

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PORCENTAGEM E DA ESTIMATIVA DE
GERAÇÃO DE GÁS METANO PARA O ATERRO SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE
RIO CLARO – SP**

Paola Pasqualini Gayego Bello

Rio Claro (SP)

2010

PAOLA PASQUALINI GAYEGO BELLO

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PORCENTAGEM E DA
ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE GÁS METANO PARA
O ATERRO SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE RIO
CLARO – SP**

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Campus de Rio Claro (SP), da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.*

Orientador: Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)
2010

604.6 Bello, Paola Pasqualini Gayego
B446e Estudo da variação da porcentagem e da estimativa de geração de gás metano para o aterro sanitário do município de Rio Claro - SP / Paola Pasqualini Gayego Bello. - Rio Claro : [s.n.], 2010
66 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro
Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

1. Resíduos. 2. Recuperação energética. 3. Aterros sanitários. 4.
Resíduos sólidos domiciliares. 5. Fonte alternativa de energia. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

PAOLA PASQUALINI GAYEGO BELLO

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PORCENTAGEM E DA
ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE GÁS METANO PARA O
ATERRO SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO – SP

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Campus de Rio Claro (SP), da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.*

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcus Cesar A. Alves de Castro (orientador)
Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia
Prof. Dr. Samuel Conceição de Oliveira

Rio Claro, 27 de outubro de 2010.

assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

*A todos aqueles que não tiveram oportunidade de
estudo neste país e que ainda acreditam e lutam por
um Mundo mais justo e melhor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

A essa força maior que rege todas as formas de vida e nos conduz pelos caminhos do Mundo, mais conhecida como Deus.

À minha mãe, meu porto seguro, exemplo de mulher, de amor e dedicação e que por ter me dado a oportunidade da Vida, é responsável pela Luz do meu caminho até aqui.

Ao meu pai, de uma sabedoria nata, cujos ensinamentos e filosofias sempre se fizeram presentes em toda minha formação como cidadã e ser humano.

À minha prima Erica, inspiração dos meus estudos, exemplo de entusiasmo, dedicação e perseverança.

A toda minha família, que sempre esteve presente nesta jornada, me acompanhando e me apoiando em cada etapa, cada estudo e esforço empregado; Em especial à minha avó Eunice, cujo amor incondicional foi inexplicável durante os momentos em que passou conosco.

Ao meu namorado Paulo, pelo amor, carinho e paciência, por tantas conversas, discussões, ideias e momentos tão especiais compartilhados.

Ao meu orientador Marcus, pela oportunidade, pelos ensinamentos e paciência durante toda a realização do trabalho e pelas aulas memoráveis que ministrou durante o curso.

Aos professores Marcelo e Samuel pela colaboração nas correções deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro.

A todo pessoal que trabalha no Aterro Sanitário de Rio Claro – SP, pelo apoio nos trabalhos de campo, em especial ao Eng. Luiz Antonio Seraphim pelas informações prestadas e ao Sr. Nestor (in memoriam) pela ajuda no tempo em que esteve presente.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), pela oportunidade de estudo e em especial à Pró-reitoria de Pesquisa (PROPe) e à Assessoria de Relações Externas (AREX), pelas oportunidades fornecidas a mim durante o período de graduação.

Aos meus amigos do curso, que sempre estiveram ao meu lado, estudando e compartilhando momentos eternos: Roberta, Marcella, Fernanda, Efigênia, Danielle, Júlia, Lucas Fuess, Richard Tomasella e Richard Francisco; Em especial à Natália, minha grande amiga, exemplo de coragem, humildade e generosidade.

Aos meus queridos amigos Renan, Andrei e Iruama, pelos infinitos momentos de alegria e superação que passamos juntos.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação profissional e pessoal nesses anos de aprendizado.

“Necessitamos, em primeiro lugar, comunicar nossas ideias em linguagem mais simples e direta, capaz de envolver mais gente. Precisamos também de algum recolhimento para elaborar melhor a relação entre as ideias e a prática. Achar maneiras de transformar o conhecimento em fazeres, em tecnologia, em substituição de coisas e comportamentos. Nesses tempos de informação rápida, superficial e excessiva, sem recolhimento para avaliar e processar, restará o consumo: das novidades, dos tratados, das declarações sem compromisso. (...)

Minha sensação incômoda não me impede de reconhecer avanços importantes. aguardo, contudo, o tempo todo e com certa ansiedade, o aparecimento de telescópios que nos façam enxergar mais longe, ou seja, os eventos e inventos capazes de acelerar o fluxo das mudanças”.

Marina Silva

RESUMO

O aumento da demanda por energia e a busca por fontes alternativas é um fato marcante e atual. A gestão dos resíduos sólidos domiciliares também se insere na questão, tendo em vista a possibilidade de geração de energia em aterros sanitários existentes, que poderá proporcionar autonomia financeira para o sistema de gestão de resíduos e melhorar o balanço ambiental de aterros sanitários no Brasil, atualmente utilizados apenas para a disposição final. O gás de aterro é uma fonte alternativa de energia viável já testada em aterros sanitários no Mundo e no Brasil. Assim, a pesquisa teve como objetivo avaliar a porcentagem de gás metano (CH_4) presente em três dissipadores de gases do aterro sanitário do município de Rio Claro – SP, e estimar o potencial de geração de metano ao longo da vida útil do aterro, por meio da aplicação de modelo matemático. Como resultado verificou-se que em geral a porcentagem de metano presente nos gases é significativa, ficando entre 50 e 62%. Observou-se também que resíduos com tempo de disposição entre 8 e 12 meses, já encontram-se na fase metanogênica. Finalmente, observou-se uma tendência de aumento da geração de metano na transição dos períodos de chuva e estiagem.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Domiciliares. Gás de Aterro. Metano. Fonte alternativa de Energia. Aterro sanitário.

ABSTRACT

Increased demand for energy and the search for alternative energy sources are remarkable and current facts. The management of domestic solid waste is also part of the issue in view of the possibility of power generation in existing landfills, which could provide financial autonomy to the system of waste management and improve the environmental balance of landfills in Brazil, currently only used for final solids disposal. Landfill gas is a viable alternative energy source has been tested in landfills in the World and in Brazil. Thus, the research aimed to evaluate the percentage of methane (CH₄) present in three sinks of gases from a landfill in the municipality of Rio Claro – SP (Brazil), and to estimate the potential methane generation over its life through the application of a mathematical model. As a result it was found that in general the percentage of methane present in the gases is significant, between 50 and 62%. It was also noted that waste with disposal time between 8 and 12 months already are in the methanogenic stage. Finally, there was a tendency to increase the generation of methane in the transition periods of rain and drought.

Keywords: Domestic Solid Waste. Landfill Gas. Methane. Alternative Energy Source. Landfill.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Detalhe esquemático de um aterro sanitário com suas componentes básicas.....	19
Figura 2 - Representação esquemática do ecossistema de um aterro sanitário	20
Figura 3 - Destino do resíduo para aterro sanitário, segundo as Grandes Regiões - 2000	20
Figura 4 - Destinação final dos RSD coletados no Brasil em 2008	21
Figura 5 - Sequências metabólicas da digestão anaeróbia.....	23
Figura 6 - Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de um aterro sanitário	24
Figura 7 - Emissões de metano (CH ₄) por setor de atividade no Brasil ocorridas em 2005	29
Figura 8 - Localização do município de Rio Claro – SP.....	36
Figura 9 - Mapa de localização do Aterro Sanitário de Rio Claro – SP.....	37
Figura 10 - Vista geral do aterro sanitário de Rio Claro - SP, com a localização aproximada dos pontos de amostragem de gases	39
Figura 11 - Método de coleta de gás nos dissipadores de gases do aterro.	40
Figura 12 - Kit para análise do Biogás	41
Figura 13 - Variação da porcentagem (%) de gás metano ao longo dos meses em função da precipitação	34
Figura 14 - Perfis da geração de gás para L ₀ = 150 m ³ CH ₄ /t. RSD e diferentes valores de k.49	49
Figura 15 - Perfis da geração de gás para L ₀ = 170 m ³ CH ₄ /t. RSD e diferentes valores de k.50	50
Figura 16 - Perfis da geração de gás para L ₀ = 225 m ³ CH ₄ /t. RSD e diferentes valores de k.50	50
Figura 17 - Perfis da geração de gás para L ₀ = 300 m ³ CH ₄ /t. RSD e diferentes valores de k.51	51
Figura 18 - Perfil de geração de gás considerando as condições específicas do aterro sanitário de Rio Claro – SP (L ₀ =225 m ³ CH ₄ /t e k=0,10 dia ⁻¹)	53
Figura 19 - Tela inicial do Programa Biogás Aterro 1.0, utilizado nas simulações do trabalho	65
Figura 20 - Entrada de dados do programa Biogás Aterro 1.0 para a estimativa da geração de metano	65

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Composição percentual média do resíduo sólido domiciliar (Brasil e EUA)	18
Tabela 2 - Composição média do biogás.....	27
Tabela 3 - Média e variação da concentração de gases nos drenos do aterro sanitário de Içara – SC	35
Tabela 4 - Valores dos parâmetros utilizados nas simulações para 4 cenários distintos.....	42
Tabela 5 - Campos de valores para k sugeridos correspondentes à precipitação anual e à degradabilidade do resíduo.....	43
Tabela 6 - Valores sugeridos para k e L_0 em função das características climáticas locais	43
Tabela 7 - Porcentagem de CO_2 obtido em diferentes pontos de amostragem do aterro sanitário de Rio Claro – SP.....	46
Tabela 8 - Porcentagem de CH_4 obtido em diferentes pontos de amostragem do aterro sanitário de Rio Claro – SP.....	46
Tabela 9 - Precipitações mensais no referido período (2009-2010).....	47
Tabela 10 - Valores anuais da vazão de metano no aterro sanitário de Rio Claro - SP para o cenário escolhido ($L_0=225 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ e $k=0,10 \text{ dia}^{-1}$)	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CEMPRE	Compromisso Empresarial para a Reciclagem
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFC	Cloro Flúor Carbono
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
COP	Conferência das Partes
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Fecop	Fundo Estadual de Prevenção e Controle da Poluição
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Global Warming Potential
Ha	hectares
Hab.	habitantes
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LandGEM	Landfill Gas Emission Model
LDRS	Locais de Disposição de Resíduos Sólidos
LMOP	Landfill Methane Outreach Program
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
mm	milímetros
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MW	Megawatts
NBR	Norma brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema
ONU	Organização das Nações Unidas
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PCJ	Piracicaba, Capivari e Jundiá
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas

pH	Potencial Hidrogeniônico
PROINFA	Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RAP	Relatório Ambiental Preliminar
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCE	Redução Certificada de Emissões
RSD	Resíduos Sólidos Domiciliares
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
t.	toneladas
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Resíduos Sólidos: definição e classificação	16
3.1.1 Geração e composição de Resíduos Sólidos Domiciliares	17
3.2 Disposição final de Resíduos Sólidos Domiciliares em Aterros Sanitários.....	18
3.3 Degradação anaeróbia da fração orgânica dos Resíduos Sólidos Domiciliares....	21
3.4 Potencial energético a partir do metano presente nos gases gerados em aterros sanitários	25
3.5 Características do biogás ou gás de aterro.....	26
3.6 Efeito Estufa e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)	29
3.7 Modelos matemáticos para a estimativa do potencial energético em aterros sanitários	31
3.8 Estudos de geração de gases em aterros sanitários brasileiros	34
3.9 Caracterização da área de estudo	36
4. MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1 Metodologia para análise da composição dos gases gerados no aterro	39
4.2 Metodologia para a estimativa teórica do potencial de geração de metano.....	41
4.3 Forma de Análise dos Dados	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 Variação da porcentagem de metano presente nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro e sua relação com o tempo de disposição dos resíduos e o índice pluviométrico	46
5.2 Projeção de cenários para a estimativa do potencial de geração de metano	49
5.3 Estimativa da geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro – SP	52
6. CONCLUSÕES.....	55
7. RECOMENDAÇÕES.....	57
8. PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	58
9. REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A – Programa Biogás Aterro 1.0	65

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente de energia e a busca por fontes alternativas são temas prioritários na agenda global. Segundo Goldemberg (2005), a explosão populacional aliada ao aumento do consumo “per capita” promoveu o acréscimo de 100 vezes no consumo de energia nos últimos dois séculos.

Atualmente os estudos sobre o aquecimento global e a emissão de gases de efeito estufa (GEE) tem sido foco de pesquisas e discussões mundiais. Os dados apresentados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC* têm demonstrado evidências da influência da atividade humana nas mudanças climáticas, principalmente por meio da emissão de gases de efeito estufa.

O desenvolvimento de tecnologias “limpas”, principalmente nos países em desenvolvimento, é uma realidade que se insere nos projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), criado pelo Protocolo de Kyoto (1997), em resposta às ações de redução de emissões. Mais recentemente, no denominado “Acordo de Copenhague” (2009) foram disponibilizados 30 bilhões de dólares para projetos MDL em países em desenvolvimento.

Em outro contexto, o aumento da geração de resíduos sólidos domiciliares e sua disposição adequada em aterros sanitários tornou-se um desafio para as administrações municipais, pois requerem elevados recursos financeiros e planejamento de médio e longo prazo. Só no Estado de São Paulo são produzidos cerca de 28 mil toneladas diárias de resíduos sólidos domiciliares (CETESB, 2008).

A fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares, disposta em aterros sanitários, sofre um processo de degradação predominantemente anaeróbia, gerando principalmente dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), e em menor quantidade gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3) e outros gases. A possibilidade de aproveitamento energético do metano constitui-se em uma fonte de energia alternativa, tendo em vista o elevado poder calorífico do deste gás, que em condições favoráveis corresponde de 50 a 60%, em volume, dos gases gerados em aterros sanitários (AZEVEDO, 2000 apud PIEROBON, 2007, p. 6).

A modelagem matemática é uma ferramenta moderna e muito utilizada para simular sistemas complexos e de engenharia, neste caso, para avaliar o potencial de geração de gás em aterros sanitários. O êxito na aplicação depende da confiabilidade dos dados de entrada e do grau de semelhança entre o local em questão e outros locais que possam ter sido modelados com sucesso (BRITO FILHO, 2005).

Assim, o estudo dos fatores que influenciam os processos de geração dos gases e a

estimativa segura do real potencial de geração de metano, por meio da aplicação de modelos matemáticos ajustados às condições brasileiras, constituem-se em um caminho para otimizar e viabilizar a utilização desta fonte alternativa de energia em aterros sanitários em operação e naqueles já encerrados.

Nesse sentido, a presente pesquisa teve por objetivo geral analisar a relação das porcentagens de gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) com o tempo de aterramento dos resíduos e a precipitação pluviométrica, tomando como recorte o aterro municipal de Rio Claro. Com a finalidade de se estimar o potencial de geração, foram gerados cenários que simularam situações favoráveis e desfavoráveis, por meio da aplicação do modelo matemático LandGEM da USEPA.

2. OBJETIVOS

A pesquisa teve como objetivo geral discutir a relação das porcentagens de gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) com o tempo de aterramento dos resíduos e a precipitação pluviométrica, tomando como recorte o aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Nesse sentido, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a porcentagem (%) de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) presente nos gases gerados no aterro;
- Estudar a relação da composição dos gases com as fases da degradação anaeróbia e o tempo de disposição dos resíduos no solo;
- Analisar a variação temporal da composição dos gases com os dados de precipitação pluviométrica;
- Avaliar o potencial de geração de gás metano, pela proposição de cenários e aplicação de modelo matemático.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos: definição e classificação

Resíduos sólidos são uma consequência da vida humana. Segundo Tchobanoglous et al. (1993), desde as sociedades primitivas, humanos e animais utilizam a Terra como recurso de apoio à vida e para dispor seus resíduos. Antigamente essa disposição de resíduos não representava um problema significativo, pois a população era pequena em relação à quantidade de terra disponível para a assimilação dos mesmos.

Hoje, com o aumento populacional e a mudança nos hábitos de vida das populações, a produção e o descarte de resíduos transformou-se num grande problema para a sociedade, tendo em vista a superação da capacidade do meio em assimilar os rejeitos descartados.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 10.004, 2004), “resíduos sólidos são resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, domiciliar, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Podem ser classificados em função de sua origem e de sua periculosidade.”

Ainda de acordo com a ABNT (NBR 10.004, 2004), os resíduos sólidos são classificados em função de sua periculosidade em:

- a) *Resíduos Classe I*: resíduos perigosos que em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento da mortalidade ou apresentarem efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;
- b) *Resíduos Classe II*: resíduos não perigosos, subdivididos em:
 - *Classe II A*: resíduos não inertes são aqueles que podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - *Classe II B*: resíduos inertes são aqueles que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme a ABNT (NBR 10.006, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da norma.

Os resíduos sólidos também podem ser classificados em função de sua fonte geradora, em:

- a) *Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)*, nos quais são incluídos:

- *Resíduos sólidos domiciliares (RSD)*: definidos como aqueles originados na vida diária das residências, constituído por restos de alimentos, produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis e uma grande diversidade de outros itens (IPT/CEMPRE, 2000);
 - *Resíduos de Serviços de Saúde (RSS)*: são os resíduos produzidos em hospitais, clínicas médicas e veterinárias, laboratórios de análises clínicas, farmácias, centros de saúde, consultórios odontológicos e outros estabelecimentos afins;
 - *Resíduos de Construção Civil (RCC)*: constitui-se de resíduos oriundos da construção civil, demolições, restos de obras, solos de escavações, etc.;
 - *Resíduos de poda e capina*: oriundos da limpeza pública urbana, além dos resíduos de varrição das vias públicas, limpezas de galerias, terrenos, córregos, praias e feiras livres.
- b) *Resíduos Industriais*, nos quais são incluídos:
- *Resíduos de Indústrias de transformação*: correspondem aos resíduos gerados nos diversos tipos de indústrias de processamento;
 - *Rejeitos radioativos*: são resíduos provenientes dos combustíveis nucleares e seu gerenciamento é de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN);
 - *Rejeitos agrícolas*: correspondem aos resíduos das atividades da agricultura e da pecuária, como embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita e esterco animal.

3.1.1 Geração e composição de Resíduos Sólidos Domiciliares

A concentração de pessoas em áreas urbanas, acelerada no século XX, aliada ao constante crescimento populacional e à mudança nos hábitos de consumo tem trazido grandes consequências ambientais, principalmente no que diz respeito à geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), mais especificamente à geração de resíduos sólidos domiciliares (RSD).

A geração de resíduos, de maneira geral, ocorre em todos os processos de utilização e transformação de matérias-primas. Nas sociedades urbanas modernas o que ocorre é a concentração dessa geração. “Tudo aquilo que já foi utilizado uma vez e que não pode ser aproveitado dentro das possibilidades do homem urbano é considerado lixo” (LOPES, 2006, p. 14). No Brasil, por exemplo, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2002, p. 51) são geradas 125.281 toneladas diárias de RSD nos municípios brasileiros.

Os estudos de composição física dos resíduos sólidos domiciliares no Brasil têm mostrado predominância de materiais orgânicos (FRÉSCA, 2007, p. 31), diferentemente dos países desenvolvidos, como os Estados Unidos, por exemplo, em que a composição de materiais recicláveis é maior. A Tabela 1 mostra a composição média dos RSD brasileiros em comparação com os EUA.

Tabela 1 - Composição percentual média do resíduo sólido domiciliar (Brasil e EUA)

	Brasil	Estados Unidos
Matéria Orgânica	52,50%	0%
Metal	2,30%	7%
Plástico	2,90%	10%
Papel e Papelão	24,50%	44%
Vidro	1,60%	5,00%
Outros	16,20%	34%

Fonte: Frésca (2007 apud CEMPRE, 2000, p. 31)

Essa grande quantidade de matéria orgânica influi diretamente nos impactos ambientais associados à disposição final desses resíduos em aterros sanitários, pois sua decomposição influencia na geração de chorume e de gases de efeito estufa.

Pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2008, p.34) mostra que nos anos de 2007 a 2008 o índice de coleta per capita de RSU cresceu 2,8% e a quantidade de RSD coletados cresceu 5,9%, indicando um aumento sensível no desempenho destes serviços, e como resultado tem-se uma maior destinação desses tipos de resíduos para aterros.

3.2 Disposição final de Resíduos Sólidos Domiciliares em Aterros Sanitários

A única técnica adequada para a disposição final de resíduos sólidos domiciliares (RSD) no solo é o aterro sanitário, porém outras formas de disposição como aterros controlados e lixões são práticas correntes no Brasil.

Lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (IPT/CEMPRE, 2000, p. 51).

A disposição final de resíduos em aterro controlado minimiza o impacto ambiental, uma vez que ocorre a compactação e faz a cobertura do resíduo, porém peca pela falta de tratamento do chorume e gases, ausência do controle de entrada e saída de resíduos, inexistência do sistema de drenagem e pela não impermeabilização do solo, entre outros fatores.

Segundo a ABNT (NBR 8.419, 1992),

O aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

A Figura 1 apresenta um desenho esquemático de um aterro sanitário.

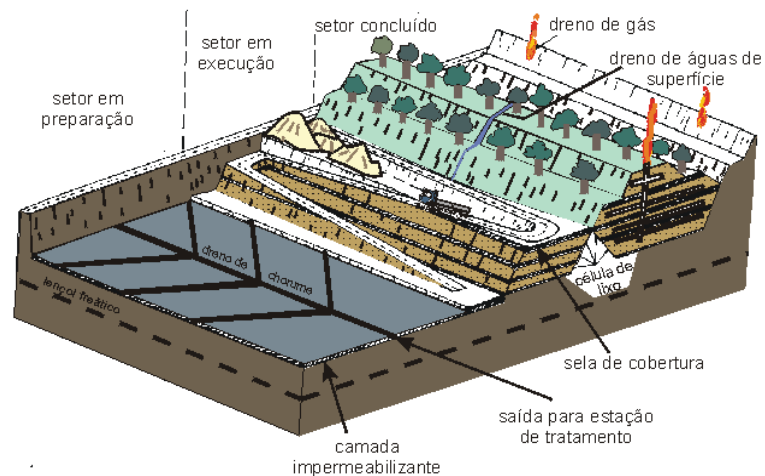


Figura 1 - Detalhe esquemático de um aterro sanitário com suas componentes básicas
Fonte: MINTER/CNDU/CETESB (1979)

O aterro de RSD é um sistema dinâmico que envolve reações metabólicas num ambiente formado pela massa de resíduos com suas características físicas, químicas e suas inter-relações, constituindo um sistema complexo. Dentro do ecossistema do aterro de resíduos, processos físicos, químicos e biológicos promovem a degradação da fração orgânica com geração de efluentes líquidos e gasosos, modificando a pressão no interior da massa de resíduos, que é contida por sistemas de impermeabilização de base e de cobertura (ALCÂNTARA, 2007, p. 34).

Na Figura 2 está apresentado um esquema do ecossistema de um aterro sanitário e suas inter-relações.

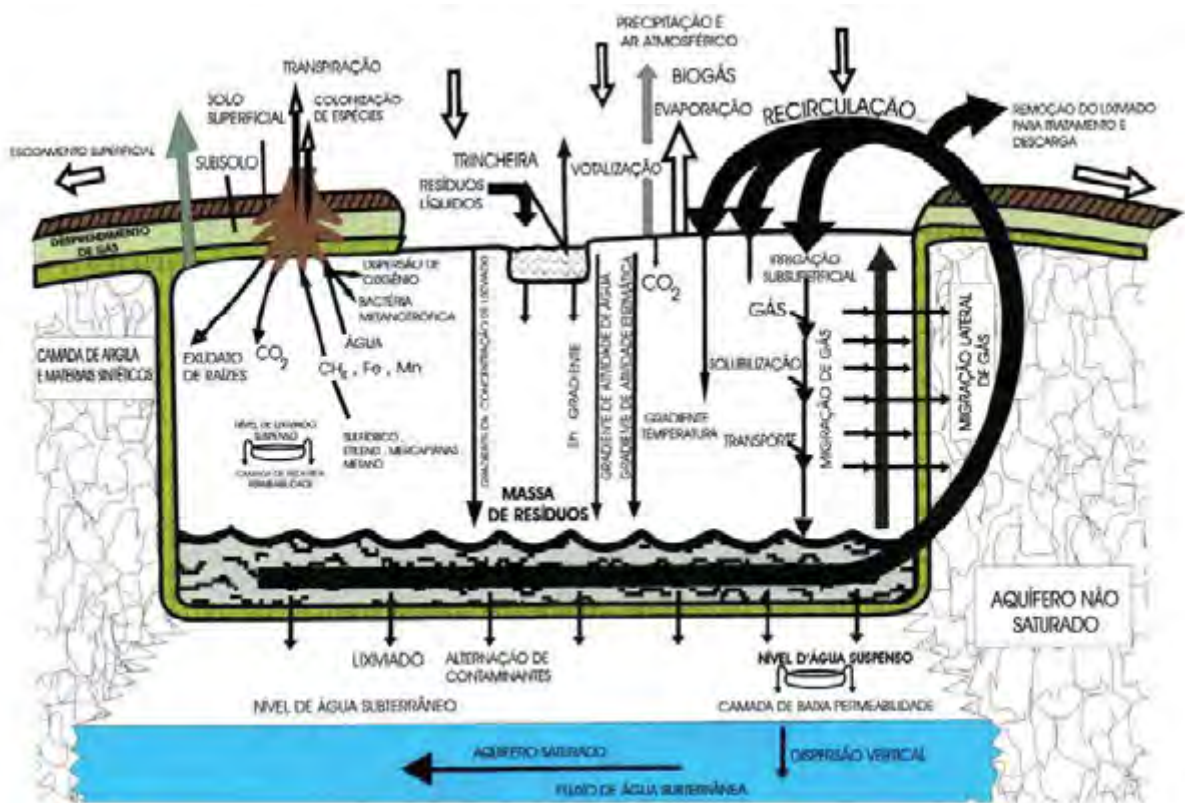


Figura 2 - Representação esquemática do ecossistema de um aterro sanitário
 Fonte: Senior e Balba (1987 apud ALCÂNTARA, 2007, p. 35)

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000 (IBGE, 2002) estima-se que 36,2% dos RSD coletados são destinados a aterros sanitários, 37% a aterros controlados e 22,5% a lixões. Na Figura 3 está apresentada a destinação dos resíduos sólidos em cada uma das regiões brasileiras.

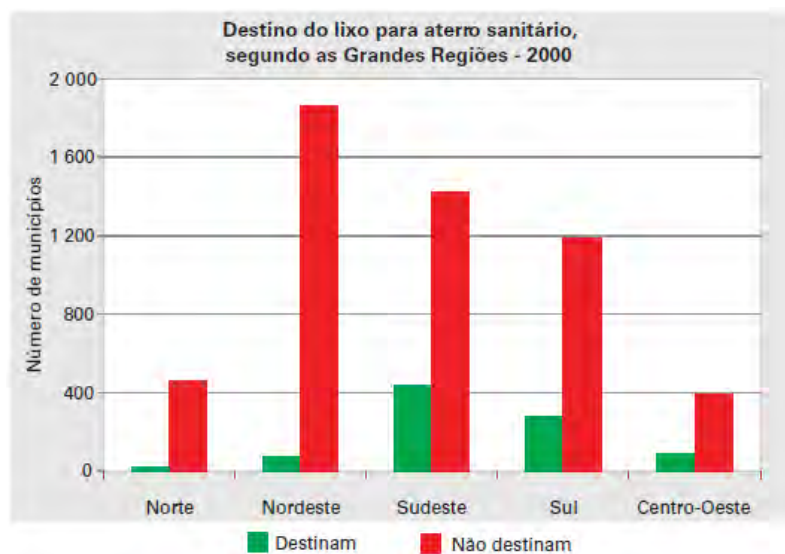


Figura 3 - Destino do resíduo para aterro sanitário, segundo as Grandes Regiões - 2000
 Fonte: IBGE – Atlas de saneamento (2004)

Já em 2008, como mostrado na Figura 4, a projeção realizada para um conjunto de municípios no Brasil indicou que o destino final de mais da metade dos RSD coletados

(aproximadamente 55%), receberam destinação adequada (aterros sanitários), fato registrado pela primeira vez no Brasil, e o restante (aproximadamente 45%), tiveram destinação inadequada (aterro controlado e/ou lixão).



Figura 4 - Destinação final dos RSD coletados no Brasil em 2008
Fonte: Abrelpe (2008, p. 39)

No caso mais específico do Estado de São Paulo, a quantidade de resíduos dispostos adequadamente passou de 10,9% do total gerado em 1997, para 84,1% em 2008 (CETESB, 2008, p. 18).

Finalmente, deve-se destacar que no planejamento da gestão de resíduos sólidos, o aterro sanitário configura-se como a última etapa do gerenciamento de resíduos, para o qual devem ser encaminhados somente os “resíduos últimos”, que são os rejeitos oriundos dos processos de reciclagem e tratamento, ou ainda aqueles resíduos que não são passíveis de reciclagem. Assim, a destinação de todo e qualquer material para a disposição final, mesmo que de maneira correta em aterros sanitários, é uma prática que contribui para a escassez de recursos naturais, além de contribuir para a exaustão da vida útil destes sistemas.

3.3 Degradação anaeróbia da fração orgânica dos Resíduos Sólidos Domiciliares

A degradação dos resíduos sólidos domiciliares em aterro sanitário é um processo longo, por estar relacionado à velocidade de degradação dos diferentes tipos de resíduos, e sequencial, em razão dos metabolismos distintos que se sucedem ou se superpõem (BRITO FILHO, 2005, p. 27).

As transformações biológicas da matéria orgânica complexa em produtos mais simples podem ocorrer particularmente, na presença ou na ausência de oxigênio molecular, ou ainda, em condições intermediárias nas quais coexistem ambientes aeróbios e anaeróbios (ALCÂNTARA, 2007, p. 73).

A matéria orgânica presente nos resíduos sólidos domiciliares quando aterrados leva a uma decomposição que se inicia de modo aeróbio, e após o consumo do oxigênio presente, continua a ocorrer num ambiente anaeróbio, com a geração de gases e de lixiviado.

Segundo Pelczar (1996), a digestão anaeróbia, ou seja, a digestão microbiológica de frações orgânicas em ambiente anaeróbio possui diferentes fases de degradação (Figura 5), as quais são:

- a) *Hidrólise Enzimática*: esta fase consiste na hidrólise de materiais complexos (polímeros), em moléculas menores, sendo realizada pelo grupo de bactérias fermentativas;
- b) *Acidogênese*: os produtos solúveis da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, que são excretados pelas células.
- c) *Acetogênese*: já nesta fase as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substratos apropriados para as arqueas metanogênicas. Os produtos gerados são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato;
- d) *Metanogênese*: esta é a etapa final da degradação, em que as bactérias metanogênicas utilizam os substratos: ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono para conversão dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono. As metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol (metanogênicas acetoclásticas), e outro que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (metanogênicas hidrogenotróficas).

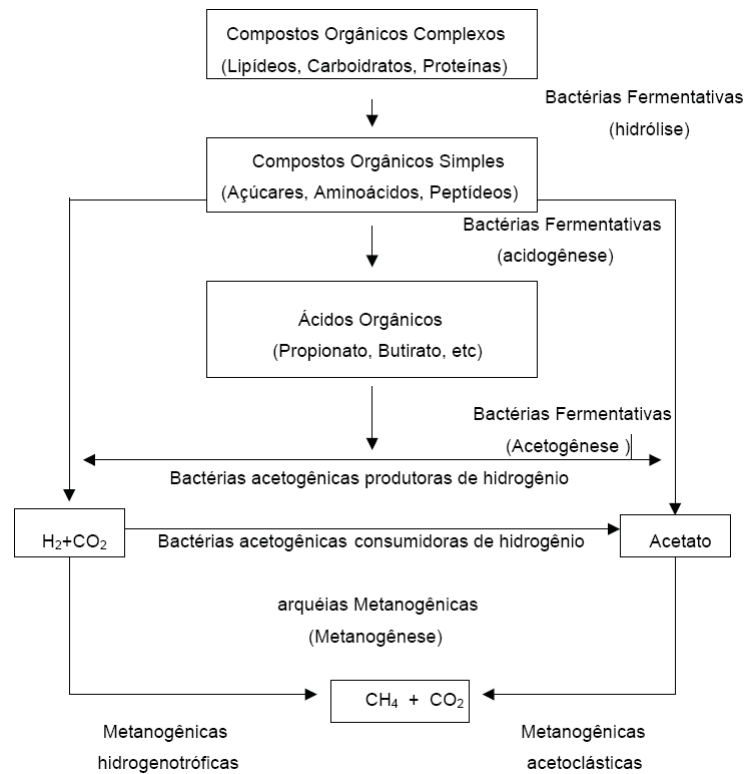
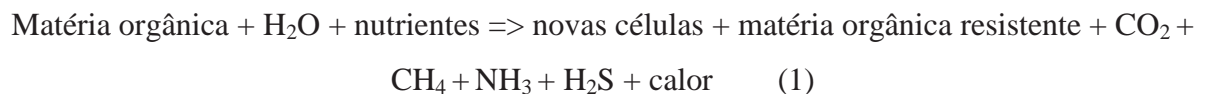


Figura 5 - Sequências metabólicas da digestão anaeróbia
Fonte: Pelczar Jr. (1996)

Alguns modelos de degradação foram desenvolvidos na perspectiva de demonstrar as diferentes etapas que conduzem à estabilização da matéria orgânica dos resíduos sólidos especificamente no interior de um aterro.

Segundo Tchobanoglous et al. (1993), a porção biodegradável da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares pode ser convertida biologicamente em condições anaeróbias para gases contendo dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), sendo esse processo representado pela equação (1):



Deste modo, os principais produtos finais são dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), amônia (NH_3), gás sulfídrico (H_2S) e matéria orgânica resistente. Na maioria dos processos de conversão, o dióxido de carbono e o metano constituem mais de 99% do total dos gases produzidos (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Pohland e Gould (1986) analisaram as diferentes fases de degradação dos resíduos sólidos num aterro sanitário (Figura 6), as quais são semelhantes às fases de biodegradação anaeróbia da matéria orgânica, descrita anteriormente.

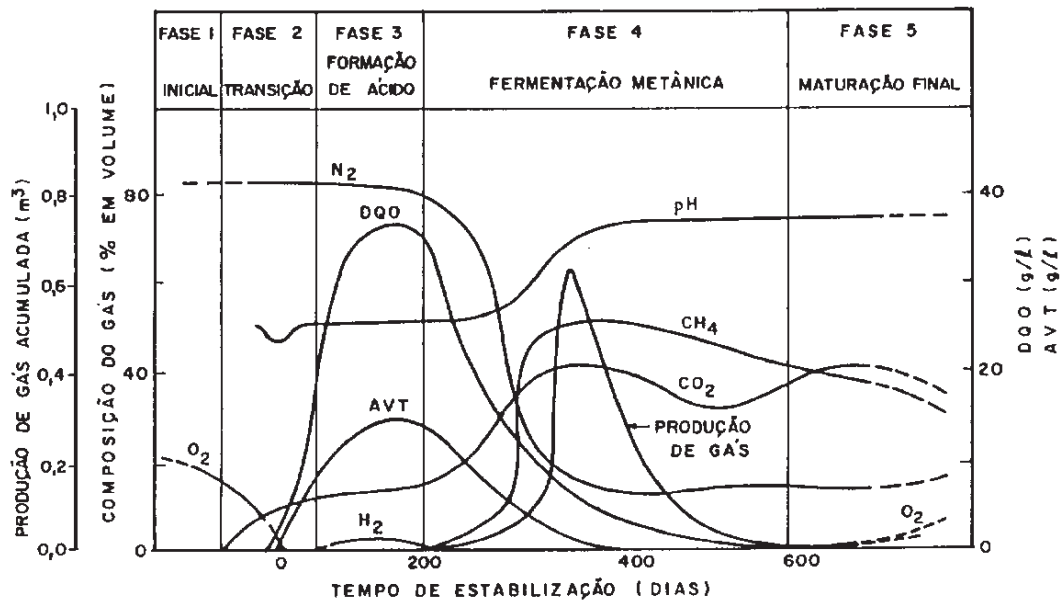


Figura 6 - Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de um aterro sanitário
Fonte: Pohland e Gould (1986).

Assim, as atividades de um aterro sanitário são iniciadas na Fase 1, na qual a umidade acumulada favorece a realização das reações que vão dar início à produção de gás e chorume. A partir daí a ação microbiológica estimula o prosseguimento da conversão dos resíduos nas próximas fases, cada uma variando em intensidade e duração, de acordo com as condições ambientais e operacionais. Essa primeira fase é seguida pela Fase 2, uma fase de transição, quando a capacidade de campo, que é o limite máximo que um resíduo pode reter de umidade, é alcançada e a formação do gás e dos líquidos percolados refletem a passagem da condição aeróbia para a condição anóxica ou anaeróbia. A fase 3 é a fase de formação de ácidos, definida pela predominância da formação de ácidos voláteis totais com um decréscimo nos valores de pH (potencial hidrogeniônico), elevação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) dos líquidos percolados e aumento da mobilidade das espécies iônicas. Na fase 4, de fermentação metanogênica, ocorre uma produção adicional e conversão dos compostos intermediários em metano (CH_4) e excesso de dióxido de carbono, além da redução da intensidade de formação do chorume, aumento dos valores de pH, redução do potencial de oxidação-redução e uma rápida complexação das espécies iônicas. A fase 5 é a maturação final e ocorre quando os nutrientes tornam-se escassos. Assim, uma menor quantidade de substratos disponíveis é degradada, a produção de gás decresce e os constituintes orgânicos e inorgânicos dos líquidos percolados apresentam condição de pré-estabilização (POHLAND & GOULD, 1986).

3.4 Potencial energético a partir do metano presente nos gases gerados em aterros sanitários

O mundo contemporâneo é fortemente dependente de energia e, com o contínuo desenvolvimento sócio-econômico em escalas global e nacional, esta dependência só tende a aumentar, visto que o desenvolvimento de um país está estreitamente ligado à demanda por energia.

Nesse sentido, a busca por fontes alternativas renováveis e sua consequente viabilização econômica, poderia diversificar ou até mesmo substituir fontes da atual matriz energética mundial, ainda tão dependente dos combustíveis fósseis.

O governo brasileiro, por exemplo, propôs o Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, que entrou em vigor por meio da Lei 10.438 de 26 de abril de 2002 e foi revisado pela Lei 10.762 de 11 de novembro de 2003, tendo por objetivos exatamente a diversificação da matriz energética brasileira por meio do estímulo a projetos relacionados ao uso de fontes renováveis de energia.

Atualmente o Brasil, como país em desenvolvimento, tem registrado recordes no consumo de energia elétrica. Segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS), a demanda de energia bateu recorde pelo terceiro dia consecutivo (em 3 de fevereiro 2010), atingindo o pico de 70.170 megawatts (MW), esta alta foi atribuída ao aumento da atividade industrial e ao forte calor no Sudeste, o que reforça a necessidade de busca por outras fontes para assegurar o crescimento econômico do país (PAMPLONA, 2010).

Em paralelo, a questão ambiental, muito em voga neste século, colocou em discussão o uso de fontes mais limpas de energia, que, além de não esgotáveis, devem gerar menos impactos ambientais, como poluição de solos, água e ar (oriundas, por exemplo, de fontes energéticas baseadas em combustíveis fósseis) ou mesmo não causar degradação ambiental e modificação do ecossistema local, regional ou global (como fonte de energia hidroelétrica).

Desde as décadas de 1970 e 1980 existem estudos e iniciativas de alguns países no que diz respeito ao aproveitamento energético do metano (CH₄), devido ao seu elevado poder calorífico, gerado a partir da biomassa e resíduos sólidos, como mostrado nas publicações de Ferrero, Ferranti e Naveau (1984), Parker e Roberts (1985) e Smith e Frank (1988).

“Os primeiros projetos de aproveitamento de biogás em aterros foram implantados ainda na década de 1970 nos EUA, como medidas de controle das emissões descontroladas de metano nesses locais e como uma nova fonte de energia em meio às crises do petróleo daquela época” (ENSINAS, 2003, p. 1).

Atualmente, a geração de energia em aterros sanitários a partir do uso do biogás ou gás de aterro é algo concreto em várias partes do mundo (Estados Unidos, Inglaterra, Dinamarca, Itália e outros) e uma tendência nos países em desenvolvimento, como o Brasil, por configurar-se num tipo de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL, a ser discutido no item 3.5).

As principais vantagens da recuperação energética de resíduos sólidos domiciliares – RSD, depositados em aterros são: redução do volume de resíduos aterrado; minimização das emissões de gás metano (CH_4); geração de energia elétrica, proporcionando a retirada de benefícios financeiros desta fonte; separação do fluxo; separação do fluxo de resíduos biodegradáveis e recicláveis; geração de empregos diretos e indiretos; maior ordenamento social no aterro; produção de adubo orgânico de qualidade; promoção da cultura ambiental, dentre outras (XII Congresso Brasileiro de Energia, 2008, p. 1.472).

Como citado anteriormente, o gás de aterro tem sua origem na degradação anaeróbia da matéria orgânica nos aterros sanitários, e surge como uma alternativa interessante, podendo ser utilizado como combustível veicular, na geração de energia elétrica por meio de geradores e turbinas ou por meio da tecnologia de células combustíveis (XII Congresso Brasileiro de Energia, 2008).

Nos Estados Unidos, o Programa de Fomento ao Uso de Gás de Aterro da Agência de Proteção Ambiental (*Landfill Methane Outreach Program – LMOP/USEPA*) enumera mais de 400 diferentes projetos de recuperação do gás em operação e outros 600 em estudo. Na Europa, existem outras centenas de projetos semelhantes. Além da energia obtida a baixo custo, essa prática ressalta a boa gestão ambiental do empreendimento.

O uso do biogás como combustível para a geração de energia elétrica é vantajoso porque traz valor agregado para o sistema de gestão de resíduos. A co-geração de eletricidade e energia térmica (vapor) a partir do biogás pode ser uma alternativa ainda melhor, pois a eficiência da geração elétrica isolada varia de 20 a 50% e, com o uso da co-geração, podem ser obtidas eficiências mais altas devido à disponibilidade do vapor resultante do processo de geração, que pode ser utilizado localmente para aquecimento, refrigeração, ou ainda transportado por tubo para uma indústria ou comércio próximo, obtendo um segundo rendimento para o projeto (USEPA 1996 apud DUARTE, 2006).

3.5 Características do biogás ou gás de aterro

O biogás é um gás incolor e de baixa densidade. A composição média da mistura gasosa, segundo levantamento realizado por Azevedo (2000 apud PIEROBON, 2007, p. 6), é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição média do biogás

Substância	Percentual de volume molar
Metano (CH ₄)	55 a 75 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 a 45 %
Nitrogênio (N ₂)	0 a 3 %
Oxigênio (O ₂)	0 a 1 %
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0 a 1 %
Amoníaco (NH ₃)	0 a 0.5 %
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0.1 %

Fonte: Azevedo (2000 apud PIEROBON, 2007, p. 6)

Para Gunnerson e Stuckey (1986 apud MENDES, 2005, p. 30), a diferença existente entre a concentração de gás metano e dióxido de carbono encontrada no biogás se deve à dissolução de parte do CO₂ na fração aquosa da massa de resíduo. Quanto maior a fração de metano, mais energia por unidade de massa está contida no biogás.

O processo de produção do biogás depende de muitos parâmetros, como por exemplo, temperatura ambiente, umidade, presença de substâncias tóxicas e nutrientes cuja presença ou ausência são determinantes na atividade bacteriana. De acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA 1991 e 1996 apud MENDES, 2005, p. 31), diversos fatores influenciam a taxa de geração do biogás, como descrito a seguir:

- a) *Composição dos resíduos*: quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano. Os resíduos destinados aos aterros podem ter uma composição variada ao longo do ano, dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população local;
- b) *Ambiente anaeróbio*: para que haja produção de metano, a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente sem oxigênio; para tanto, pode-se cobrir os resíduos com terra, ou com o próprio resíduo, criando condições anaeróbias nas camadas inferiores do aterro;
- c) *Umidade*: a umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras. Uma umidade elevada (60 a 90 %) pode aumentar a geração de biogás;
- d) *Acidez e temperatura*: as bactérias metanogênicas atingem maior produtividade em pH entre 6 e 8. Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade a partir da fase metanogênica. A produção de metano é afetada pela temperatura. A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29 e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70°C para as termofílicas. Abaixo de 10°C há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano. Tipicamente, a própria decomposição fornece calor suficiente para que ocorra a metanogênese (IBAM, 2007).

Além dos fatores relacionados aos ambientes externo e interno das células, a forma de construção e operação do aterro influencia significativamente a produção do biogás e a

composição do gás metano. Aterros com altura elevada e com um sistema eficiente de impermeabilização da camada de cobertura fomentarão o predomínio de atividade anaeróbia, que é a grande responsável pela formação do metano; da mesma forma, a compactação aumenta a densidade da massa de resíduos, o que propicia a redução da fase aeróbia (IBAM, 2007, p. 30).

É importante ressaltar que o Brasil possui, na maior parte do seu território, condições favoráveis para a produção de biogás em aterros sanitários, pelas condições de umidade e temperatura e, principalmente, pela predominância de matéria orgânica na composição dos resíduos sólidos domiciliares.

Por outro lado, a liberação para a atmosfera dos gases de aterros sanitários pode ser prejudicial ao meio ambiente. A emissão de gases causa impactos locais, pois causa danos à vegetação circundante, e globais, pois contribuem significativamente para o efeito estufa (que será discutido no item 3.5).

Muitos componentes do biogás, como por exemplo, o dióxido de carbono e o gás sulfídrico são potencialmente tóxicos para o homem, mas a maior preocupação concentra-se na eventual ocorrência de pequenas concentrações de compostos orgânicos como o cloreto de vinilo e o benzeno, devido aos seus efeitos cancerígenos. Contudo a ocorrência de problemas com os compostos orgânicos voláteis tóxicos (COV) não tem sido verificada, a não ser em casos muito especiais. Os problemas de maus cheiros provenientes de aterros derivam da liberação de gás sulfídrico e de compostos orgânicos sulfurados (mercaptanos). Os maiores problemas aparecem durante a operação do aterro e decorrentes da fase de fermentação ácida dos resíduos (RUSSO, 2005, p. 41).

Segundo o Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2009, p. 8), as emissões de gás metano provenientes do aterramento de resíduos sólidos no Brasil representam 7,8% do total de emissões de CH₄ em relação a todas as fontes, como energia, processos industriais e a agropecuária (dados referentes a 2005). Somando-se esse valor ao tratamento de esgotos sanitários e industriais tem-se 11% das emissões totais de metano no país, ficando atrás apenas das emissões provenientes do gado bovino (61%) e dos desmatamentos (15%), como mostrado na Figura 7. Os dados evidenciam a necessidade de investimentos nesses setores no que tange à diminuição de emissões antrópicas de gases.

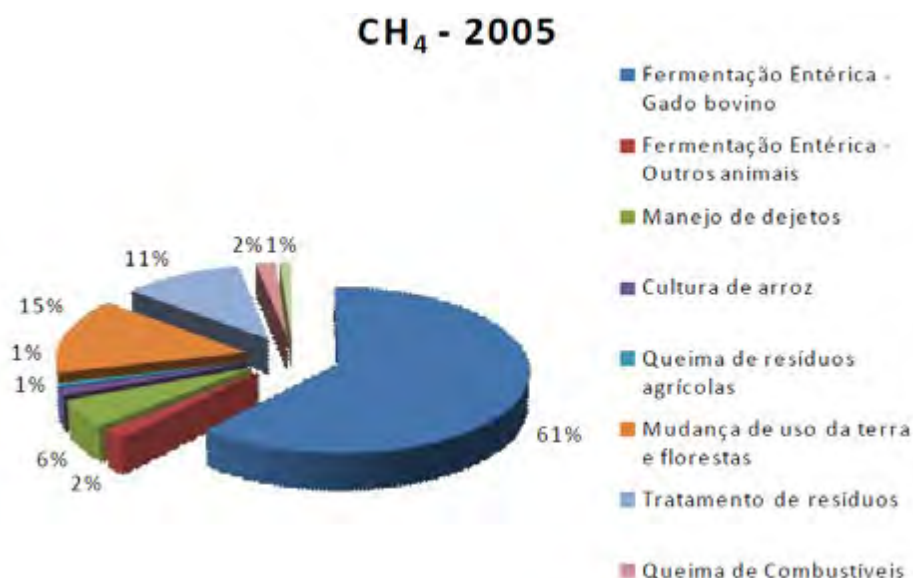


Figura 7 - Emissões de metano (CH₄) por setor de atividade no Brasil ocorridas em 2005

Fonte: Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2009, p. 9)

3.6 Efeito Estufa e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

O efeito estufa é um fenômeno atmosférico natural que acompanha a vida do planeta desde os primórdios de existência e decorre da ação bloqueadora dos gases da atmosfera sobre o calor refletido na superfície terrestre. Este efeito possibilita a manutenção da temperatura da Terra nos níveis que permitem a existência de vida.

Os termos ‘aquecimento global’ e ‘mudanças climáticas’ são atribuídos ao agravamento do efeito estufa natural causado pela emissão excessiva de gases, decorrente de atividades humanas, que desequilibra os níveis de temperatura na superfície terrestre. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2007*), organismo criado pela Organização das Nações Unidas (ONU), que reúne 2.500 especialistas em clima, concluiu que a temperatura média global subiu aproximadamente 0,57°C a 0,95°C do período compreendido entre 1850-1899 ao período 2001-2005. Gases como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂) juntamente com os cloro flúor carbonos (CFCs) e os óxidos de nitrogênio (NOx) têm estas propriedades e não permitem que a radiação solar, depois de refletida na Terra, volte para o espaço, bloqueando o calor.

O metano tem um Potencial de Aquecimento Global (PAG ou GWP – *Global Warming Potential*), segundo o IPCC (1996), vinte e uma vezes (21) maior quando comparado ao gás carbônico, para uma mesma quantidade de gás em 100 anos (IPCC, 2010). Este fato implica na necessidade de ações que possam reduzir ou anular as emissões de CH₄ em aterros sanitários, também nos países em desenvolvimento, por serem fontes estacionárias

que, devido ao crescimento populacional, são responsáveis por uma parcela cada vez maior das emissões de metano.

No sentido de minimizar o efeito estufa, o Protocolo de Kyoto (1997), após diversas iniciativas da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC) e da Conferência das Partes (COPs), estabeleceu que os países desenvolvidos reduzissem suas emissões combinadas de Gases de Efeito Estufa (GEEs) em média 5,2% em relação aos níveis de 1990, no período de 2008 a 2012.

Com o intuito de facilitar o cumprimento dos compromissos assumidos pelos países, foram criados mecanismos de flexibilização. O princípio teórico destes mecanismos é o da eficiência econômica, visando minimizar os custos de redução das emissões desses países, sem alterar a eficiência ambiental do Protocolo de Kyoto.

Os mecanismos de flexibilização permitem que um país pertencente ao Anexo I¹ adquira unidades de redução de emissão de GEE, seja por intermédio de aquisição direta, seja por intermédio de investimentos em projetos em outros países. Ao permitir que o abatimento de GEE seja realizado além das fronteiras nacionais, os mecanismos de flexibilização ampliam a gama de opções disponíveis aos países do Anexo I e conferem-lhe um determinado grau de flexibilidade. Os mecanismos de flexibilização são: Certificados Negociáveis, Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (FGV, 2002 apud DUARTE, 2006, p. 25).

Tanto os países desenvolvidos quanto os em desenvolvimento e suas entidades públicas e privadas podem participar de uma atividade de projeto de MDL.

Projetos com aproveitamento do gás de aterro para simples queima no *flare* ou mesmo para produção de energia geram receita com a venda de Créditos de Carbono no mercado internacional, o que propicia um bom incentivo para melhorar o projeto e a operação dos aterros sanitários e avançar na implementação de uma correta gestão dos resíduos sólidos domiciliares nos municípios brasileiros (IBAM, 2007, p. 34).

Mais recentemente, em dezembro de 2009, o Mundo acompanhou a 15ª Conferência das Partes – COP 15 – também intitulada Conferência do Clima, realizada em Copenhague na Dinamarca. Durante a Conferência, alguns países desenvolvidos tinham a esperança de que se acordasse outro protocolo, em substituição ao de Kyoto, que definisse metas de redução de emissões também dos países em desenvolvimento. Mas o acordo fechado, denominado “Acordo de Copenhague”, pediu que os países pobres propusessem ações voluntárias de redução a serem custeadas com 30 bilhões de dólares dos países em desenvolvimento nos próximos três anos (ESTADÃO, 2010). Isso leva a crer que teremos mais iniciativas e financiamentos para projetos MDL no Brasil.

¹ Anexo 1: anexo do Protocolo de Kyoto que lista os países com compromisso de redução de GEEs.

No Estado de São Paulo especificamente, o governo sancionou, em novembro de 2009, a lei que institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC). Entre os principais pontos dessa política estão, a criação do Conselho Estadual de Mudanças Climáticas, de caráter consultivo, e a permanência da atuação do Fórum Paulista de Mudanças Climáticas, além do Fecop (Fundo Estadual de Prevenção e Controle da Poluição), que já apoiava projetos relacionados ao controle da poluição e preservação do meio ambiente e que vão agora financiar ações e planos específicos de adaptação aos efeitos das mudanças climáticas (SP NOTÍCIAS, 2009).

No Art. 19 da PEMC (2009, p. 16), diz “O Estado incentivará a recuperação de metano gerado pela digestão anaeróbia de sistemas de tratamento de esgotos domésticos, efluentes industriais, resíduos rurais e resíduos sólidos urbanos”.

Ainda mais recentemente, foi sancionada a Lei Nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que aprovou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (após 20 anos em tramitação no Congresso Nacional), a qual prevê metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos, por meio de Planos Estaduais e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

Nesse sentido, nota-se a importância e a possibilidade de elencar projetos de recuperação de gás metano proveniente da disposição final de RSD em aterros sanitários como MDL, tanto no Estado de São Paulo como no Brasil, gerando créditos de carbono por meio da Redução Certificada de Emissões (RCEs), o que pode proporcionar autonomia econômico-financeira e redução de impactos ambientais para o sistema de gestão de resíduos.

3.7 Modelos matemáticos para a estimativa do potencial energético em aterros sanitários

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis e econômicas para avaliar o potencial de geração de gás em aterros. O êxito na aplicação depende da confiabilidade dos dados de entrada e do grau de semelhança entre o local em questão e outros locais que possam ter sido modelados com sucesso (BRITO FILHO, 2005).

Existem diversos modelos matemáticos que fazem estimativas teóricas da geração de biogás em aterros sanitários. Os mais conhecidos e empregados são os modelos recomendados pelo Banco Mundial, pela Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) e pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

O modelo recomendado pelo Banco Mundial, conhecido como *Schooll Canyon*, é simples, de fácil aplicação e o mais empregado pelas agências reguladoras e instituições

financeiras que apóiam os projetos de aproveitamento do biogás de aterros na América do Sul. Esse modelo baseia-se na seguinte equação de primeira ordem:

$$Q_{CH_4} = k.L_0.m_i.e^{-kt} \quad (2)$$

Sendo:

Q_{CH_4} = quantidade de gás gerado durante um ano (m^3 /ano);

k = taxa de geração de metano por ano (1/ano);

L_0 = potencial de geração de metano em peso de lixo (m^3 /t);

m = massa de resíduos depositados no ano “i”, (t);

t = anos após o encerramento do aterro (anos).

O modelo desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) é conhecido como *Landfill Gas Emission Model* (LandGEM), e consta na legislação federal dos EUA sobre diretrizes e regras gerais para aterros sanitários ativos e encerrados. É bastante empregado no mundo, tendo sido utilizado inclusive no estudo do potencial de geração de energia nos municípios brasileiros realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Esse método contabiliza quantidades e variações de gases na vida de um aterro e é expresso pela seguinte equação:

$$Q_{CH_4} = L_0.R.(e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (3)$$

Sendo:

Q_{CH_4} = quantidade de gás gerado durante um ano (m^3 /ano);

L_0 = potencial de geração de metano em peso de lixo (m^3 /t);

R = quantidade anual de resíduos depositados no aterro (t/ano);

k = taxa de geração de metano por ano (1/ano);

t = tempo desde o início da disposição no aterro (anos);

c = tempo desde o encerramento do aterro (anos), $c = 0$ para aterros ativos (EPA, 2005).

O modelo LandGEM foi reescrito com o emprego da linguagem de computação Visual Basic, que resultou no programa de computador intitulado “Biogás – Aterro 1.0”, desenvolvido pela parceria entre o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), com os recursos do Programa Mudanças Climáticas Globais – “Plano Brasil de Todos” do Governo Federal. Este programa é um produto dos Convênios “Subsídios para a Recuperação e Uso Energético de Biogás Gerado em Estações de Tratamento Anaeróbico de Efluentes – ETAE” e “Subsídios para a Recuperação e Uso Energético de Biogás Gerado em Locais de Disposição de Resíduos Sólidos – LDRS” (CETESB, 2006).

O programa Biogás – Aterro 1.0 utiliza a seguinte equação de primeira ordem para descrever a vazão de metano gerado:

$$Q_{CH_4} = k.Rx.L_0.e^{-k(x-T)} \quad (4)$$

Sendo:

Q_{CH_4} = vazão de metano gerado no ano x pelo RSD depositado no ano T ($m^3_{CH_4}/ano$)

k = constante de decaimento (1/ano);

Rx = fluxo de resíduos no ano x (kgRSD);

L_0 = potencial de geração de metano ($m^3_{biogás}/kgRSD$);

T = ano de deposição do resíduo no aterro (calculado para cada ano) (ano);

x = ano atual (ano) (CETESB, 2006).

O modelo recomendado pelo IPCC permite o cálculo da quantidade anual de metano gerada em um aterro sanitário e é expresso pela seguinte equação:

$$Q_{CH_4} = (RSUD.FCM.COD.CODR.FEM.16/12 - R). (1 - OX) \quad (5)$$

Sendo:

RSUD = total anual de resíduos sólidos depositados no aterro;

FCM = fator de correção de metano (%);

COD = carbono orgânico degradável no resíduo sólido urbano (%);

CODR = fração de COD que realmente degrada (%);

FEM = fração de CH_4 no gás de aterro (%);

16/12 = taxa de conversão de carbono em metano (adimensional);

R = quantidade de metano recuperado (t/ano);

OX = fator de oxidação (adimensional).

Quando se considera a variável “tempo” o método de cálculo é expresso pela equação:

$$Q_{CH_{4x}} = k.Rx.L_0.e^{-k(T-x)} \quad (6)$$

Em que:

$Q_{CH_{4x}}$ = vazão de biogás (m^3/ano);

K = constante de geração de metano (1/ano);

Rx = quantidade de resíduo aterrado no ano (t);

x = ano de aterramento do resíduo (ano);

L_0 = potencial de geração de metano (m^3/t de resíduo);

T = ano de realização do inventário (ano).

Para a estimativa das emissões de metano em um determinado período, somam-se as emissões anuais:

$$Q_{CH_4} = \sum Q_{CH_{4x}} \quad (7)$$

Os parâmetros L_0 e k são comuns a todos os modelos e considerados os mais importantes, pois refletem variações de acordo com o local, o clima, a composição dos resíduos, entre outros. A constante da taxa de geração de metano (k) fornece um indício da

velocidade específica de decomposição biológica dos resíduos após a disposição no aterro sanitário, sendo influenciada pelo teor de umidade, pela disponibilidade de nutrientes, pelo pH e pela temperatura. Os valores de k variam de 0,003 para aterros secos, a 0,21 para aterros úmidos, independente do modelo utilizado. Acredita-se que essa margem reflita as diferentes características geográficas do país e certas condições operacionais do aterro. O parâmetro L_0 , que é o potencial de geração de metano, está associado à quantidade de matéria orgânica presente na massa de resíduos. O L_0 pode variar de $1\text{m}^3/\text{t}$, para aterros com resíduos com baixa quantidade de matéria orgânica, a $312\text{m}^3/\text{t}$, para aterros com grande quantidade de matéria orgânica, para os modelos citados (IBAM, 2007, p. 32).

Segundo Oliveira et al. (2009), a produção total e a taxa de geração de gás podem variar um pouco com os diferentes modelos, mas o parâmetro de avaliação mais importante, comum a todos os modelos, é a quantidade do resíduo presumido passível de decomposição. Assim, altos valores de k e L_0 implicam em grandes vazões anuais de metano resultando em curvas com inclinações mais acentuadas, enquanto valores mais baixos desses dois parâmetros geram uma quantidade menor de metano, porém por um maior período de tempo.

Os modelos e equações utilizadas atualmente são sempre baseados em parâmetros e estudos internacionais e isso nem sempre reflete as condições e características de aterros brasileiros. Por isso é essencial o desenvolvimento de pesquisas que definam uma equação com validade no território nacional. Enquanto isso não ocorre, recomenda-se utilizar as equações consagradas da literatura americana, com as quais centenas de projetos foram implantados com sucesso (MENDES, 2005).

A eficiência de captação do biogás do aterro depende de vários fatores, como o projeto do aterro, a forma de operação e o clima da região. Na estimativa teórica da quantidade de gás produzido em um aterro devem ser computadas perdas como o escape do gás pela camada de cobertura do aterro, as perdas no trajeto de captação do biogás ao longo da rede de drenagem e as perdas devido à operação do aterro e ao nível de chorume. De acordo com o relatório do Banco Mundial, um sistema de recuperação do biogás bem projetado, construído e operado pode coletar 75% ou mais do biogás produzido em um aterro (IBAM, 2007, p. 33).

3.8 Estudos de geração de gases em aterros sanitários brasileiros

Diversos trabalhos têm sido realizados no Brasil, no sentido de aprofundar os conhecimentos sobre a geração de gases em aterros sanitários com intuito de aproveitamento do possível potencial energético, e o provimento de recursos por meio da vinculação desses tipos de projetos aos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Para tanto, alguns

deles aplicaram modelagens matemáticas e desenvolveram curvas de geração de biogás por um determinado tempo, bem como estudaram a composição de gases e as influências externas que estes podem sofrer.

Oliveira et al. (2009) utilizando o modelo *School Canyon* no aterro sanitário de Timbó – SC, observou que após o fechamento do aterro ocorriam as maiores gerações de biogás e metano, pois o aterro atingiu sua capacidade máxima de deposição de resíduos. Isso se deve ao fato do modelo de decaimento considerar que a taxa de geração de gás no início da decomposição é maior, quando na verdade nas fases iniciais de decomposição a vazão de metano é baixa e sua concentração menor que 40%.

O trabalho de Dias et al. (2009) realizado no aterro sanitário de Içara – SC, monitorou a vazão, a concentração e a temperatura dos gases em 12 drenos do aterro. A Tabela 3 mostra os resultados das concentrações médias ponderadas, em relação à vazão, respectivos desvios padrão e valores máximos e mínimos dos gases analisados nas 8 amostragens dos drenos.

Tabela 3 - Média e variação da concentração de gases nos drenos do aterro sanitário de Içara – SC

Gases	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CH ₄ (%)	46,9	3,3	43,4	53,3
CO ₂ (%)	37,8	2,1	35,8	42,1
O ₂ (%)	4,1	1,3	2,4	6,0
H ₂ S (ppm)	12	6	6	25

Fonte: Dias et al. (2009, p. 6)

O monitoramento de um aterro experimental em Belo Horizonte – MG realizado por Simões e Catapreta (2009), verificou a composição do biogás em 6 drenos e se observaram concentrações de metano e dióxido de carbono abaixo do esperado (40 a 45%): a média geral de CH₄ nos drenos ficou em 32,96%, e de CO₂, 29,97%. Não houve semelhança entre os dados experimentais e o modelo proposto por Pohland e Harper (1985). Outra consideração importante foi que as concentrações dos gases gerados são semelhantes, podendo-se supor que o processo de formação de gás baseado na digestão anaeróbia dos resíduos no interior do aterro ocorre de forma semelhante em toda massa de resíduos disposta. O trabalho também concluiu que aparentemente o teor de umidade dos resíduos no interior do aterro parece influenciar a concentração dos gases: talvez o nível elevado de líquidos possa ter prejudicado ou inibido o processo de digestão anaeróbia.

O trabalho de Maciel et al. (2009), estudou a recuperação energética de biogás em uma célula experimental com cerca de 36.000 toneladas (t.) de resíduos urbanos no Aterro da Muribeca – PE. Com base nos dados obtidos, observou-se que após o fechamento da célula as condições anaeróbias se estabeleceram de forma rápida (declínio da concentração de O₂), indicando que os resíduos estavam na fase metanogênica de degradação com concentrações

médias de CH₄ e CO₂ em torno de 55% e 40%, respectivamente. A produção de biogás da célula ficou muito superior ao previsto por modelagens tradicionais de degradação dos resíduos baseadas em cinética de primeira ordem, entretanto observa-se um declínio significativo da vazão com o tempo. Tal fato indica que a decomposição dos resíduos para as condições climáticas e operacionais da célula experimental é muito mais rápida que o previsto na literatura técnica internacional.

3.9 Caracterização da área de estudo

O município de Rio Claro – SP encontra-se na porção centro-leste do Estado de São Paulo, a 173 km a noroeste da capital, zona 23 com longitude de 235.477,83 E e latitude de 7.519.202,16 N (Figura 8). Pertence à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 5 referente às bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ).

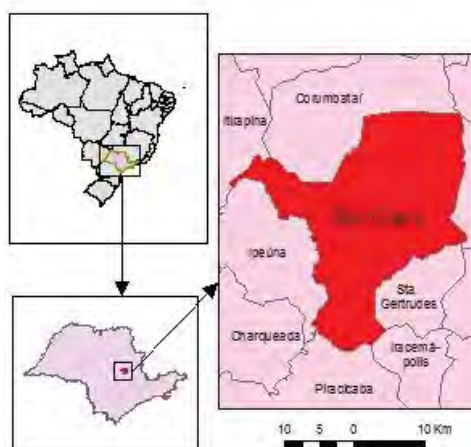


Figura 8 - Localização do município de Rio Claro – SP
Fonte: Elaborado pelo autor (Software ESRI ArcMap 9.3, 2009).

O clima da região pode ser considerado tropical com duas estações definidas – Cwa na classificação de Koeppen: seca no inverno, mês mais quente com temperatura superior a 22°C, ou tropical alternadamente seco e úmido. A temperatura média do mês mais frio varia entre 2,4°C e 17,1°C e as temperaturas médias anuais situam-se entre 18,1°C e 20,9°C (MONTEIRO, 1973).

Quanto à distribuição anual do regime das chuvas, ocorre um período seco, entre abril e setembro, com 15 a 20 dias de chuva, e um período chuvoso, de outubro a março, com 55 a 60 dias de chuva, respondendo por mais de 80% das precipitações anuais. A média para Rio Claro é da ordem de 1.400 mm/ano (TROPPIAIR, 1992).

Segundo estimativas do IBGE (IBGE Cidades, 2009), Rio Claro possui uma população de 191.886 habitantes com uma taxa geométrica de crescimento de 1,97% a.a. e uma taxa de urbanização de 97,6%. A densidade demográfica é de 337,31 hab./km².

O aterro sanitário de Rio Claro localiza-se a aproximadamente 3 km do centro da cidade, entre as coordenadas 7.513.938,91 e 7.513.523,07 N e 234.592,79 e 234.300,20 E, às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP-127). A Figura 9 apresenta a posição do aterro em relação à área urbana do município de Rio Claro – SP.



Figura 9 - Mapa de localização do Aterro Sanitário de Rio Claro – SP
Fonte: Extraído de Google Earth (2009).

A área ocupada pelo aterro sanitário é de cerca de 14 ha, mais precisamente 141.637,68 m², e situa-se no alto topográfico divisor das águas superficiais entre as bacias do Córrego da Servidão e Ribeirão Rio Claro, na bacia do Rio Corumbataí. A vida útil do aterro foi projetada para 16,2 anos (até o ano 2017), considerando-se 102 t./dia de produção de resíduos conforme o Relatório Ambiental Preliminar (RAP) protocolado para adquirir a licença ambiental de funcionamento. O aterro sanitário de RSD se encontra em operação para recebimento de resíduos desde o ano de 2001, tendo sido iniciada as obras de construção no ano de 2000.

A disposição no aterro sanitário é realizada ao longo do dia, de segunda a sexta-feira das 8 às 17 horas e aos sábados das 8 às 12 horas. As atividades são encerradas no final do dia, cobrindo os resíduos com uma camada de solo de 0,15 m de espessura.

Os solos da região apresentam caráter areno-argiloso e argilo-siltoso com permeabilidade natural da ordem de $1,25 \times 10^{-5}$ a $1,93 \times 10^{-7}$ cm/seg. O nível d'água na área do aterro varia entre 5,0 e 14,0 metros.

Atualmente a área efetiva utilizada para disposição final dos resíduos é de aproximadamente 90.000 m², com recebimento de um fluxo de aproximadamente 5.000 t./mês o que resulta num fluxo diário de 192,31 toneladas, considerando a operação do aterro em 26 dias por mês.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Metodologia para análise da composição dos gases gerados no aterro

Primeiramente definiram-se pontos para coleta e amostragem dos gases, que teve por princípio abranger áreas do aterro sanitário com idades distintas de operação. Áreas mais antigas referente ao início da operação do empreendimento e áreas mais recentes, com resíduos dispostos no aterro por um período de aproximadamente 12 meses. Nesse sentido, foram definidos 3 pontos de coleta denominados “Ponto 1”, “Ponto 2” e “Ponto 3”.

O “Ponto 1” está localizado na área mais antiga do aterro sanitário, onde se iniciou a operação em 2001, possui cobertura final (selamento) e cobertura vegetal (grama), com tempo de aterramento dos resíduos estimado de 8 a 9 anos. O “Ponto 2” está localizado na área frontal do aterro (portaria), com resíduos com tempo de disposição de aproximadamente 4 a 5 anos, considerado na pesquisa como um tempo de disposição intermediário. O “Ponto 3”, localizado próximo a frente de operação, possui o menor tempo de aterramento dos resíduos, provavelmente entre 8 e 15 meses. A Figura 10 apresenta a vista geral do aterro e a localização espacial aproximada dos 3 pontos (dissipadores) de coleta de gases.



Figura 10 - Vista geral do aterro sanitário de Rio Claro - SP, com a localização aproximada dos pontos de amostragem de gases

Fonte: Extraído de Google Earth (2010).

As campanhas de coleta foram realizadas mensalmente, por um período de 10 meses, sendo as coletas nos três drenos realizadas sempre no mesmo dia. As coletas foram

programadas de forma a obter um histórico da variação das porcentagens dos gases em cada um dos pontos, bem como o balanço geral do aterro, com a comparação das porcentagens entre os diferentes pontos de coleta.

As coletas foram realizadas nos drenos de gases confeccionados em manilha de concreto e tubulação de ferro de 100 mm de diâmetro, como apresentado na sequência de fotos da Figura 11. O procedimento realizado para as coletas em cada dreno foi:

- a) Apaga-se o fogo do dreno de gás (se existente), abafando o tubo de 100 mm com tecido umedecido (Figura 11, foto B);
- b) Coloca-se saco plástico na saída do dissipador (tubo) para coleta dos gases. A vedação entre o dreno de gás e o saco plástico foi realizada com amarril de borracha (Figura 11, fotos C e D). O saco de coleta foi colocado de maneira a garantir a ausência de ar em seu interior, sendo seu volume preenchido somente com os gases do aterro;
- c) Aguarda-se um período de 30 minutos para que o gás preencha todo o volume do saco plástico.
- d) Transfere-se o gás do saco plástico para o saco amostrador (Figura 11, foto F), com auxílio de uma mangueira plástica;
- e) Efetuam-se as devidas análises a partir do gás do saco amostrador.

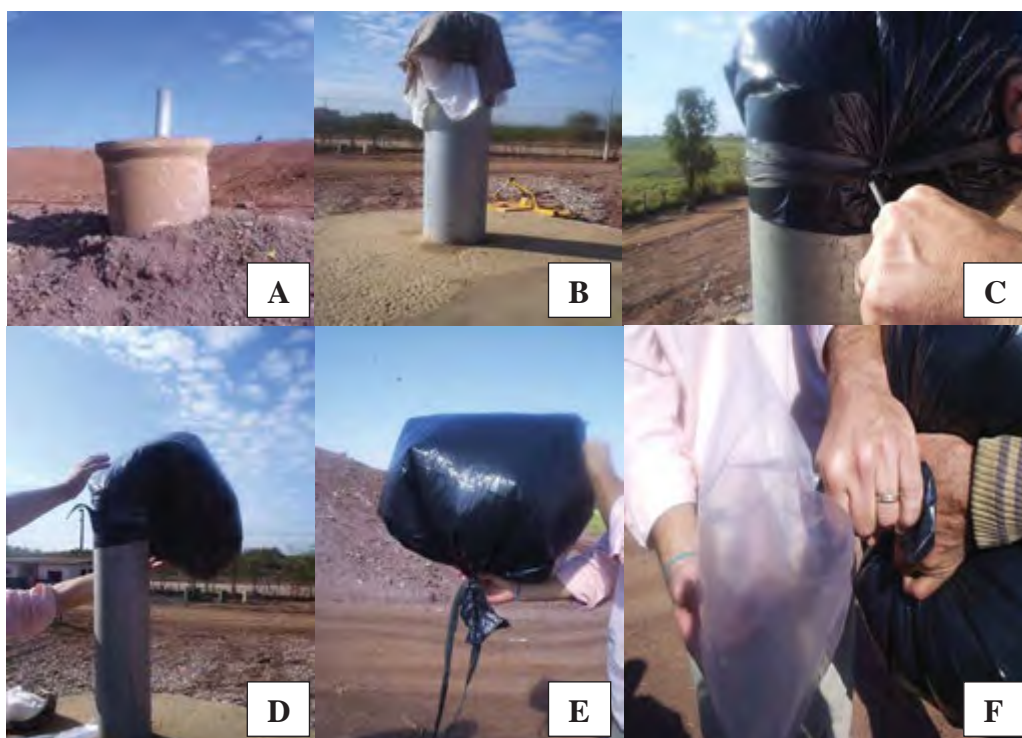


Figura 11 - Método de coleta de gás nos dissipadores de gases do aterro: (A) Um dos drenos de gases do aterro; (B) Dreno sendo apagado; (C) Vedação do dreno com saco plástico; (D) Dreno sendo cheio pelos gases (E) Saco plástico retirado do dreno; (F) Passagem dos gases do saco plástico para o saco amostrador de gases.

A análise dos gases foi realizada com o “Kit de Análise de Biogás com Biofoto” (Figura 12) desenvolvido por meio de uma parceria entre a *Embrapa Suínos e Aves* e a

empresa *Alfakit Ltda.* (tecnologia nacional). Este “Kit” permite o monitoramento dos principais constituintes do biogás: amônia (NH_3), gás sulfídrico (H_2S), gás carbônico (CO_2) e gás metano (CH_4).



Figura 12 - Kit para análise do Biogás
Fonte: Kunz et al.

As medições de gás sulfídrico e amônia foram realizadas apenas nas primeiras amostras, pois o equipamento mostrou-se inadequado para estes gases, em função da faixa de concentração dos mesmos encontrarem-se abaixo da curva de calibração do equipamento (amônia 15 – 350 ppmV e gás sulfídrico 20 – 230 ppmV), ocasionando medidas muito distintas para uma mesma amostra.

Assim, o trabalho foi desenvolvido apenas com a determinação de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). A determinação de CO_2 foi adaptada no equipamento pelo método de Orsat, em que uma solução básica reage com o dióxido de carbono presente no gás fazendo-o precipitar para medir sua concentração. O resultado de gás metano é obtido indiretamente pela estimativa da diferença do resultado de CO_2 . Ambos, gás carbônico e gás metano, são obtidos em porcentagem (%) com precisão de $\pm 5\%$.

As medições das porcentagens de CO_2 e CH_4 presente nos gases foram realizadas em duplicata para cada uma das amostras, sendo o valor adotado a média dos dois valores.

4.2 Metodologia para a estimativa teórica do potencial de geração de metano

Dos modelos apresentados na revisão bibliográfica, optou-se por utilizar o modelo implementado em ambiente computacional na plataforma Biogás – Aterro 1.0, por ter sido

utilizado em outros aterros do Brasil, como pôde ser observado nos trabalhos realizados por Brito Filho (2005) e Linard e Aquino (2009), e citado pelo Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe (2003), do Banco Mundial.

O programa Biogás – Aterro 1.0 utiliza a seguinte equação de primeira ordem (apresentada anteriormente):

$$Q_{CH_4} = k.Rx.L_0.e^{-k(x-T)} \quad (8)$$

Sendo:

Q_{CH_4} = vazão de metano gerado no ano x pelo RSD depositado no ano T (m^3CH_4 /ano)

k = constante de decaimento (1/ano);

Rx = fluxo de resíduos no ano x (kgRSD);

L_0 = potencial de geração de metano (m^3 biogás/kgRSD);

T = ano de deposição do resíduo no aterro (calculado para cada ano) (ano);

x = ano atual (ano).

Com o objetivo de estudar a sensibilidade do modelo matemático frente a variações nos valores dos parâmetros L_0 e k, foram realizadas simulações distintas para quatro cenários (Cenários 1, 2, 3 e 4). Em cada um dos cenários fixou-se o valor de L_0 ($L_0 = 150; 170; 225$ e $300 m^3 CH_4/t. RSD$) e variou-se o valor de k ($k = 0,06; 0,10; 0,23$ e $0,40 \text{ ano}^{-1}$), gerando quatro curvas para cada valor de L_0 . A Tabela 4 apresenta as condições e parâmetros utilizados nas quatro simulações.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros utilizados nas simulações para 4 cenários distintos

Parâmetros de entrada	CENÁRIOS			
	1	2	3	4
k (ano^{-1})	0,06	0,06	0,06	0,06
	0,10	0,10	0,10	0,10
	0,23	0,23	0,23	0,23
	0,40	0,40	0,40	0,40
L_0 ($m^3 CH_4/t. RSD$)	150	170	225	300
Número de drenos	27			
Ano abertura	2001			
Ano fechamento	2017			
Fluxo diário atual (t./dia)	192,31			
Taxa de crescimento de resíduos (%)	10			
Rx (t./ano)	70.080			
Linha de base de queima (%)	20			
Eficiência de coleta do biogás (%)	55			
Eficiência de queima de biogás (%)	95			

Os valores adotados para k (constante de decaimento) foram baseados na Tabela 5, que apresenta os valores deste parâmetro em função da precipitação anual e da biodegradabilidade da fração orgânica (Banco Mundial), e na Tabela 6, que sugere valores

para k em função das características climáticas locais (USEPA). Considerando que a precipitação anual do município de Rio Claro é superior a 1.000 mm/ano (1.400 mm/ano) (TROPMAIR, 1992), o valor de $k=0,06$, representa o cenário mais desfavorável, com a taxa de produção de metano mais lenta, os valores de $k=0,10$ e $k=0,23$ são intermediários, e $k=0,40$ é o valor máximo da taxa específica de geração de metano por ano correspondente à situação mais favorável.

Tabela 5 - Campos de valores para k sugeridos correspondentes à precipitação anual e à degradabilidade do resíduo

precipitação anual [mm]	Valores k [1/ano]		
	degradabilidade do resíduo		
	inerte	moderada	alta
<250	0,01	0,02	0,03
>250 a <500	0,01	0,03	0,05
>500 a <1000	0,02	0,05	0,08
>1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: Banco Mundial (2003, p. 35)

Tabela 6 - Valores sugeridos para k e L_0 em função das características climáticas locais

Variável	variação	valores sugeridos		
		clima úmido	clima de umidade média	clima seco
L_0 [m^3CH_4/kg_{RSD}]	0 – 0,312	0,14 – 0,18	0,14 – 0,18	0,14 – 0,18
k [1/ano]	0,003 – 0,4	0,10 – 0,35	0,05 – 0,15	0,02 – 0,10

Fonte: USEPA (1996)

O parâmetro k pode ser interpretado como sendo a taxa específica de degradação do resíduo, a qual depende tanto do tipo de matéria orgânica presente no resíduo, quanto do estabelecimento das condições de umidade necessárias à atividade biológica. Na prática este parâmetro envolve diversos fatores como condições climáticas locais (precipitação anual, umidade do ar, temperatura), características operacionais do aterro sanitário (taxa de compactação do resíduo, tipo e espessura da camada de cobertura e altura da camada de resíduos). Porém, os valores sugeridos na literatura associam o parâmetro k apenas à precipitação e consideram que em locais com alta pluviometria (acima de 1.000 mm/ano) os valores ficam entre 0,02 e 0,09 de acordo com o Banco Mundial (2003), e entre faixas de 0,05-0,15 e 0,10-0,35 de acordo com a USEPA (1996), como mostrado nas Tabelas 5 e 6.

Para L_0 , parâmetro que representa o potencial de geração de metano em peso de resíduo sólido domiciliar, e, portanto depende das características de biodegradabilidade do RSD aterrado, quanto maior a porcentagem de resíduo orgânico, maior a biodegradabilidade do mesmo e consequentemente maior o L_0 .

Neste contexto, o valor de $L_0=150 m^3 CH_4/t.RSD$ (ou $L_0=0,15 m^3 CH_4/kg.RSD$) representa o cenário mais desfavorável (resíduo mais inerte). Como cenários intermediários aqueles com $L_0=170 m^3CH_4/t.RSD$, que é o valor adotado pela USEPA (1996) para projetos

norte-americanos, e $L_0=225 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t.RSD}$, considerado aqui como o valor que melhor representa as características do RSD brasileiro, tendo em vista que a porcentagem de matéria orgânica presente nos RSD do Brasil é mais expressiva.

O aterro possui atualmente 27 drenos de gases, os quais foram considerados no modelo. O ano de início da operação do aterro sanitário (ano de 2001) foi fornecido pela Prefeitura Municipal de Rio Claro, enquanto o ano de encerramento foi definido tendo como base a vida útil estimada para o empreendimento (2017) apresentado no Relatório Ambiental Preliminar – RAP que descreve o projeto.

Para a estimativa de Rx (quantidade de resíduos disposta anualmente), o programa fornece diferentes opções, uma delas é pela estimativa do crescimento populacional e a conseqüente geração per capita de resíduos. A outra é baseada no conhecimento do histórico de disposição no aterro no qual são lançadas as quantidades diárias atuais de resíduos e a taxa de crescimento do mesmo. No trabalho utilizaram-se as quantidades mensais de resíduo enviadas para o aterro e uma taxa média calculada a partir do aumento da geração de resíduos nos últimos 10 anos (período de 2000 a 2010) distribuída ano a ano. A partir desses dados, o programa estimou o valor de Rx em t./ano.

Ao final da entrada de dados, é solicitado o valor da linha de base de queima, o qual é sugerido pelo próprio programa como sendo 20%. Para a eficiência de coleta do biogás, de um modo geral, os aterros apresentam um valor de 55% (OONK & BOOM 1995 apud BRITO FILHO, 2005, p. 112), e uma eficiência de queima do biogás de 95% (valor sugerido no default do programa).

Finalmente, para estimar a vazão de metano no aterro de Rio Claro foram adotados $L_0=225 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t.RSD}$ e $k=0,10 \text{ dia}^{-1}$, tendo em vista as condições climáticas do local e a porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos domiciliares do município.

4.3 Forma de Análise dos Dados

Os resultados de porcentagem dos gases foram analisados inicialmente comparando-se as diferentes porcentagens de metano coletadas nos 3 pontos do aterro, com as fases do processo de degradação anaeróbia apresentado pela bibliografia, com a perspectiva de identificar essas fases no aterro em estudo.

Em seguida realizou-se o cruzamento dos dados de porcentagem de metano com a idade de disposição dos resíduos a fim de estudar a relação entre estas variáveis.

A análise da influência de períodos de maior ou menor precipitação na composição dos gases foi realizada com o cruzamento mensal dos dados de precipitação e porcentagem de metano.

O estudo do potencial de geração de metano foi analisado pela simulação de quatro cenários por meio da modelagem matemática, representando condições favoráveis, intermediárias e desfavoráveis em relação a geração de metano.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variação da porcentagem de metano presente nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro e sua relação com o tempo de disposição dos resíduos e o índice pluviométrico

A seguir, nas Tabelas 7 e 8, são apresentados os resultados da composição dos gases realizados no período de agosto (2009) a julho (2010), referentes a 10 campanhas de coletas de gases nos pontos descritos na metodologia.

Na Tabela 9 encontram-se os dados pluviométricos extraídos da Estação Meteorológica do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA/IGCE/UNESP), que dista aproximadamente 9 km do aterro sanitário de Rio Claro, com coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*): 237.878,96 N e 7.521.568,76 E.

Tabela 7 - Porcentagem de CO₂ obtido em diferentes pontos de amostragem do aterro sanitário de Rio Claro – SP

Ano	Mês	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
2009	Agosto	32	37	5*
	Setembro	39	49	47
	Outubro	45	42	37
	Novembro	42	42	38
2010	Fevereiro	35	53	35
	Março	38	42	36
	Abril	45	42	38
	Maio	58	43	43
	Junho	69	15*	68
	Julho	18*	60	48

Legenda: (*) Valores anômalos que foram desconsiderados na avaliação

Tabela 8 - Porcentagem de CH₄ obtido em diferentes pontos de amostragem do aterro sanitário de Rio Claro – SP

Ano	Mês	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
2009	Agosto	67	62	95*
	Setembro	61	50	52
	Outubro	55	58	62
	Novembro	57	57	61
2010	Fevereiro	64	47	65
	Março	61	58	64
	Abril	55	58	62
	Maio	42	57	57
	Junho	30	85*	32
	Julho	82*	40	52

Legenda: (*) Valores anômalos que foram desconsiderados na avaliação

Tabela 9 - Precipitações mensais no referido período (2009-2010)

	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.
Total precipitado (mm)	42,9	85,0	131,3	116,8	168,2	332,3	432,8	183,4	205,3	48,6	17,5	21,3	27,8
Máxima diária (mm)	14,1	31,4	62,2	36,8	41,3	119,7	106,9	18,4	20,6	4,9	1,7	2,1	26,0

Fonte: Estação Meteorológica do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA/IGCE/UNESP)

Observa-se a partir dos dados apresentados nas Tabelas 7 e 8, certa variação das medidas de CO₂ e CH₄ ao longo dos meses. Em relação ao metano, excetuando-se os valores obtidos para o mês de agosto (considerados muito elevados, e atribuídos ao método de extração do gás do recipiente coletor), observa-se uma tendência de aumento da porcentagem de metano, quando do início do período de chuvas (novembro/09 a março/10) e, em seguida, uma tendência de redução da porcentagem de metano, com o início do período de estiagem. A Figura 13 apresenta o gráfico da variação da porcentagem de metano ao longo do tempo.

Os resultados das porcentagens de metano não demonstraram variação que permitisse identificar fases distintas do processo de degradação anaeróbia para os três pontos analisados. Porém deve-se destacar que o “Ponto 3” (localizado próximo a frente de operação do aterro), com resíduos com tempo de aterramento entre 8 e 15 meses, apresentou elevada porcentagem de metano, sinalizando para a fase metanogênica, mesmo nos primeiros meses de coleta. Por outro lado, a bibliografia apresenta que a geração de metano inicia-se após 200 dias do aterramento dos resíduos, chegando a valores acima de 50% somente após 12 meses. Tal fato pode estar associado às condições climáticas favoráveis (elevada precipitação e temperatura) e a biodegradabilidade da fração orgânica dos resíduos domiciliares do Brasil.

O ponto 1 também apresentou elevadas porcentagens de metano, mesmo apresentando resíduos com tempo de aterramento de aproximadamente 9 anos. Segundo dados da bibliografia, a porcentagem de metano após um período de 10 anos, encontra-se na faixa de 30%. Tal discordância pode estar associada à elevada quantidade de matéria orgânica ou a imprecisão da informação a respeito do tempo de disposição dos resíduos no ponto 1, o que é menos provável pois os documentos comprovam o início da operação do aterro em 2001.

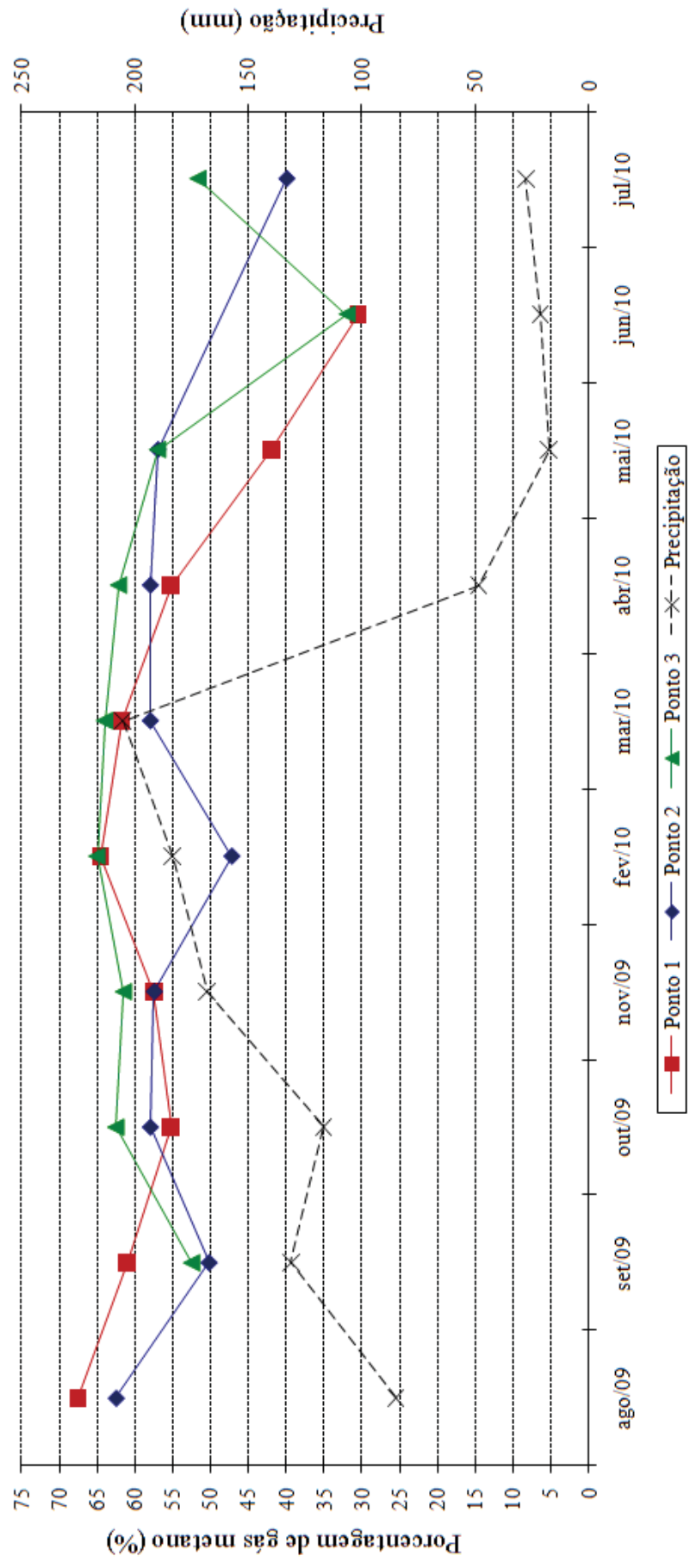


Figura 13 - Variação da porcentagem (%) de gás metano ao longo dos meses em função da precipitação

A análise da Figura 13 permite notar um pequeno declínio na porcentagem de metano ao longo dos meses mais secos e um pequeno aumento nos meses de maior índice pluviométrico.

A observação do gráfico permite constatar também que o aumento da precipitação nos primeiros meses (outubro e novembro) teve pouco reflexo na alteração da porcentagem de metano, sendo mais acentuado a partir do mês de novembro. Pode-se supor que apesar do aumento da precipitação nos meses de outubro e novembro, é necessário um tempo para que a água percole (infiltre) em toda a massa de resíduos aterrada, como também para a produção de novas células a partir da maior disponibilidade de umidade.

5.2 Projeção de cenários para a estimativa do potencial de geração de metano

Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 são apresentados os gráficos decorrentes da combinação de valores de L_0 e k , de forma a simular cenários favoráveis e desfavoráveis à geração de metano, e também conhecer a sensibilidade paramétrica do modelo em relação aos parâmetros k e L_0 . Todos os outros parâmetros foram fixados (taxa de resíduos, anos, etc.), variando-se apenas os valores de L_0 e k .

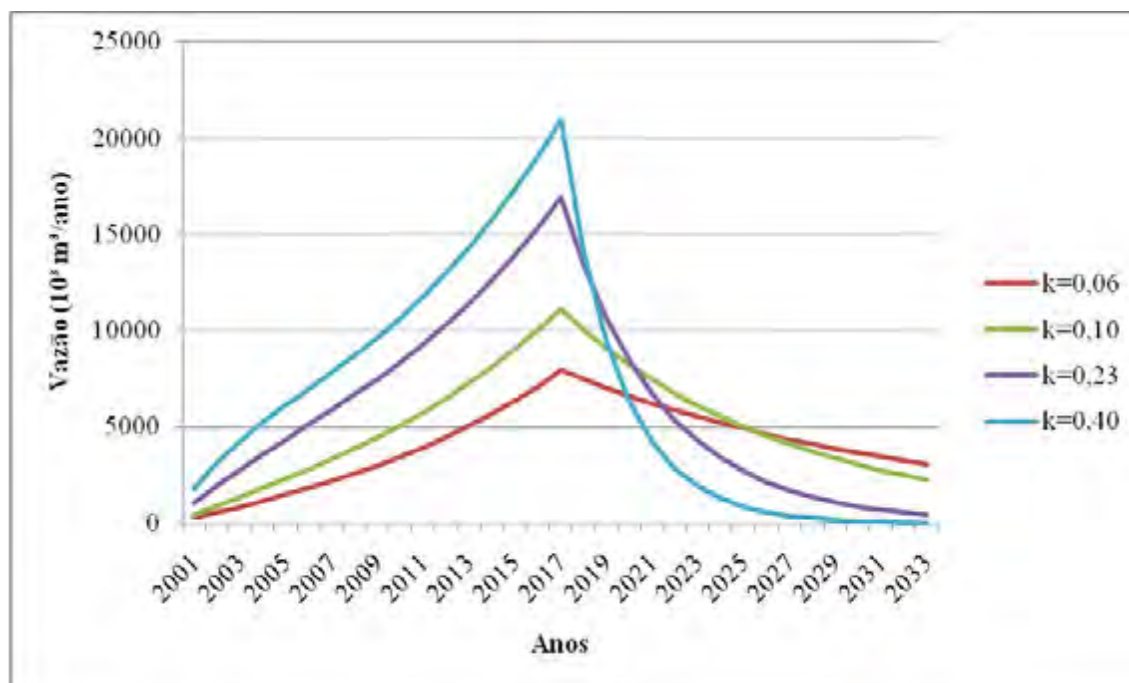


Figura 14 - Perfis da geração de gás para $L_0 = 150 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$. RSD e diferentes valores de k

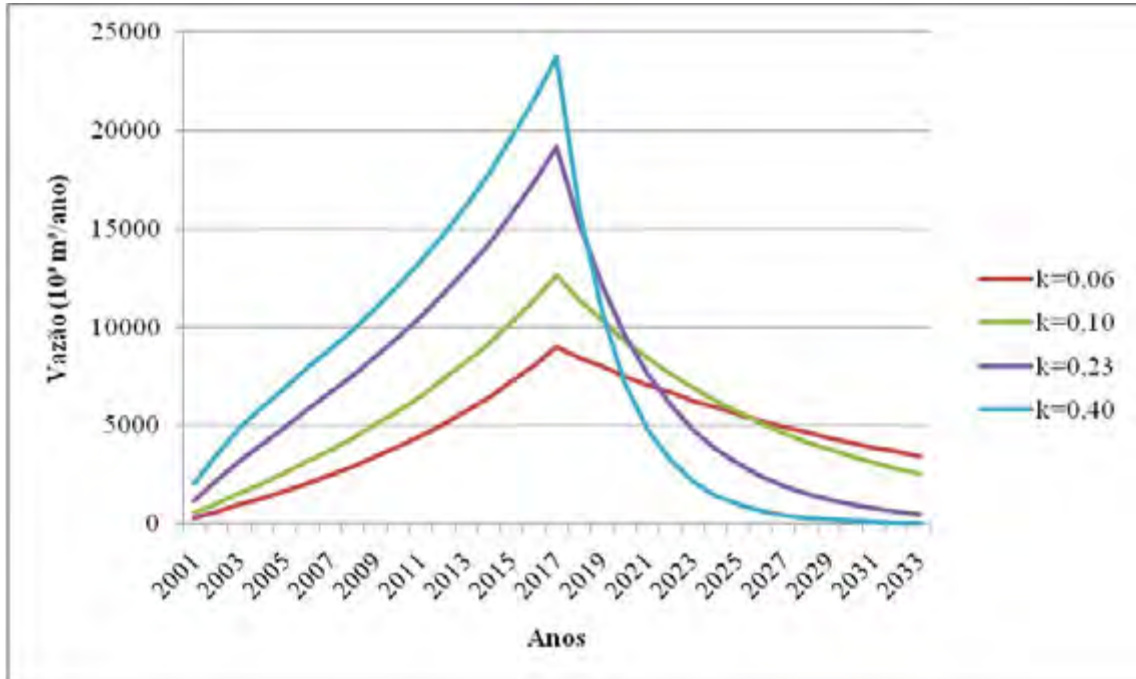


Figura 15 - Perfis da geração de gás para $L_0 = 170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$. RSD e diferentes valores de k

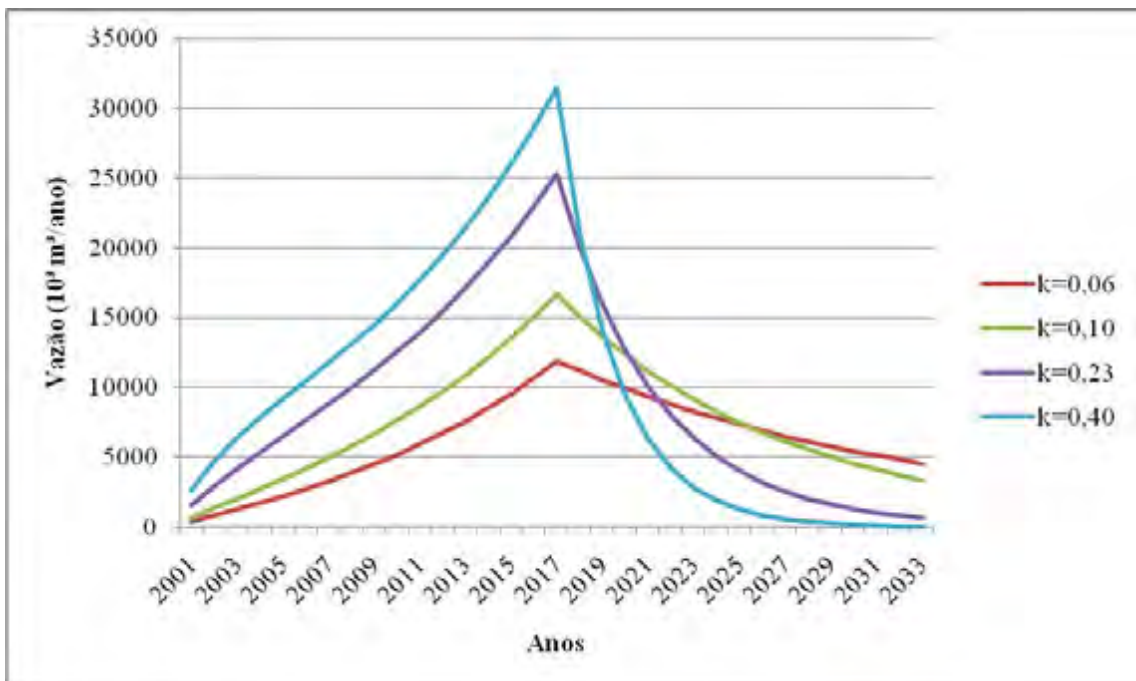


Figura 16 - Perfis da geração de gás para $L_0 = 225 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$. RSD e diferentes valores de k

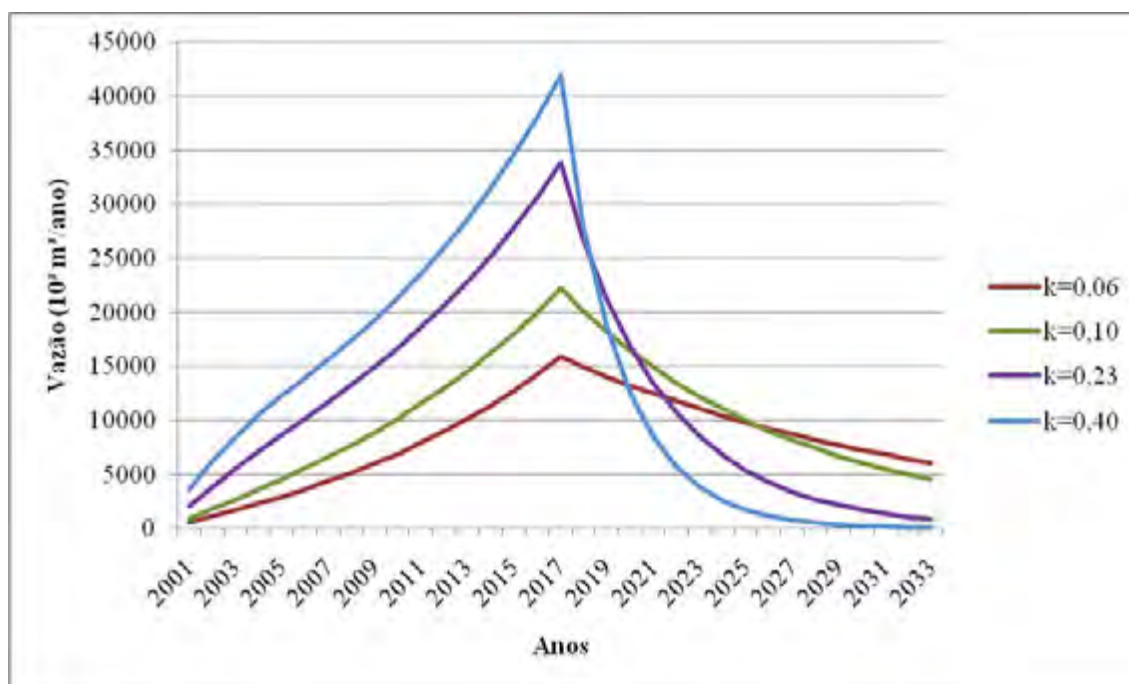


Figura 17 - Perfis da geração de gás para $L_0 = 300 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$. RSD e diferentes valores de k

Observa-se que o pico de geração de metano, em todos os cenários, coincide com o ano do encerramento da vida útil do aterro, previsto para 2017. Isso ocorre porque no ano de encerramento da vida útil, a quantidade disposta de resíduos (matéria orgânica) é máxima, acarretando em um maior potencial de geração (L_0). Com o fechamento (encerramento da vida útil) é cessada a disposição de resíduos, o que explica o decaimento da geração de gás.

Destaca-se que, ao considerar o ano de encerramento como sendo o tempo no qual a quantidade de resíduos é máxima (portanto maior geração de gás), o modelo desconsidera que parte desta matéria orgânica já está estabilizada, não gerando mais metano, principalmente nos casos de aterros com vida útil acima de 20 anos.

Com base nos gráficos apresentados, pode-se concluir que o aumento do valor de L_0 , para um mesmo valor de k , implica no aumento do pico de geração de metano, demonstrando que este pico é diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos, pois representa uma maior quantidade de material para ser degradado. Cabe novamente destacar que o modelo não considera que parte desta matéria orgânica pode já estar estabilizada quando do encerramento do aterro, não contribuindo para o incremento da geração de gás no ano de encerramento.

Tal fato pode ser comprovado observando-se os gráficos apresentados, que mostram que após um período de aproximadamente 15 anos, a produção de metano reduz em 50% da vazão de pico, para $k=0,06 \text{ dia}^{-1}$ (processo de degradação mais lento), e praticamente zero a

geração em um período de 12 anos, para valores de $k=0,4 \text{ dia}^{-1}$ (processo de degradação mais rápido).

Por outro lado, pode-se observar que para um mesmo valor de L_0 , ou seja, para uma mesma quantidade de matéria orgânica inicial, o pico de geração ocorre para o maior valor de k . Isso ocorre porque este parâmetro representa a taxa de degradação da matéria orgânica, assim um valor elevado significa que a matéria orgânica será rapidamente degradada, ocasionando maiores picos. Porém, apesar dos valores de k influenciarem no pico de geração de gás metano, a quantidade total (ou absoluta) de gás será a mesma, uma vez que a quantidade de matéria orgânica (L_0) não varia.

Assim, valores de k menores implicam em uma taxa de geração de metano por ano menor, porém por um período mais prolongado. Esta afirmação pode ser observada, quando se observa o ano do final da geração para diferentes valores de k , e um mesmo L_0 .

Uma análise dos cenários com vistas ao aproveitamento energético dos gases pode sugerir que uma geração mais prolongada (menor k) permite a utilização de equipamento de menor porte, por um período mais longo, se comparada com cenários com alta taxa de geração, que exigem maior capacidade dos equipamentos instalados de forma a possibilitar o maior aproveitamento dos gases gerados, sendo que rapidamente este equipamento tornar-se-á super dimensionado. Assim, deve-se considerar a oportunidade da utilização de sistemas modulares de forma a se adequar às variações de vazão de gás.

5.3 Estimativa da geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro – SP

Considerando as condições de Rio Claro, o cenário que melhor representa o aterro é o apresentado na Figura 18, com $L_0=225 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ e $k=0,10$. Nestas condições o pico de vazão será de $16.692,99 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$, quando do encerramento do aterro (ano de 2017), conforme observado na Tabela 10, que apresenta os valores da vazão de metano para cada um dos anos de geração de gás no aterro.

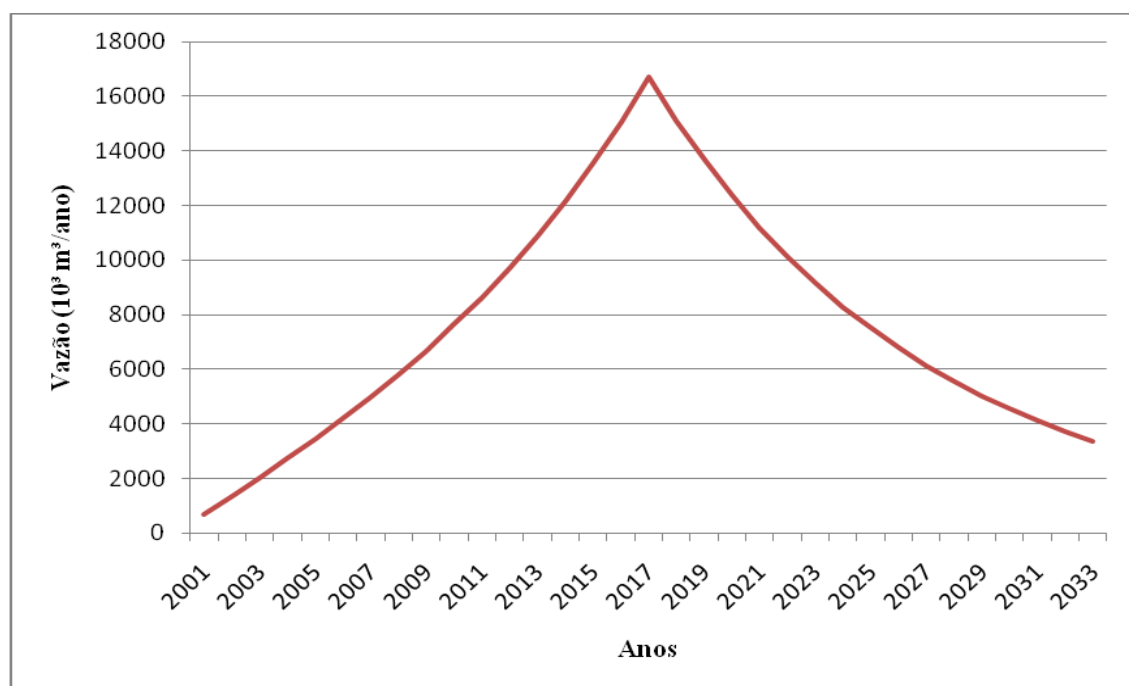


Figura 18 - Perfil de geração de gás considerando as condições específicas do aterro sanitário de Rio Claro – SP ($L_0=225 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ e $k=0,10 \text{ dia}^{-1}$)

Tabela 10 - Valores anuais da vazão de metano no aterro sanitário de Rio Claro - SP para o cenário escolhido ($L_0=225 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ e $k=0,10 \text{ dia}^{-1}$)

Anos	Vazão ($10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)	Anos	Vazão ($10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)
2001	668,72	2018	15104,44
2002	1340,67	2019	13667,07
2003	2022,24	2020	12366,47
2004	2719,86	2021	11189,65
2005	3440,1	2022	10124,81
2006	4189,7	2023	9161,31
2007	4975,67	2024	8289,49
2008	5805,32	2025	7500,64
2009	6686,32	2026	6786,86
2010	7626,83	2027	6141,01
2011	8635,53	2028	5556,61
2012	9721,67	2029	5027,83
2013	10895,26	2030	4549,37
2014	12167,03	2031	4116,44
2015	13548,63	2032	3724,71
2016	15052,71	2033	3370,26
2017	16692,99	Total gerado no período	252866,22

Como observado, após 10 anos do encerramento da vida útil do aterro, a vazão de gás cai mais de 60%, ficando em $6.141,01 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$. A previsão de uma diminuição significativa na vazão ficou para o ano de 2.033, com valor de $3.370,26 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Assim, um estudo de viabilidade econômica deve considerar qual seria a menor vazão passível de aproveitamento viável economicamente quando da concepção do sistema de aproveitamento de gases.

6. CONCLUSÕES

Os dados de composição dos gases permitem concluir que, em geral a porcentagem de metano presente nos gases é significativa, ficando entre 50 e 62%.

A presença de gás metano em porcentagem acima de 50% a partir de um período de 8 meses do aterramento dos resíduos mostra que o processo anaeróbio de degradação é intenso, o que pode indicar também que o período de geração de gás metano seja mais reduzido, do que o apresentado pelo modelo matemático, nas condições da pesquisa.

Não ocorreram variações significativas que permitam afirmar a relação entre às diferentes fases de degradação anaeróbia em cada dreno de gás e o tempo de disposição dos resíduos.

Os dados de composição mostraram que existe uma relação entre o aumento da pluviosidade e o aumento da produção de metano, evidenciando que a umidade é um fator limitante no processo de degradação biológica do aterro estudado.

Com a aplicação do modelo de geração de gases para diferentes cenários, pôde-se verificar quão variável e sensível é a geração de gás em função da variação dos parâmetros k e L_0 , os quais são fortemente dependentes das características do resíduo a ser disposto no aterro, das condições climáticas do local, e principalmente das condições operacionais do aterro (tipo e espessura do material de cobertura, tamanho da frente de operação, taxa de compactação dos resíduos). Além disso, mesmo para o pior cenário as vazões de gases são significativas e apontam para um potencial de aproveitamento energético, em cenários até o ano de 2033.

O método indireto apresentado neste trabalho é uma estimativa teórica, baseada em parâmetros do aterro em estudo e em valores estimados de aterros sanitários europeus e norte-americanos. Assim, vale salientar que para avaliar o potencial de um aterro brasileiro faz-se necessário utilizar parâmetros condizentes com as características climáticas locais e com o tipo de resíduo sólido domiciliar.

Os projetos de aproveitamento de biogás em aterros sanitários devem atentar para o fato de tanto a porcentagem de metano (poder calorífico do gás) quanto à própria vazão de gases serem variáveis ao longo do tempo, como evidenciado por meio das análises diretas e das simulações realizadas. Assim, deve-se considerar a utilização de sistemas modulares de geração de energia, de forma a conferir maior flexibilidade ao sistema, e adequar às variações de vazão de gás.

A estimativa do potencial de geração de gás metano no aterro sanitário de Rio Claro foi de $252.866,22 \times 10^3 \text{ m}^3$, para o período de 2001 a 2033. A maior vazão de gás metano será

16.692,99 x 10³ m³/ano, ocorrendo no ano de encerramento do aterro (2017), e a menor vazão gerada pelo modelo matemático no período será de 3370,26 x10³ m³, no ano de 2033.

A utilização do gás de aterro para a produção de energia sinaliza que externalidades sócio-ambientais decorrentes dos resíduos sólidos podem ser revertidas em benefícios ambientais e econômicos. Para um melhor aproveitamento desta fonte de energia são necessários controle e acompanhamento em cada fase do processo de eliminação e destinação dos resíduos. Os aterros sanitários devem ser adequadamente preparados para receber os resíduos, com infra-estrutura para a coleta e tratamento dos gases, podendo estar associado a uma termoelétrica, que a partir do gás e por meio do processo de combustão, possibilita a co-geração de energia elétrica.

Além disso, os aterros sanitários se configuram como uma boa oportunidade para investimentos que objetivam a redução das emissões de metano e dióxido de carbono para a atmosfera, e assim contribuir para as ações de redução de emissões (no contexto de projetos MDL), gerando receita financeira com os créditos de carbono. Programas para a recuperação de metano, fundamentados nas emissões evitadas e na recuperação ou geração de energia, criados em alguns países, apresentam uma previsão de reduzir em 50% as emissões de metano e proporcionar ganhos economicamente satisfatórios. O Brasil tem um grande potencial para a expansão de programas dessa natureza podendo contribuir para a geração distribuída e descentralizada de energia no país.

7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para estudos futuros que as análises de composição dos gases nos drenos sejam efetuadas com uma frequência maior para se obter resultados mais precisos das influências climáticas e de operação na composição dos gases num aterro sanitário.

Necessita-se de mais estudos para ajuste de parâmetros de modelagem condizentes com as características climáticas e operacionais dos aterros brasileiros, e assim obter estimativas de acordo com a realidade brasileira.

Da mesma maneira, os estudos das equações e modelos matemáticos devem ser mais aprofundados no intuito de dissecar os diferentes parâmetros de acordo com cada tipo de interferência na geração dos gases.

8. PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

8.1 Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Aplicação de modelo matemático para a estimativa da geração de biogás no aterro sanitário do município de Rio Claro - SP. In: XVII Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM, 2010, Santa Fe. La investigación científica: eje del desarrollo regional en los albores del bicentenario de la independencia latinoamericana. Santa Fe: Ediciones UNL, 2010.
2. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Estudo da Composição e do Potencial Energético dos gases de Aterro Sanitário e sua relação com as fases de degradação anaeróbia. In: XXI Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2009, São José do Rio Preto. XXI Congresso de Iniciação Científica da Unesp. São Paulo - SP: CGB/PROPe UNESP, 2009.

8.2 Resumos expandidos publicados em anais de congressos

1. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Estudo da Composição e do Potencial Energético dos gases de Aterro Sanitário e sua relação com as fases de degradação anaeróbia. In: XXI Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2009, São José do Rio Preto. XXI Congresso de Iniciação Científica da Unesp. São Paulo - SP: CGB/PROPe UNESP, 2009.

8.3 Resumos publicados em anais de congressos

1. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Estudo da Composição e do Potencial Energético dos gases de Aterro Sanitário e sua relação com as fases de degradação anaeróbia. In: XXI Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2009, São José do Rio Preto. XXI Congresso de Iniciação Científica da Unesp. São Paulo - SP: CGB/PROPe UNESP, 2009.
2. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Study of composition and energetic potential of landfill gas and its relation to the stages of anaerobic degradation. In: III Simpósio História, Energia e Meio Ambiente, 2010, Rio Claro. Holos Environment. Rio Claro: Holos Environment On-line, 2009. v. 9. p. 54-56.
3. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Aplicação de modelo matemático para a

estimativa da geração de biogás no aterro sanitário do município de Rio Claro - SP. In: XVII Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM, 2010, Santa Fe. La investigación científica: eje del desarrollo regional en los albores del bicentenario de la independencia latinoamericana. Santa Fe: Ediciones UNL, 2010. v. 1. p. 217-218.

8.4 Apresentações de Trabalho

1. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Study of composition and energetic potential of landfill gas and its relation to the stages of anaerobic degradation. 2010. (Apresentação de Trabalho/Outra).
2. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Study of composition and energetic potential of landfill gas and its relation to the stages of anaerobic degradation. 2010. (Apresentação de Trabalho/Outra).
3. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Avaliação da porcentagem de metano presente nos gases gerados no aterro sanitário do município de Rio Claro-SP: estudo do potencial energético. 2010. (Apresentação de Trabalho/Congresso).
4. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Avaliação da porcentagem de metano presente nos gases gerados no aterro sanitário do município de Rio Claro - SP: estudo do potencial energético. 2010. (Apresentação de Trabalho/Simpósio).
5. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Estudo da Composição e do Potencial Energético dos gases de Aterro Sanitário e sua relação com as fases de degradação anaeróbia. 2009. (Apresentação de Trabalho/Congresso).
6. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Estudo da Composição e do Potencial Energético dos gases de Aterro Sanitário e sua relação com as fases de degradação anaeróbia. 2009. (Apresentação de Trabalho/Outra).
7. BELLO, P. P. G.; CASTRO, M. C. A. A. Estudo da Composição e do Potencial Energético dos gases de Aterro Sanitário e sua relação com as fases de degradação anaeróbia. 2009. (Apresentação de Trabalho/Simpósio).

9. REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, P. B. *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. 2007. 366p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2008*. São Paulo: 2008. 196 p. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2008.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. São Paulo, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004: Resíduos sólidos: Classificação*. São Paulo, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. São Paulo, 2004.
- BANCO MUNDIAL. *Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe*. Ontário: Conestoga Rovers & Associates, 2003. 248 p. Disponível em: <<http://www.bancomundial.org.ar/lfg/Archivos/Brasil/section1.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2010.
- BRASIL. *Lei Federal nº 10.438*, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/lei200210438.pdf>>. Acesso em 9 nov. 2009.
- BRITO FILHO, L. F. de. *Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos*. 2005. 218 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- CASTRO, M. C. A. A. de. *Avaliação de um sistema australiano de lagoas no tratamento conjunto de esgoto sanitário e líquidos percolados*. 246 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- CETESB. *Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético – aterros – versão 1.0*. São Paulo: SMA, CETESB, MCT, 2006. 65 p.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 12., Rio de Janeiro. *Desafios do setor energético brasileiro – Anais 2008*. Rio de Janeiro: Arte América Produções, 2008. v. 4.
- DIAS, V. C. F.; PASSOS, R. V.; OLIVEIRA, D. M. de.; BELLI FILHO, P.; CASTILHOS Jr.; A. B. de. Diagnóstico da geração e do potencial energético de biogás no aterro sanitário de Içara/SC. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25., 2009, Recife/PE. *Anais...* Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2009. 1 CD.

DUARTE, A. C. *Projetos de MDL em aterros sanitários no Brasil: alternativas para o desenvolvimento sustentável*. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ENSINAS, A. V. *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP*. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ESRI ArcMap for Microsoft Windows Vista. Version 9.3. [S.I.]: ESRI Inc.: 1999-2008.

ESTADÃO. *Brasil e China cobram US\$ 10 bi de ricos contra efeito estufa* – Valor, acordado na Conferência de Copenhague, será usado por países pobres no combate ao aquecimento. Estadão, São Paulo, 24 jan. 2010. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/vidae,brasil-e-china-cobram-us-10-bi-de-ricos-contraefeito-estufa,500722,0.htm>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

FERRERO, G. L.; FERRANTI, M. P.; NAVEAU, H. *Anaerobic digestion and carbohydrate hydrolysis of waste*. Essex: Elsevier Applied Science Publishers LTD, 1984. 517 p. (Commission of the European Communities).

FRÉSCA, F. R. C. *Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física*. 2007. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GOLDEMBERG, J.; TRIGUEIRO, A. (Coord.). *Meio ambiente no século 21: 21 especialistas falam da questão ambiental nas suas áreas de conhecimento*. 4. ed. Campinas: Ed. Autores Associados Ltda, 2005. 367p.

GOOGLE Earth for Microsoft Windows Vista. *Imagem de satélite*. Version 5.1.3533.1731 [S.I.]. Google: 2009.

GROVER, V. I.; GUHA, B. K.; HOGGLAND W.; MCRAE, S. G. *Solid Waste Management*. USA: A. A. Balkema Publishers, 2000. 325 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – IBAM. *Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Atlas de saneamento*. 151 p. (Coordenação de Geografia). Rio de Janeiro: 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/pdfs/mappag59.pdf>. Acesso em: 30 out. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000*. 397 p. (Departamento de População e Indicadores Sociais). Rio de Janeiro: 2002. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE Cidades. *Rio Claro – SP*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 26 jan. 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A. (IPT) / COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. Publicação IPT 2622, São Paulo: 2000.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2007). Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm>. Acesso em: 23 jan. 2010.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. v. 1, 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs4.html>>. Acesso em: 23 jan. 2010.

LINARD, A. de F. G.; AQUINO, M. D. de. *Estudo da viabilidade do aproveitamento de biogás de aterro para fins energéticos com vistas ao desenvolvimento sustentável: aplicação no aterro sanitário metropolitano oeste em Caucaia, Ceará*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25., 2009, Recife/PE. *Anais...* Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2009. 1 CD.

LOPES, L. *Gestão e gerenciamento integrado dos resíduos sólidos urbanos – Alternativas para pequenos municípios*. 2006. 113 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, L. de; PICCININ, L. S. *Manual de Análise do Biogás com Biofoto*. Alfakit e Embrapa Suínos e Aves. Florianópolis, SC. 20 p.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T.; ALVES, I. R. de F. S.; LOPES, R. L.; NOGUEIRA, G. A. B. Bioenergia a partir de um aterro de resíduos sólidos urbanos no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25., 2009, Recife/PE. *Anais...* Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2009. 1 CD.

MENDES, L. G. G. *Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá*. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. *Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. 16 p. Disponível em: <http://www.oc.org.br/cms/arquivos/inventario_emissoes_gee-valores_preliminares-25-11-2009.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2010.

MINTER/CNDU/CETESB. *Aterro sanitário*. São Paulo: 1979.

MONTEIRO, C. A. de F. *A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo – estudo geográfico sob forma de atlas*. São Paulo: Universidade de São Paulo/ Instituto de Geografia, 1973. 129 p.

OLIVEIRA, D. M. de.; SANTANGELO, V. S.; DIAS, V. C. F.; CASTILHOS Jr.; A. B. de. Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Timbó/SC. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25., 2009, Recife/PE. *Anais...* Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2009. 1 CD.

PAMPLONA, N. Demanda de energia é recorde pelo terceiro dia seguido. *Agência Estado*, São Paulo, 3 fev. 2010. Disponível em: <http://economia.estadao.com.br/noticias/not_3669.htm>. Acesso em: 4 fev. 2010.

PARENTI JR, H. *Avaliação dos usos energéticos potenciais do biogás do aterro sanitário de São Carlos – SP*, 2005. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PARKER, C.; ROBERTS, T. *Energy from waste: an evaluation of conversion technologies*. Essex: Elsevier Applied Science Publishers LTD, 1985. 217 p. (Commission of the European omcmunities).

PELCZAR JR, M.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. *Microbiologia: conceitos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996. Vol. II. 517 p.

POLÍTICA ESTADUAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PEMC (SP). *Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC, contendo seus princípios, objetivos e instrumentos de aplicação*. São Paulo, 2009.

PIEROBON, L. R. P.; *Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário*, 2007. 154 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

POHLAND, F. G.; GOULD, J. P. Co-disposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills. *Water Science Technology*. v.18, n.12, p.177-192. (1986).

POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. *Critical review and summary of leachate and gas production from landfills*. Tech. project n.E20 G01, dec. (1985).

RELATÓRIO AMBIENTAL PRELIMINAR – RAP. *Aterro sanitário e industrial do município de Rio Claro – SP*. Ação engenharia. São Paulo – SP.

RUSSO, M. A. T. *Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários*. 320 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2005.

SCHALCH, V. *Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações de parâmetros do processo de digestão anaeróbia*. São Carlos. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

SCHALCH, V. *Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano*. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. Monitoramento da qualidade do biogás gerado em um aterro sanitário experimental. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25., 2009, Recife/PE. *Anais...* Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2009. 1 CD.

SMITH, W. H.; FRANK, J. R. *Methane from biomass: a systems approach*. Essex: Elsevier Applied Science Publishers LTD, 1988. 500 p.

SP NOTÍCIAS. *Serra sanciona Política Estadual sobre Mudanças Climáticas*. Disponível em: <<http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/lenoticia.php?id=205874>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL S. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. USA: McGraw-Hill, 1993. 978 p.

TROPPEMAIR, H. *Atlas da Qualidade Ambiental e de Vida de Rio Claro*. 1992.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Guide for methane mitigation projects – Gas to energy at landfills and open dumps*. Washington: U. S. Editores: Mark Orlic e Tom Kerr, Draft Version 2, 1996.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005. 56 p.

APÊNDICE A – Programa Biogás Aterro 1.0



Figura 19 - Tela inicial do Programa Biogás Aterro 1.0, utilizado nas simulações do trabalho

Figura 20 - Entrada de dados do programa Biogás Aterro 1.0 para a estimativa da geração de metano