada (DOC_f), fração de CH₄ no biogás (F) e conversão do CH₄ a CO₂. Essas variáveis foram discutidas anteriormente e empregadas no estudo de forma a obter uma variação temporal do potencial de CH₄ gerado (L₀), com exceção da qualidade de operação do aterro que foi aplicada posteriormente na planilha 'Estimativa.exe'.

Após a reunião dos DOCs de algumas cidades do estado de São Paulo em diferentes anos, plotou-se esses pontos e posteriormente traçou-se uma curva de tendência, de acordo com Figura 15.

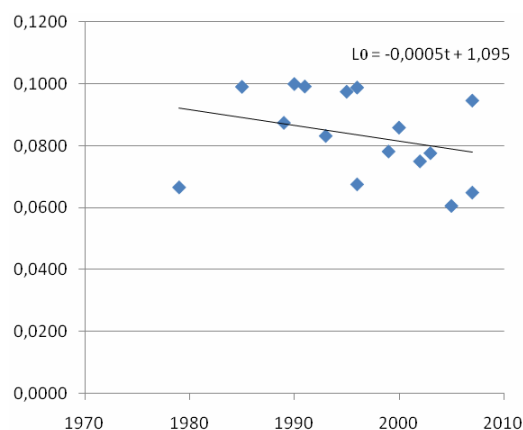


Figura 15 – Variação de L₀ no tempo.

De acordo com a Equação 17, obteve-se:

$$L_0' = -0,0005 \cdot \text{ano} + 1,0925$$

Equação 21 – Estimativa linearizada de L₀ para o período de 1986 a 2013.

Empregando-se esta regressão foi possível estimar o potencial de geração de CH₄ anualmente desde a abertura do aterro em 1986 até seu possível fechamento em 2012.

Metano recuperado (R)

O CH₄ recuperado do total de CH₄ gerado nos aterros é aquele queimado nos *flares* e/ou utilizado para geração de energia. O *default* para o CH₄ recuperado, segundo o IPCC em 2000, é zero. Este dado pode ser modificado quando há referências documentadas sobre este metano recuperado.

No caso do Aterro Municipal de Sorocaba, há indícios de queima em *flares* por questões de segurança, porém, não há registros destes períodos de queima e nem

das quantidades queimadas. Para efeito das estimativas considerou-se a recuperação zero até o ano de 2009. Para os anos posteriores realizou-se proposições para a recuperação deste gás, por meio de queima.

Fator de oxidação (OX)

O fator de oxidação OX, reflete a quantidade de CH₄ oxidado no solo ou outro material que cubra o lixo. Se o fator de oxidação for zero, então não há oxidação no local, mas se o fator for 1, 100% do CH₄ é oxidado. Estudos mostram que em aterros bem gerenciados a oxidação é maior (IPCC, 2000).

Os países mais industrializados, com bom gerenciamento dos locais de disposição, em sua maioria utilizam OX igual a 0.1. Em países em desenvolvimento, onde geralmente não há um bom gerenciamento na disposição, o nível atribuído para OX, é zero. Tais fatores são apresentados na Tabela 11.

Para considerações diferentes de zero, os documentos devem ser claramente referenciados (IPCC, 2000).

Tabela 11 – Dados de fatores de Oxidação (OX) para LDRSM.

| Tipo de local | Padrão do fator de oxidação (OX) |
|--|----------------------------------|
| Aterros mal gerenciados ou não classificados | 0 |
| Aterros sanitários | 0,1 |

Fonte: Adaptado IPCC, 2006.

Embora o Brasil seja um país em desenvolvimento, onde a recomendação do IPCC é utilizar zero como dado de OX, vinculou-se este dado com os de MCF os quais estão relacionados ao IQR, valendo-se do seguinte critério:

Para a estimativa da potência disponível de biogás

Tabela 12 - Dados para a estimativa de potência do fluxo de biogás.

| Dado | Quantidade | unidade | Obs: |
|------------|-----------------------|--------------------------------------|--|
| Q_{CH_4} | 1 | [GgCH ₄ /ano] | $1,58 \cdot 10^6$ [Nm ³ CH ₄] |
| P_{cal} | $35,53 \cdot 10^{-6}$ | [J/Nm ³ CH ₄] | |
| E_c | | [0,75] | |
| ano | $31,536 \cdot 10^6$ | s | |

Fonte: CETESB, 2006.⁶

⁶ A observação é explicada no Anexo A - Conversão da massa de CH₄ (Gg) para volume (Nm³) na página 66 desse documento.

Incertezas

As incertezas desta estimativa podem ser atribuídas ao método e a seleção de dados para os parâmetros do modelo.

Incertezas associadas ao método

O First Order Decaiment é um método relativamente simples para a complexidade do sistema ao qual é aplicado. A composição dos resíduos envolve reações químicas e que não necessariamente irão obedecer ao modelo exponencial FOD. As taxas de decomposição variam com a composição do resíduo e com as condições específicas de cada local de disposição, como presença de água e diferentes populações de bactérias (IPCC, 2006).

O tempo de meia vida, específico de cada resíduo e o comportamento de degradação da mistura dos mesmos também é considerada uma fonte expressiva da incerteza metodológica (IPCC, 2006).

Incertezas associadas aos parâmetros

As incertezas desta estimativa podem estar relacionadas ao método, mas as principais fontes estão associadas aos parâmetros utilizados nas estimativas.

No Quadro 2 observa-se os parâmetros com as respectivas incertezas.

Quadro 2 - Incertezas

| Estimativas das incertezas associadas com os <i>default</i> e parâmetros no método FOD para a emissão de CH₄ nos LDRSM. | |
|---|---|
| Dados de emissões e fatores de emissão | Incertezas |
| Total de resíduo sólido municipal (MSW _T) | Específico de cada município: 30% é para municípios com qualidade regular de dados de geração e coleta. ±10% para municípios com qualidade maior de dados. Para locais com pouca qualidade nos dados a incerteza pode ser o dobro. |
| Fração do MSWT enviado para LDRSM (MSW _F) | ±10% para países com qualidade maior de dados. ±30% para países com qualidade regular de dados de disposição nos LDRSM. Para locais com pouca qualidade nos dados a incerteza pode ser o dobro. |
| Incerteza total da composição do resíduo. | ±10% para regiões com qualidade maior de dados. ±30% para regiões com dados específicos com base em estudos incluindo amostragens periódicas. Para locais com pouca qualidade nos dados a incerteza pode ser o dobro. |
| Carbono orgânico degradável (DOC) | Para <i>defaults</i> do IPCC: ±20%. Para dados específicos de um município com base em amostragem representativa e análises: ±10%. |
| Fração de carbono orgânico degradável (DOC _f) | Para <i>defaults</i> do IPCC: ± 20%. Para dados específicos de um município: ± 10% para municípios com dados experimentais de longos períodos. |
| Fator de correção do CH ₄ (MCF) = 1.0 = 0.8 = 0.5 = 0.4 = 0.6 | Para <i>defaults</i> do IPCC : -10%, +0% ±20% ±20% ±30% -50%, +60% |
| Fração de CH ₄ gerado nos aterros (F) = 0.5 | Para <i>defaults</i> do IPCC: ±5% |
| Metano recuperado (R) | A incerteza dependerá de como será realizada a estimativa de CH ₄ recuperado; ± 10% se realizada no local. ± 50% se realizada fora do local. |
| Fator de oxidação (OX) | Incluir OX na análise de incerteza se um dado diferente de zero for usado para o OX. Neste caso a justificativa para um dados diferente de zero deve ser incluída nas considerações de incertezas. |
| Meia vida (k) | Para zona tropical: Seco (MAP < 1000 mm): 0.05 – 0.08 Úmido e molhado (MAP >= 1000 mm): 0.15 – 0.2 |

Fonte: Adaptado IPCC (2006).

Fator de correção de CH₄ (MCF)

Principais fontes de incerteza no MCF:

- Incerteza nos dados do MCF, para cada tipo de local. Esses são baseados em estudos experimentais e não em dados medidos.
- Incerteza na classificação de locais: Por exemplo, a distinção entre local profundo e raso (maiores ou menores do que 5m de profundidade) é baseada em parecer técnico. Inevitavelmente, poucos países classificam os seus aterros mal gerenciados, com base em dados medidos em campo (IPCC, 2006).

Carbono orgânico degradável (DOC)

Há duas principais fontes de incerteza nos dados de DOC:

- Incerteza na definição do DOC para os diferentes tipos de resíduos. Diferentes tipos de papel, alimentos, madeira e têxteis podem ter resultados muito diferentes de DOC. Os diferentes percentuais de água nos resíduos também contribuem para a incerteza associada a este parâmetro.
- A incerteza na composição dos resíduos afeta as estimativas de DOC, pois, a composição dos resíduos é muito variável dependendo de diversos fatores, como mencionado Quadro 1.

Fração de degradabilidade de carbono orgânico, que decompõe (DOC_f)

A incerteza é muito elevada em DOC_f. Há poucos estudos e é difícil de reproduzir as condições reais dos locais de disposição em estudos experimentais (IPCC, 2006).

Fração de CH₄ no GDL (F)

A fração de CH₄ dos gases gerados, F, é geralmente considerada como sendo 0,5. A incerteza neste dado é relativamente baixa, pois depende em grande parte da estequiometria de reações química que produzem CH₄. As concentrações de CH₄ medidas nos aterros podem ser inferiores, devido ao potencial de diluição por via aérea de modo que essas estimativas de F não são muito representativas (IPCC, 2006).

Recuperação de metano (R)

É a quantidade de CH₄ gerado nos locais de disposição que está sendo recuperado, ou seja, queimados em um *flare* e/ou sofrendo uma valorização energética. A incerteza depende do método usado para estimar o CH₄ recuperado.

Se a eficiência dos equipamentos forem estimadas a incerteza da recuperação do gás pode aumentar (IPCC, 2006).

Fator de oxidação (OX)

O fator de oxidação é muito incerto, pois é difícil de ser medido. Ele varia consideravelmente com a espessura, natureza do material de revestimento, condições atmosféricas, climáticas, fluxo de CH₄, bem como a fuga de CH₄ através de fissuras no material de cobertura (IPCC, 2006).

A meia-vida (k)

Existe grande incerteza nas estimativas de meia-vida, porque é complexo medir taxas de decaimento em condições equivalentes às previstas nos aterros. Além disso, existe uma variação considerável na meia-vida dos resíduos em relação à composição, o clima e o tipo de local (IPCC, 2006).

Resultados e análises

A seguir, são apresentados os resultados obtidos pela estimativa das emissões de gases de efeito estufa pelo aterro municipal de Sorocaba e a possível potência disponível.

As Figura 16 e Figura 17 apresentam as estimativas de emissões calculadas de CH₄ devidas à degradação da matéria orgânica contida no resíduo do aterro desde a sua abertura, até o possível término de suas emissões em 2042. Essa estimativa foi feita empregando-se a Equação 6 da página 35. Os dados empregados são aqueles listados no capítulo “Dados”, item “*Para a estimativa das emissões do CH₄ do aterro*” da página 42 desse documento.

A região tracejada apresenta o caso onde não há recuperação de CH₄, sendo emitido para atmosfera durante a vida útil do aterro até aproximadamente 30 anos após o seu fechamento. A região em linha contínua apresenta as emissões de CH₄ para o caso de haver recuperação de CH₄ a partir do ano de 2010 ou 2013, ou seja, quando o mesmo é deixado de ser emitido para a atmosfera através da conversão a CO₂, como apresenta a Equação 1 na página 22.

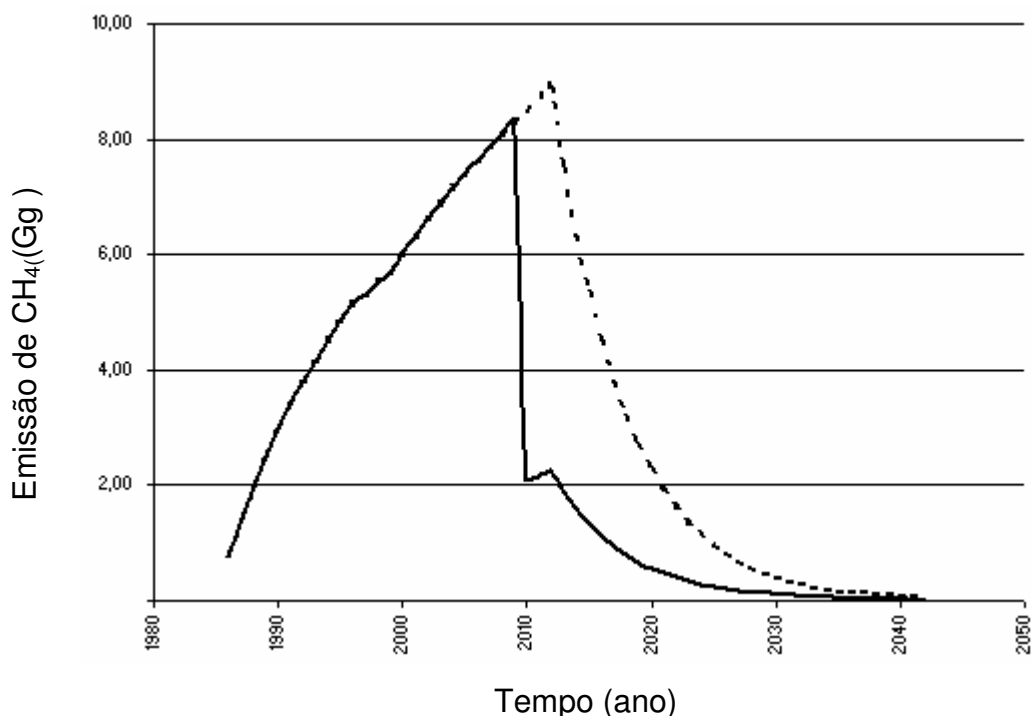


Figura 16 - Emissões de CH₄ para recuperação a partir de 2010.

A diferença entre a Figura 16 e a Figura 17 é que a segunda representa a recuperação do CH₄ a partir de 2013, enquanto que a primeira representa a

recuperação do CH₄ a partir de 2010. A materialização da hipótese em 2010 é mais remota, sendo a segunda, mais provável devido as questões burocráticas que permeiam o processo.

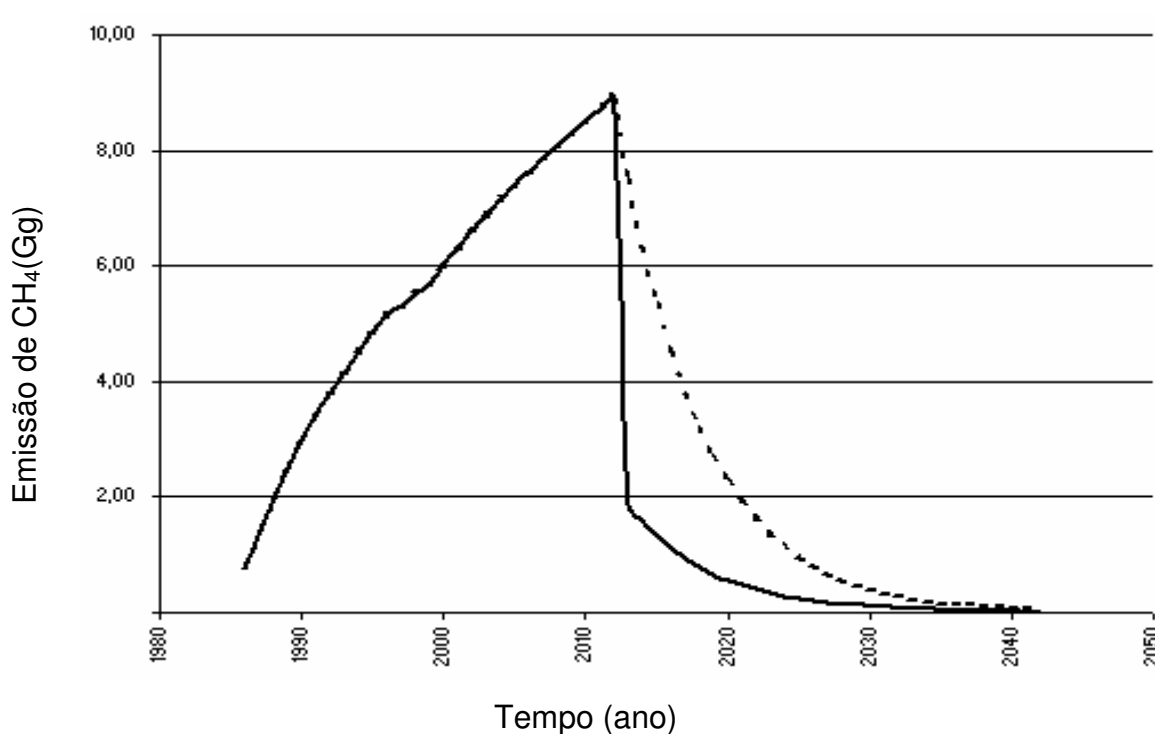


Figura 17 - Emissões de CH₄ para recuperação a partir de 2013.

Na Tabela 13, são apresentadas as emissões de CH₄ do aterro de Sorocaba para o período 1986 a 2042, para o caso de não haver recuperação, e para possíveis recuperações a partir de 2010 e 2013. Como a eficiência de coleta do biogás nos aterros é de aproximadamente 75%⁷, a recuperação máxima possível desse gás implica em reduzir as emissões de CH₄ a 25%, porém, essas reduções são referentes apenas a recuperação por queima em *flare* e a estimativa não incluiu a eficiência de queima do *flare*.

Se o aterro aproveitasse esse CH₄ energeticamente haveria também uma redução das emissões de GEE provenientes da substituição da fonte energética, mas o presente estudo não contemplou essa possibilidade.

⁷ Conforme E_c na página 52.

Tabela 13 – Emissões de CH₄ no aterro (Gg de CH₄)

| | Sem recuperação de CH ₄ | Com recuperação de CH ₄ | |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|
| | | A partir de 2010 | A partir de 2013 |
| 1986 | 0,75 | 0,75 | 0,75 |
| 1987 | 1,41 | 1,41 | 1,41 |
| 1988 | 1,99 | 1,99 | 1,99 |
| 1989 | 2,52 | 2,52 | 2,52 |
| 1990 | 2,99 | 2,99 | 2,99 |
| 1991 | 3,42 | 3,42 | 3,42 |
| 1992 | 3,82 | 3,82 | 3,82 |
| 1993 | 4,18 | 4,18 | 4,18 |
| 1994 | 4,52 | 4,52 | 4,52 |
| 1995 | 4,85 | 4,85 | 4,85 |
| 1996 | 5,15 | 5,15 | 5,15 |
| 1997 | 5,33 | 5,33 | 5,33 |
| 1998 | 5,51 | 5,51 | 5,51 |
| 1999 | 5,69 | 5,69 | 5,69 |
| 2000 | 6,02 | 6,02 | 6,02 |
| 2001 | 6,33 | 6,33 | 6,33 |
| 2002 | 6,62 | 6,62 | 6,62 |
| 2003 | 6,89 | 6,89 | 6,89 |
| 2004 | 7,15 | 7,15 | 7,15 |
| 2005 | 7,41 | 7,41 | 7,41 |
| 2006 | 7,65 | 7,65 | 7,65 |
| 2007 | 7,87 | 7,87 | 7,87 |
| 2008 | 8,09 | 8,09 | 8,09 |
| 2009 | 8,30 | 8,30 | 8,30 |
| 2010 | 8,50 | 2,13 | 8,50 |
| 2011 | 8,70 | 2,17 | 8,70 |
| 2012 | 8,89 | 2,22 | 8,89 |
| 2013 | 7,50 | 1,87 | 1,87 |
| 2014 | 6,33 | 1,58 | 1,58 |
| 2015 | 5,34 | 1,33 | 1,33 |
| 2016 | 4,50 | 1,13 | 1,13 |
| 2017 | 3,80 | 0,95 | 0,95 |
| 2018 | 3,20 | 0,80 | 0,80 |
| 2019 | 2,70 | 0,68 | 0,68 |
| 2020 | 2,28 | 0,57 | 0,57 |
| 2021 | 1,92 | 0,48 | 0,48 |
| 2022 | 1,62 | 0,41 | 0,41 |
| 2023 | 1,37 | 0,34 | 0,34 |
| 2024 | 1,16 | 0,29 | 0,29 |
| 2025 | 0,97 | 0,24 | 0,24 |
| 2026 | 0,82 | 0,21 | 0,21 |
| 2027 | 0,69 | 0,17 | 0,17 |
| 2028 | 0,59 | 0,15 | 0,15 |
| 2029 | 0,49 | 0,12 | 0,12 |
| 2030 | 0,42 | 0,10 | 0,10 |
| 2031 | 0,35 | 0,09 | 0,09 |
| 2032 | 0,30 | 0,07 | 0,07 |
| 2033 | 0,25 | 0,06 | 0,06 |
| 2034 | 0,21 | 0,05 | 0,05 |
| 2035 | 0,18 | 0,04 | 0,04 |
| 2036 | 0,15 | 0,04 | 0,04 |
| 2037 | 0,13 | 0,03 | 0,03 |
| 2038 | 0,11 | 0,03 | 0,03 |
| 2039 | 0,09 | 0,02 | 0,02 |
| 2040 | 0,08 | 0,02 | 0,02 |
| 2041 | 0,06 | 0,02 | 0,02 |
| 2042 | 0,05 | 0,01 | 0,01 |
| Total | 198,21 | 142,89 | 162,46 |

As emissões evitadas são apresentadas na Tabela 14 a partir de 2010 ou 2013. Conforme se observa na Tabela 2 da página 22 desse documento, o GWP do CH₄ é 21 vezes superior ao do CO₂, de acordo com essa equivalência, é possível estimar a quantidade de CO₂ que deixaria de ser emitida para os casos onde houvesse recuperação.

Tabela 14 – Emissões evitada (tCO_{2eq})

| | Com recuperação de CH₄ em 2010 | Com recuperação de CH₄ em 2013 |
|--------------|--|--|
| 2009 | 0,00 | 0,00 |
| 2010 | 6.378,62 | 0,00 |
| 2011 | 6.524,72 | 0,00 |
| 2012 | 6.665,51 | 0,00 |
| 2013 | 5.623,46 | 5.623,46 |
| 2014 | 4.744,31 | 4.744,31 |
| 2015 | 4.002,61 | 4.002,61 |
| 2016 | 3.376,86 | 3.376,86 |
| 2017 | 2.848,94 | 2.848,94 |
| 2018 | 2.403,55 | 2.403,55 |
| 2019 | 2.027,79 | 2.027,79 |
| 2020 | 1.710,78 | 1.710,78 |
| 2021 | 1.443,32 | 1.443,32 |
| 2022 | 1.217,68 | 1.217,68 |
| 2023 | 1.027,31 | 1.027,31 |
| 2024 | 866,71 | 866,71 |
| 2025 | 731,21 | 731,21 |
| 2026 | 616,90 | 616,90 |
| 2027 | 520,45 | 520,45 |
| 2028 | 439,09 | 439,09 |
| 2029 | 370,44 | 370,44 |
| 2030 | 312,53 | 312,53 |
| 2031 | 263,67 | 263,67 |
| 2032 | 222,45 | 222,45 |
| 2033 | 187,67 | 187,67 |
| 2034 | 158,33 | 158,33 |
| 2035 | 133,58 | 133,58 |
| 2036 | 112,70 | 112,70 |
| 2037 | 95,08 | 95,08 |
| 2038 | 80,21 | 80,21 |
| 2039 | 67,67 | 67,67 |
| 2040 | 57,09 | 57,09 |
| 2041 | 48,17 | 48,17 |
| 2042 | 40,64 | 40,64 |
| Total | 55.320,06 | 35.751,21 |

Ainda de acordo com Tabela 14, se houvesse a recuperação do CH₄ a partir de 2010 seria evitado o lançamento de mais de 55.mil tCO₂. Segundo a EMBRAPA (2009), um veículo movido a gasolina emite aproximadamente 0,035 tCO₂ a cada 100 km rodados, supondo que este veículo faça esse percurso de 100 km diariamente, isso implica em uma emissão de 12 tCO₂ por ano. As emissões potencialmente evitadas pelo aterro de Sorocaba seriam equivalentes a retirar 135 mil carros de circulação no período, e se o veículo fosse movido a álcool, seria equivalente a retirar 684 mil

veículos que segundo a EMPRAPA (2009) emite 0,007 tCO₂ para o mesmo percurso.

Se essa quantidade de CO₂ evitada for utilizada para obter RCE, é possível obter uma receita equivalente a 550.000 Euros⁸ ou R\$1,5 milhão⁹.

Se a recuperação do metano ocorrer a partir de 2013 ocorrerá uma emissão 35% superior do que se houver uma recuperação a partir de 2010 e se essa emissão for comercializada na forma de RCEs ocorrerá uma perda de R\$ 535 mil que poderia estar sendo utilizada em benefício do município.

A estimativa do coeficiente de potência equivalente do biogás (CP) é feita de acordo com a Equação 19 descrita na página 40 desse documento e cujos resultados são apresentados a seguir:

Da Equação 19, na página 40, e empregando-se os dados da Tabela 12, na página 52 deste documento:

$$CP = \frac{1,58.10^6 m^3}{31,536.10^6 s} . 35,53.10^6 \frac{J}{m^3} . 0,75 . \frac{1}{GgCH_4} \Rightarrow CP = \frac{1,58.10^6 . 35,53.10^6 . 0,75 J}{31,536.10^6} . \frac{1}{s} . \frac{1}{GgCH_4}$$

ou seja:

$$CP = 1,3.10^6 W . \frac{1}{GgCH_4} \Rightarrow CP \cong \frac{1,3MW}{GgCH_4}$$

Portanto, para cada Gg de CH₄ emitido pelo aterro, equivalem 1,3MW. Esse coeficiente pode ser empregado de maneira geral para qualquer caso, assim como foi empregado para estimar a potência disponível no aterro de Sorocaba que é apresentada nas Figura 18, Figura 19 e Figura 20, abaixo.

A Figura 18 apresenta a potência disponível pelo aproveitamento do biogás no aterro desde 1986 até 2042 e válida para o período posterior a 2010.

⁸ Considerando a tCO₂ valendo €10,00, válida para junho de 2009.

⁹ Considerando a cotação €1,00 = R\$2,70, válida para junho de 2009.

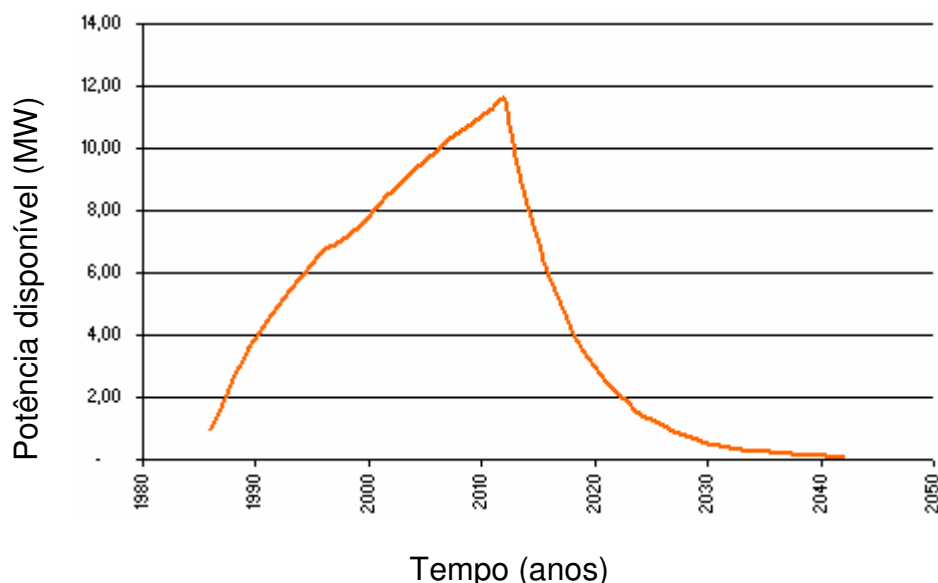


Figura 18 - Potência disponível.

A Figura 19 apresenta a potência disponível para o aproveitamento iniciado em 2010. Cada patamar apresenta uma faixa de potência na qual poderá se escolher um uso. Nos patamares podem ser observados os períodos em que ter-se-á determinada potência disponível.

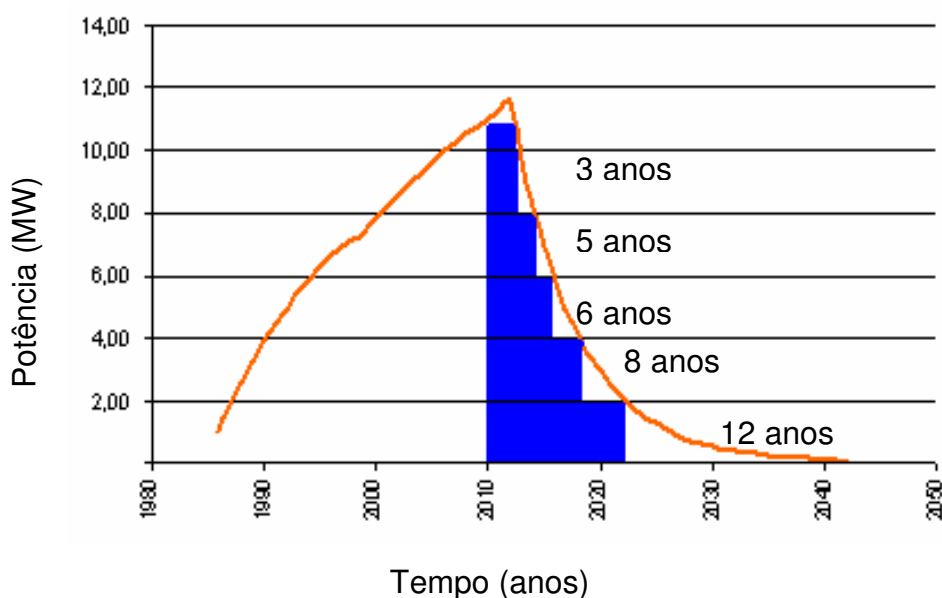


Figura 19 - Potência disponível.

A Figura 20 apresenta a potência disponível para o aproveitamento iniciado em 2013. Cada patamar apresenta uma faixa de potência na qual poderá se estabelecer o uso. Nos patamares encontram-se os período em que ter-se-á

determinada potência. Especialmente nessa figura, representou-se o ano de recuperação de 2012, o que obviamente não é aplicável, pois se estabeleceu nesse caso a hipótese de início da recuperação em 2013.

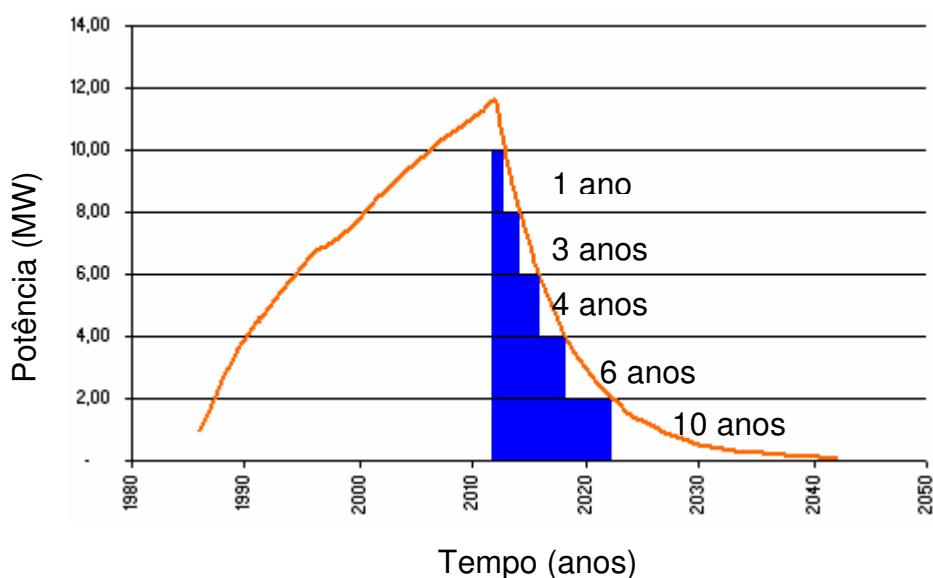


Figura 20 - Potência disponível.

Estabeleceu-se a potência disponível no aterro, mas não se realizou um estudo mais detalhado a respeito dos usos dessa potência. Esse pode ser um tema para ser desenvolvido em estudo futuro. Como se sabe, o biogás pode ser utilizado para cocção, em caldeiras a vapor, em uso veicular, em iluminação a gás, em tratamento de chorume entre outros usos onde é empregada a queima direta do biogás ou onde ele é empregado para a geração de eletricidade em geradores e turbinas a gás (CETESB, 2006).

O aproveitamento de maior potência é possível por um período menor. A opção de um aproveitamento que use 2MW indica que a aplicação disporá de energia suficiente por um período de 10 a 12 anos.

A escolha da opção uso da potência disponível deve incluir a consideração da eficiência da máquina térmica que será adotada. A geração de energia elétrica por grupo gerador, por exemplo, tem eficiência típica de 30%, o que indica que podem ser instalados, aproximadamente, 700kW e que gerariam mais de 6.000MWh/ano e suficientes para 1.700 famílias¹⁰.

¹⁰ Supondo cada família com consumo de 300kWh/mês

Quanto mais próximo estiver o consumidor, menor será o custo para esse aproveitamento, portanto, os consumidores diretos potenciais são as indústrias no entorno, o próprio aterro para uso nas instalações internas e as residências nas proximidades. Um exemplo de consumidor potencial para o biogás gerado no aterro de Sorocaba seria o condomínio Passos do Ibiti localizado entre a Av. Camilo Julio e Av. Fernando Stecca, a aproximadamente 200 m do aterro de Sorocaba. Esse possui uma área de 1.000m² e aproximadamente 1.100 casas. (IBITI, 2009)¹¹.

Para as estimativas de emissões e potência se estabeleceu o encerramento das atividades em 2012. Embora, já esteja com sua capacidade se esgotando, a falta de um local adequado para se implantar o novo aterro favorece o prolongamento da vida útil do mesmo.

Para as estimativas foram necessárias previsões e estimativas de geração de resíduo (TaxaRSU), perfil de resíduo (L_0) e população (Pop). O estudo incluiu a mobilidade dessas variáveis no tempo.

O ideal seria que houvesse dados suficientes para se observar essas variações no tempo, mas esses não existem ou não foram encontrados. Portanto, por falta ou por inadequação, utilizou-se alguns dados gerais como por exemplo, a reunião de composições do Estado.

Para a população, embora houvesse uma quantidade razoável de dados, foi necessário adotar um critério que permitisse também realizar previsões.

Todos os dados necessários à estimativa foram solicitados à prefeitura ou obtidos na literatura.

¹¹ Dado da administração do condomínio, fornecido por e-mail (administração@parqueibiti.com.br).

Conclusão

O biogás, se lançado diretamente na atmosfera, agrava o efeito estufa. Pode ser recuperado pela simples queima ou com aproveitamento energético, pois trata-se de um combustível.

A sua recuperação diminui os efeitos sobre o ambiente e pode gerar RCEs. A quantificação de emissões permite o estabelecimento de metas de redução de emissões e pode ser utilizada como instrumento para orientar as políticas públicas.

No estudo foram realizadas duas hipóteses para o início da recuperação do metano no aterro, uma para 2010 e outra para 2013. Se esta recuperação ocorrer somente a partir de 2013, haverá aproximadamente 20tCO_{2eq} a mais sendo lançadas na atmosfera do que se a recuperação se iniciar a partir de 2010 e se essas emissões evitadas forem comercializadas na forma de RCEs haverá um prejuízo econômico de aproximadamente R\$535 mil. Essas perdas podem ser minimizadas se as questões políticas que permeiam a questão forem solucionadas, diminuindo assim o tempo para que se inicie a recuperação do metano gerado no aterro.

O dimensionamento das emissões de CH₄ do aterro de Sorocaba concluiu por diferentes faixas de potência, o que implicam em diferentes tempos de disponibilidade, conforme se observa nas Figura 18, Figura 19, Figura 20, nas páginas 62 e 63 desse documento. Para diferentes potências definem-se diferentes usos.

Hoje, há aproximadamente 30 projetos de MDL com recuperação e, em alguns casos, uso de GDL, reduzindo os custos operacionais do aterro, contribuindo para a redução das emissões dos gases de efeito estufa e para o desenvolvimento sustentável regional, como determinam o Protocolo de Quioto, a Agenda 21, a UNFCCC e tantos outros tratados internacionais em meio ambiente.

O estudo realizado é preliminar e pode servir como base para novos estudos e aperfeiçoamentos como, por exemplo, estudos de viabilidade econômica para se definir a melhor forma de aproveitar o gás.

Anexos

Anexo A - Conversão da massa de CH₄ (Gg) para volume (Nm³)

Método

Para essa conversão definem-se duas situações 1 e 2, descritas a seguir:

À condição 1 correspondem as condições do gás na CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão) que é a condição experimental com temperatura e pressão de 273,15 K (0 °C) e 101 325 Pa (101,325 kPa = 1,01325 bar = 1 atm = 760 mmHg). WIKIPÉDIA, 2009. Esta condição é geralmente empregada para medidas de gases em condições atmosféricas.

À condição 2 corresponde a condição considerada real, na qual a temperatura é igual a 35°C, referindo-se ao interior do aterro. Tal temperatura foi adotada para as estimativas de emissões de CH₄ do aterro de Sorocaba, utilizando-se o método IPCC, 2000.

Para realizar a conversão empregou-se a Equação 22 – Equação de estado dos gases perfeitos ou Equação de Clapeyron:

$$PV = nRT \quad \text{Equação 22 – Equação de estado dos gases perfeitos}$$

onde:

| | | | |
|---|---|-------------------------------|----------------|
| P | = | Pressão | [atm] |
| V | = | Volume molar | [L/mol] |
| n | = | Número de moles | [adimensional] |
| R | = | Constante Universal dos gases | [atm.L/mol.K] |
| T | = | Temperatura absoluta | [K] |

Reescrevendo a Equação 22:

$$\frac{PV}{T} = nR$$

Considerando as diferentes condições (1 e 2) submetidas à pressão constante, obteve-se :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Empregando-se os dados, estimou-se V₂, que é o volume ocupado por um mol do gás na condição 2, ou seja, seu volume molar.

Assim, considerando a massa molar do gás, o volume molar na condição 2, uma massa qualquer do gás e a relação de proporcionalidade existente, obtêm-se a Equação 23:

$$Volume = \frac{V_2 \cdot m}{M} \quad \text{Equação 23 - Volume ocupado por uma massa qualquer de CH}_4$$

onde:

| | | | |
|--------|---|--------------------------|---------------------------|
| M | = | Massa molar | [g/mol] |
| m | = | Massa de CH ₄ | [g] |
| Volume | = | Volume | [L] ou [Nm ³] |

Dados:

Tabela 15 – Dados para a conversão de massa de CH₄ emitido, para volume.

| Dado | Quantidade | Unidade | Obs: |
|-------------------|------------|------------------------|--------------------------------|
| Índice 1 | | | condição inicial |
| Índice 2 | | | condição final |
| P ₁ | | | Igual a P ₂ |
| N | | [número de moles] | constante |
| R _{CNTP} | 0,082 | [atm.L/mol.K] | constante |
| T ₁ | 273 | [K] | |
| T ₂ | 308 | [K] | |
| V ₁ | 22,4 | [L/mol] | volume molar |
| M | 16 | [g] | massa molar do CH ₄ |
| M | 1 | [Gg] | |
| Volume | | [Nm ³ ou L] | 1Nm ³ = 1000L |
| Potência | | [J/s ou W] | 1J/s = 1W |
| Notação | | | 1G = 10 ⁹ |

Resultados

$$V_2 \cong 25,27L$$

∴ Um gás a uma temperatura de 35°C (308K) ocupa um volume de aproximadamente 25,27L.

Considerando que 1mol de CH₄ possui 16g e que a 35°C ocupa um volume de 25,27L, para 1Gg de CH₄, obteve-se:

$$\text{Volume} = 1,58 \text{ GL} \Rightarrow 1,58 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3$$

\therefore 1Gg de CH₄ a 35°C ocupa aproximadamente 1,58.10⁶Nm³.

Anexo B - Composições de RSU

Tabela 16 - Composições de RSU

| Referências | 2 | 2 | 12 | 11 | 11 | 1 | 9 | 5 | 8 | 4 | 6 | 9 | 6 | 3 | 7 | 10 | |
|-------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|---------------|---------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------|--------|
| Municípios | São Paulo (SP) | São Paulo (SP) | São Paulo (SP) | Guarulhos (SP) | Guarulhos (SP) | Santos (SP) | Campinas (SP) | Campinas (SP) | Indaiatuba (SP) | Presidente Prudente (SP) | São Carlos (SP) | São Carlos (SP) | São Carlos (SP) | Santo André (SP) | Botucatu (SP) | Araraquara (SP) | |
| Ano | 1990 | 1993 | 2003 | 1996 | 2002 | 1979 | 1985 | 1995 | 2007 | 2000 | 1989 | 1991 | 2005 | 2007 | 1999 | 1996 | |
| Composição | L ₀ = | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,07 | |
| | DOC = | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,19 | 0,15 | 0,13 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,19 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,13 | |
| | A (%) | 29,60 | 14,43 | 14,95 | 26,00 | 19,26 | 22,63 | 21,10 | 29,76 | 24,60 | 15,00 | 21,30 | 27,00 | 7,38 | 12,50 | 10,27 | |
| | B (%) | - | - | 1,00 | 1,00 | 0,32 | 2,79 | - | 15,10 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | C (%) | 47,40 | 64,43 | 57,54 | 55,00 | 42,85 | 18,13 | 72,30 | 39,55 | 40,10 | 71,50 | 56,70 | 56,70 | 59,08 | 50,00 | 74,11 | |
| | D (%) | 3,00 | 4,52 | 1,62 | 2,00 | 2,01 | 3,46 | - | 6,71 | - | - | - | - | 0,90 | - | - | |
| Resíduo | Fósseis | 9,00 | 12,08 | 17,01 | 7,00 | 28,24 | 4,15 | 3,60 | 13,21 | 10,70 | 3,00 | 8,50 | 8,50 | 10,47 | 30,60 | 8,37 | |
| | Inertes | 18,50 | 16,42 | 24,85 | 16,00 | 35,48 | 53,04 | 6,60 | 23,98 | 20,20 | 13,50 | 22,00 | 15,30 | 33,54 | 36,70 | 7,19 | |
| | Erro da informação | 1,50 | 0,20 | 0,04 | - | 0,08 | -0,05 | - | - | - | - | - | 1,00 | - | -0,10 | 0,06 | |
| | Papel | | | | | 6,34 | 17,17 | 19,00 | 21,50 | | | 21,30 | | | | 2,10 | |
| | Papel em boas condições | | | | | | | | | 4,60 | | | | | | | |
| | Papel em más condições | | | | | | | | | 4,60 | | | | | | | |
| | Papel e papelão | 29,60 | 14,43 | 11,08 | 26,00 | | | | | 15,00 | 21,30 | | 6,44 | | 7,61 | | |
| | Papelão | | | | | 8,48 | 2,89 | | 8,26 | | | | | | | | |
| A | Papel misto | | | | | | | | | | | | | 2,60 | | | |
| | Trapo | | | 3,87 | | 4,44 | 2,57 | 2,10 | | 6,10 | | 3,40 | | | 1,84 | | |
| | Trapo e Couro | | | | | | | | | | | | | 3,80 | | | |
| | Embalagens com mais de um material | | | | | | | | | 1,00 | | | | | | | |
| | Frauda | | | | | | | | | 3,60 | | | | | | | |
| | lixo de banheiro | | | | | | | | | 3,60 | | | | | | | |
| | Embalagem longa vida | | | | | | | | | 1,10 | | 2,30 | | | 0,82 | | |
| | Multicamadas | | | | | | | | | | | | | 1,20 | | | |
| | Embalagem cartonada | | | | | | | | | | | | 0,94 | | | | |
| | Animais mortos | | | | | | 0,12 | | | | | | | | | | |
| | Couro | | | | | 0,32 | 1,02 | | | | | | | | | | |
| B | Couro e borracha | | | | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| | Sapatos | | | | | | | | | 1,50 | | | | | | | |
| | Matos, folhas | | | 1,00 | | | 1,65 | | | 13,60 | | | | | | | |
| | Madeira, couro e borracha | 3,00 | 4,52 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Madeira, tecido e similares | | | | | | | 6,71 | | | | | | | | | |
| C | Restos de comida | | | | | | 18,13 | | | 40,10 | 71,50 | | | | | | |
| | Matéria orgânica | 47,40 | 64,43 | | 55,00 | | | 72,30 | 39,55 | | | 56,70 | 56,70 | 59,08 | | 74,11 | |
| | Matéria orgânica comportável | | | | | 42,85 | | | | | | | | 50,00 | | 82,16 | |
| | Matéria orgânica putrecível | | | 57,54 | | | | | | | | | | | | | |
| D | Madeira | | | 1,62 | 2,00 | 2,01 | 3,46 | | | | | | | | | | |
| | Coco | | | | | | | | | | | | | 0,70 | | | |
| | Plástico | 9,00 | 12,08 | 16,79 | 7,00 | | | 3,60 | 13,21 | | 3,00 | 8,50 | 8,50 | 10,47 | 0,20 | 1,23 | |
| | Plástico em pedaços | | | | | | 1,58 | | | | | | | | | 12,10 | |
| | PP(filme) | | | | | | | | | 0,90 | | | | | | | |
| | PP | | | | | | | | | | | | | | 0,23 | | |
| | PP(rígido) | | | | | | | | | 0,40 | | | | | | | |
| | PS(filme) | | | | | | | | | 0,50 | | | | | | | |
| | PS(rígido) | | | | | | | | | 0,90 | | | | 0,80 | | | |
| | Plástico PET | | | | | 7,79 | | | | | | | | 28,80 | 1,24 | | |
| | Papel filme | | | | | | | | | | | | | 4,90 | | | |
| Fósseis | Plástico PET(incolor) | | | | | | | | | 0,80 | | | | | | | |
| | Plástico PET(colorido) | | | | | | | | | 0,30 | | | | | | | |
| | Plástico PVC | | | | | | | | | 0,70 | | | | | 0,09 | | |
| | PEAD | | | | | | | | | | | | | | 0,76 | | |
| | PEBD | | | | | | | | | | | | | | 0,17 | | |
| | LDPE(filme) | | | | | | | | | 2,30 | | | | | | | |
| | LDPE(rígido) | | | | | | | | | 0,10 | | | | 0,80 | | | |
| | HDPE(filme) | | | | | | | | | 2,40 | | | | | | | |
| | HDPE(rígido) | | | | | | | | | 1,40 | | | | | | | |
| | Plástico filme | | | | | | 2,57 | | | | | | | | 4,65 | | |
| | Plástico duro | | | | | 6,92 | | | | | | | | | | | |
| | Plástico mole | | | | | 13,00 | | | | | | | | | | | |
| | Borracha | | | 0,22 | | 0,53 | | | | | | | | | | | |
| | Resíduo perigoso doméstico | | | | | | | | | | | | | 1,10 | | | |
| | Vidro | 4,20 | 1,10 | 1,79 | 2,00 | 2,65 | 2,11 | 0,80 | 3,36 | 1,90 | 6,00 | 1,40 | 1,40 | 1,67 | 1,99 | 0,84 | |
| | Vidro claro | | | | | | | | | | | | | | 0,30 | | |
| | Garrafas de vidro | | | | | | | | | | | | | | 0,10 | | |
| | Pilhas e baterias | | | | | 0,44 | | | | 0,10 | | | | | 0,40 | | |
| | Metal | | | 2,18 | 4,00 | | 4,63 | 2,20 | 4,86 | | 4,50 | | 5,40 | | | 2,80 | |
| | Metais ferrosos | | | | | 3,18 | | | | | | | | | | | |
| | Metais e latas | 5,30 | 3,24 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Metais e alumínio | | | | | | | | | | | | 5,40 | 1,31 | | | |
| Inertes | Outros metais | | | | | | | | | | | | | 0,60 | | | |
| | Alumínio | | | | | 0,97 | | | | 0,50 | | | | | 0,32 | | |
| | Aço | | | | | | | | | 1,50 | | | | | 3,53 | | |
| | Vidro, terra e pedra | | | | | | | | | | | | | 0,50 | | | |
| | Inertes | | | 3,87 | | | | | | | | | | | | | |
| | Entulhos | | | | | | | | | 3,70 | | | | | | | |
| | Louça | | | | | | 1,01 | | | | | | | | | | |
| | Cerâmica | | | | | | 41,14 | | | | | | | | | | |
| | Terra e pedras | | | | 3,00 | | | | | | | | | | | | |
| | Agregado fino | | | | | | | 2,55 | | | | | | | | | |
| | Diversos | | | | | | | | 1,80 | | | | | | 1,35 | | |
| | Rejeito | | | | | | | | | | | | 6,70 | 20,09 | | | |
| | Total | 98,50 | 99,80 | 99,96 | 100,00 | 99,92 | 100,05 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99,00 | 100,00 | 100,00 | 99,94 | 100,00 |

Referências da Tabela 16

- 1 CETESB. **Destinação final dos resíduos sólidos da baixada Santista**, relatório parcial, 1979.
- 2 IPT; CEMPRE. **Manual de gerenciamento integrado**. São Paulo, 2000,370p.
- 3 FESPSP. **Relatório de Impacto Ambiental para a ampliação da área de disposição de resíduos da CTR Santo André,Santo André - SP**, 2007.
- 4 SOBRINHO, N.L.C. **Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente**. 2000, 128f. Tese (Magister Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.
- 5 ENSINAS, A.V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. 2003.143f.Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2003.
- 6 FRÉSCA, F.R.C. et al. **Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP**. 2008.
- 7 OLIVEIRA, S.Caracterização física do Resíduo Sólido Doméstico (RSD) da cidade de Botucatu/SP, In.;**Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. ABES, Vol.4 – N.4, Setembro, 1999, São Paulo/SP.
- 8 MANCINI, S.D.M et al. **Recycling potential of urban solid waste destined for sanitary landfills: the case of Indaiatuba, SP, Brazil**, 2007.
- 9 NÓBREGA, C.C. et al. Caracterização do lixo doméstico da cidade de Aracaju – SE.In: SILUBESA-Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 6,1994, Florianópolis. **Anais...**Florianópolis: ABES,1994.
- 10 FRÉSCA, F.R.C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos, S.P.**, a partir da caracterização física. 134f, 2007.Dissertação: Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- 11 Prefeitura Municipal de Guarulhos. **Relatório final de caracterização dos resíduos sólidos urbanos da Prefeitura Municipal de Guarulhos**. Guarulhos, 2002. 40p.
- 12 EPE; MCT. **Estudos associados ao plano decenal de energia PDE 2008/2017**. 2008. 82f.

Referências bibliográficas

- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2007**. 151p. 2008.
- ALVES, B. J. R. et al. **Mitigação de gases de efeito estufa pelo uso de etanol da cana de açúcar produzido no Brasil**. EMPRAPA, 2009. 14p. Disponível em <<http://www.agrosoft.org.br/agropag/209871.htm>>. Acesso em 30/05/2009.
- ALVES, J.W.S; VIEIRA, S. M. M. CETESB. **Inventário Nacional de Emissões de metano pelo manejo de resíduos - 1990 a 1994**, 2000.
- ALVES, J.W.S. **Diagnóstico Técnico Institucional e uso energético do Biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**.165f. 2000. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2000. 165p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 10.004**: Classificação dos resíduos. 2004. 71p.
- BINGEMER, H.G.;CRUTZEN, P.J.. The production of methane from solid wastes. In: **Jornal of Geophysical Research**, Vol.92, NO D2, p. 2181-2187, february 20,1987.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia Científica**. 5ªEdição, 241p. São Paulo, 2002.
- CETESB. **Inventário de Resíduos Sólidos Domiciliares**. 2008. 183p.
- CETESB. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares**, Relatório 2003, São Paulo, 2004.
- CETESB. **Manual do usuário do programa de computador Biogás - Geração e uso energético – Aterros versão 1.0**. 59p. São Paulo, 2006.
- CGEE. **Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Brasília, DF:2008.276p. ;il.; 24 cm. ISBN – 978-85-60755-08-0.
- DANIEL, L.A.; FERREIRA, J.C. **Análise de 47 anos de chuva em Sorocaba**. Faculdade de Tecnologia de Sorocaba – CEETEPS; Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais – NEPA. Sorocaba, 1993. 6p.
- FGV. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – Guia de Orientação**. 90p. São Paulo, 2002.
- GOLDEMBERG, J; NIGRO, F.E.B; COELHO, S.; **Bioenergia no Estado de São Paulo - Situação atual, perspectivas, barreiras e propostas**. Imprensa Oficial do Estado, São Paulo. 2008. 152p.
- IBAM. **Manual Gerenciamento Integrado de resíduos Sólidos**.193p. 2001.
-

IPCC. **Guia de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa** Vol. 5 – Waste.

IPCC. **Guia Revisado de 1996 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa**, aprovado pela UNFCCC na COP3 em 1997 em Kyoto Vol. 2.

IPCC. **Guia Revisado de 1996 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa**, aprovado pela UNFCCC na COP3 em 1997 em Kyoto Vol. 2.

IPCC. Mudança do Clima, 1995. **Sumário para formuladores de políticas**. 55p. Brasília, 2000.

IPCC. **Workbook, Guia de Boas Práticas e de Gerenciamento de Incertezas para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa**. Volume Único.2000.

LA ROVERE, E. L.; COSTA, C.V.; DUBEUX, C. B. S. **Aterros Sanitários no Brasil e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL):** Oportunidades de promoção de desenvolvimento sócio-ambiental. 2005.

MARTINS, L. D. **Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na região metropolitana de São Paulo**. 2006.219f. Tese Doutorado – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006.

MCT. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo**.13f, 2008.

MMA. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**. 2007. Disponível em:<[http://www.conferenciaestadualdomeioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/Alteracoes Climaticas no BR Marengo 2007.pdf](http://www.conferenciaestadualdomeioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/Alteracoes_Climaticas_no_BR_Marengo_2007.pdf)>. 54p.

OLIVEIRA, et al. Geração de energia com Biogás e o MDL. In: **BIOGÁS** Pesquisas e Projetos no Brasil. 2006. pg. 63 a 86.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 001, janeiro de 1986. Publicado no D. O. U de 17 /2/86.<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>> - acesso em 31/10/2008.

WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental. **Estudo de Impacto Ambiental para o aterro de Sorocaba**. 2007.

Páginas da Internet

CETESB. Biogás. São Paulo, 2008. Disponível em:

<http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/default.asp>. Acesso em 10 out. 2008.

Página da Web dedicada ao fomento da recuperação e uso energético do biogás.

CETESB:

http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/negocia_inter/convencao.asp. Acesso em 06/10/2008.

Mudanças Climáticas. Informações e reflexões para um jornalismo contextualizado.

<http://www.mudancasclimaticas.andi.org.br/content/o-mdl-no-brasil-pioneirismo-resultados-e-perspectivas>. Acesso em 02/07/2009.

Prefeitura de Sorocaba.

<http://www.sorocaba.sp.gov.br/PortalGOV/cache/home.html>. Acesso: 08/10/2008.

Wikipédia:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Condi%C3%A7%C3%B5es_Normais_de_Temperatura_e_Press%C3%A3o, Acesso em 06/10/2008.
