

USP

Campus de São Carlos

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS DISPOSTOS EM ATERROS
SANITÁRIOS VISANDO SEU
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Margareth de Cássia Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Valdir Schalech

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Margareth de Cássia Oliveira

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE RESÍDUOS SÓLIDOS DISPOSTOS EM ATERROS
SANITÁRIOS VISANDO SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço... 04 / 08 / 05

Ass.: *lesaw*

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Valdir Schalch

São Carlos
2004

DEDALUS - Acervo - EESC



31100052253



Class.	TESE-EESC ✓
Cuff.	4364
Tombo	T207/05
Syno	1456882

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

048a	<p>Oliveira, Margareth de Cássia Avaliação preliminar de resíduos dispostos em aterros sanitários visando seu aproveitamento energético / Margareth de Cássia Oliveira. -- São Carlos, 2004.</p> <p>Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004. Área: Ciências da Engenharia Ambiental. Orientador: Prof. Tit. Valdir Schalch.</p> <p>1. Aterro sanitário. 2. Metano. 3. Aproveitamento energético. 4. Efeito estufa. I. Título.</p>
------	--

FOLHA DE JULGAMENTO

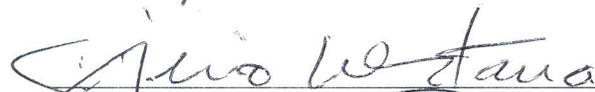
Candidata: Bacharel **MARGARETH DE CÁSSIA OLIVEIRA**

Dissertação defendida e julgada em 02-04-2004 perante a Comissão Julgadora:



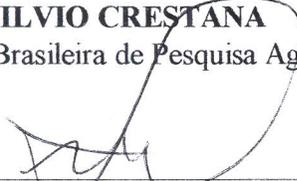
Prof. Assoc. **VALDIR SCHALCH (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **SILVIO CRESTANA**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

aprovado

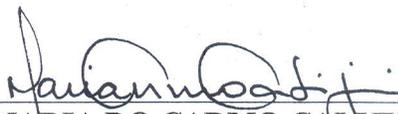


Prof. Dr. **MARCUS CÉSAR AVEZUM ALVES DE CASTRO**
(Centro Universitário de Araraquara/UNIARA)

Aprovado



Prof. Associado **EVALDO LUIZ GAETA ESPINDOLA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Ciências da Engenharia Ambiental



Profª. Assoc. **MARIA DO CARMO CALJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho a meus pais Alberto e Dilma, exemplos de perseverança, pessoas fundamentais na minha trajetória de vida, sem as quais não seria possível a concretização de mais este sonho. A meus irmãos: Simone, Júlio e Artur que muito me apoiaram e ajudaram nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Valdir Schalch pela orientação e paciência, constantes durante o desenvolvimento deste trabalho. Sou grata também pelas contribuições, experiências transmitidas e atenção dispensadas em cada etapa do trabalho.

Agradeço a toda equipe de gerenciamento do aterro do município de Piracicaba “Pau Queimado”: Valdemar, Rômulo e Liceu, que muito colaborou com as coletas das amostras.

Agradeço a colega Márcia Capellini, pela ajuda durante o desenvolvimento da etapa de revisão de literatura deste trabalho.

Sou grata à Universidade de São Paulo, por colocar sua estrutura à minha disposição.

Agradeço ao Júlio, do Laboratório de Hidráulica e Saneamento pela grande ajuda durante a execução das análises laboratoriais.

RESUMO

OLIVEIRA, M.C. (2004). *Avaliação preliminar de resíduos sólidos dispostos em aterro sanitário visando seu aproveitamento energético*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Equacionar a problemática do aumento da geração de resíduos sólidos é tarefa complexa, que envolve entre outras, questões de ordem ambiental, de saúde pública e econômica. Quando se trata de disposição final de resíduos sólidos, o aterro sanitário é a única técnica utilizada ambientalmente correta, porém ainda são poucas as cidades que a emprega. Espera-se que nos próximos anos, aumente o número de municípios com aterro sanitário e deste modo, surge um outro problema de cunho ambiental, e em nível mais global, que se refere aos gases liberados pelos aterros sanitários, durante a decomposição anaeróbia da parte orgânica dos resíduos. Estão entre estes gases, o dióxido de carbono e o metano, que contribuem para o efeito estufa. Se por um lado o metano é prejudicial, quando se trata de efeito estufa, por outro lado, pode ser utilizado para fins energéticos como fonte de energia renovável e justamente substituindo os combustíveis fósseis, que representam a maior fonte dos chamados gases de efeito estufa. O presente trabalho, tem como objetivo inicial, levantar as alternativas para o uso de gases de aterro sanitário como fonte de energia, em um segundo momento do trabalho, relacionar as fases da digestão anaeróbia com a produção de metano, através da análise de amostras coletadas em diferentes pontos e profundidades do aterro do município de Piracicaba/SP.

Palavras-chave: aterro sanitário; metano; aproveitamento energético; efeito estufa

ABSTRACT

OLIVEIRA, M.C. (2004). *Preliminary evaluation of the solid waste disposal in landfill vising the energetic utilization*. Dissertation – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo., São Carlos, 2004.

Finding a solution to the problematic of increasing of solid waste is a complex task, which compromises several questions, of order environmental, public health and economic. Referring to the final disposal of solid waste, the landfill is the only right environmental way use it. Some years from now, is expected a municipality number increasing with landfill and like that, there will be another environmental problem, and more world wide, because the release gases by landfills, during the anaerobic digestion there are. Among these gases carbon dioxide and methane, that contribute to the greenhouse effect. The methane is prejudicial, but on the other hand, it can be used to energetic purpose as renewable energy source in order to substitute fossil fuel. Those are the largest source of *greenhouse gas*. The goal of this research is to realize a bibliographical study about projects in using landfill gas as energy. Another purpose of it, is to relate the phases of the biodegradability with methane production, using as case study the landfill Pau Queimado (Burned Wood), located in Piracicaba/SP. According to the result of this research look forward to contributing with data that can help to evaluate the use of methane as renewable energy source, and as a consequence, reducing the greenhouse effect.

Keywords: landfill; methane; energetic utilization; greenhouse effect

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Célula de aterro sanitário tronco-piramidada	22
FIGURA 2 - Execução de uma célula de aterro sanitário, aproveitando-se a encosta como elemento de contenção	24
FIGURA 3 - Abertura de trincheira de grande dimensão	25
FIGURA 4 - Escavação de trincheira em pequena dimensão	26
FIGURA 5 - Início de operação de um aterro sanitário e alguns elementos construtivos	30
FIGURA 6 - Seqüências metabólicas da digestão anaeróbia	40
FIGURA 7 - Representação gráfica da produção de gás de resíduos rapidamente e lentamente biodegradáveis	46
FIGURA 8 - Impactos possíveis em diversas áreas do mundo	50
FIGURA 9 - O ciclo do carbono	52
FIGURA 10 - O efeito estufa	54
FIGURA 11 - Energia consumida no mundo	56
FIGURA 12 - Crescimento do número de habitantes em escala mundial	57
FIGURA 13 - Concentração atmosférica de CO ₂ nos últimos 150 anos	59
FIGURA 14 - Esquema do mercado de carbono	81
FIGURA 15 Perfuração realizada no aterro novo	86
FIGURA 16 - Perfuração realizada no aterro velho	86
FIGURA 17 - Perfuração realizada para coleta de amostras	87
FIGURA 18 - Localização dos pontos de coleta de amostras sólidas	88
FIGURA 19 - Amostra de resíduos sólidos sendo preparadas para análise (aterro novo)	95
FIGURA 20 - Amostra de resíduos sólidos sendo preparadas para análise (aterro velho)	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Evolução da composição do lixo da cidade de São Paulo	10
TABELA 2 - Processos de transformações utilizados no gerenciamento de resíduos sólidos domiciliares	11
TABELA 3 - Composição média de coleta seletiva	18
TABELA 4 - Reações acetogênicas	38
TABELA 5 - Definições dos organismos de acordo com suas temperaturas de crescimento	44
TABELA 6 - Composição típica dos gases encontrados em aterros sanitários	47
TABELA 7 - Gases de efeito estufa e seus potenciais de aquecimento	55
TABELA 8 - Emissão de CO ₂ devido à produção de energia	60
TABELA 9 - Contribuições naturais e antrópicas na emissão de metano	61
TABELA 10 - Carbono orgânico degradável	68
TABELA 11 - Opções de armazenamento de metano	74
TABELA 12 - Resultados de análise físico-química do chorume	92
TABELA 13 - Resultados das análises de DQO – aterro velho	94
TABELA 14 - Resultados das análises de DQO – aterro novo	94

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRAT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos do trabalho	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Resíduos sólidos	5
2.1.1 Definição de resíduos sólidos	5
2.1.2 Classificação de resíduos sólidos	6
2.1.3 Quantificação e características físico-químicas de resíduos sólidos domiciliares	8
2.2 Tecnologias de tratamento de resíduos sólidos domiciliares	11
2.3 Aterros sanitários	19
2.3.1 Tipos de aterros sanitários	20
2.3.2 Cálculo das dimensões das células	26
2.3.3 Sistemas de drenagem	29
2.3.4 Sistema de tratamento de líquidos percolados	31
2.3.5 Digestão de resíduos sólidos em aterro sanitário	33
2.3.6 Produção de metano e estabilização da matéria orgânica	43
2.4 Mudanças climáticas	48
2.4.1 Ciclo do carbono	51
2.4.2 Efeito estufa	53
2.4.3 Uso de combustíveis fósseis	56
2.4.4 Emissão de metano	60
2.5 Projetos de uso de gás metano para fins energéticos	68
2.5.1 Particularidades do uso de gás metano para fins energéticos	71
2.6 Protocolo de Quioto	75
2.6.1 Protocolo de Quioto e o mercado de carbono	77
2.6.2 O <i>Prototype Carbon Fund</i> do Banco Mundial	81

3 METODOLOGIA	83
3.1 Aterro municipal de Piracicaba “Pau Queimado”	83
3.2 Levantamento da revisão bibliográfica referente ao uso de gás metano proveniente de aterro sanitário, para fins energéticos	84
3.3 Relacionamento das características físico-químicas dos líquidos percolados como o tempo de disposição dos resíduos no aterro sanitário	85
3.4 Perfuração de pontos previamente definidos nos dois aterros sanitários (novo e velho)	85
3.5 Análises laboratoriais	89
3.5.1 Análise de Demanda Química de Oxigênio (parte sólida)	89
3.5.2 Análise dos parâmetros físico-químicos dos líquidos percolados	90
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.1 Análise do chorume, do aterro novo e do aterro velho	92
4.2 Análise da biodegradabilidade da matéria orgânica	94
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE	105

1. INTRODUÇÃO

Desde as mais antigas formas assumidas pelas cidades, a disposição final dos resíduos e dos dejetos humanos já representava um problema. Nas cidades medievais, o acúmulo destes resíduos e dos dejetos, em algumas ocasiões, chegava a constituir volumes consideráveis, sobre os quais transitavam as pessoas, tornando-se um grave problema. Esta forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos e dos dejetos humanos ocorria pelo fato de não haver sistemas organizados de coleta e acondicionamento dos resíduos e de esgotamento sanitário, o que facilitava a proliferação de micro e macro-vetores de diversas moléstias, que se propagavam rapidamente, levando a graves episódios, como surtos de peste negra, que dizimaram continentes populacionais imensos, Branco (1997).

Estas condições sanitárias precárias, ainda prevalecem durante a maior parte do tempo na história das cidades, agravando-se com relação aos resíduos sólidos a partir das transformações impostas pelo modo de produção capitalista, que ao acelerar os processos de produção das mercadorias provocou uma intensificação do uso dos recursos naturais, e a conseqüente ampliação da geração de resíduos, oriundos tanto do próprio processo de produção quanto do consumo final de produtos, que passaram a ser ofertados em grandes quantidades e variedades pela produção industrial, Fuscaldo (2001).

A partir do advento da industrialização e com o aumento da população que se concentrava principalmente nas cidades, tornou-se necessário o equacionamento das demandas dessa massa ampliada de resíduos gerados.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), (2002) em onze anos (entre 1989 e 2000) a quantidade de resíduos coletados no Brasil subiu de 96.287t/dia para 228.413

t/dia. Porém, segundo dados da mesma pesquisa, apenas 36,2% são dispostos adequadamente.

Cerca de 60% do lixo urbano é constituído de matéria orgânica, que ao ar livre entra em decomposição rapidamente, atraindo moscas, baratas, ratos e urubus e outros vetores de transmissão de doença, além do risco potencial de contaminação de corpos d'água por líquidos percolados, decorrentes da decomposição de resíduos e de águas pluviais que caem sobre a massa de resíduos sólidos, conforme Schalch et al. (2000).

Espera-se que aumente o número de municípios com aterros sanitários, revertendo o quadro atual apresentado pela Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Como consequência desse fato, surge um outro problema de cunho ambiental: o processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica, encontrado em aterros, resulta na geração de gases como metano e dióxido de carbono, que contribuem para o aumento do efeito estufa na atmosfera. São os chamados gases do efeito estufa ou *greenhouse gas*.

Nas décadas de 70 e 80, a recuperação do metano contido em gases de aterros sanitários usados para fins energéticos, buscava apenas uma fonte alternativa de combustível. Hoje, além de uma fonte renovável de energia, é uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis. Projetos de recuperação de gases de aterros sanitários surgem como solução mitigadora de emissões de metano evitando o aumento do efeito estufa.

Diante do cenário apresentado, o presente trabalho teve como objetivo, realizar um levantamento bibliográfico sobre alternativas de uso de gases de aterro sanitário como fonte de energia, e relacionar as fases de biodegradabilidade com a produção de metano, utilizando como estudo de caso, o aterro municipal da cidade de Piracicaba/SP.

Com os resultados da pesquisa, espera-se contribuir com dados que permitam avaliar o uso de gás metano como fonte de energia renovável e conseqüentemente com a mitigação do efeito estufa.

1.1 Objetivos do trabalho

◇ Realizar revisão bibliográfica, do Brasil e do exterior, referente principalmente ao uso de gás metano de aterro sanitário para fins energéticos.

◇ Relacionar as características físico-químicas dos líquidos percolados com o tempo de disposição dos resíduos no aterro sanitário.

◇ Relacionar as fases de digestão anaeróbia com a taxa de geração de metano.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os itens abordados na revisão bibliográfica são de suma importância para reflexão de quanto é complexa a questão de resíduos sólidos.

É possível verificar que o gerenciamento dos resíduos sólidos não se limita apenas em geração e disposição envolvendo questões globais como efeito estufa.

2.1 Resíduos sólidos

2.2 Tecnologias de tratamento de resíduos sólidos domiciliares

2.3 Aterros sanitários

2.4 Aterro municipal de Piracicaba “Pau Queimado”

2.5 Mudanças climáticas

2.6 Projetos de uso de gás metano para fins energéticos

2.7 Protocolo de Quioto

2.1 Resíduos sólidos

2.1.1 Definição de resíduos sólidos

A produção de resíduos é tão antiga, quanto o processo de ocupação da terra pelo homem. Acompanha o processo de apropriação e produção do homem em sociedade. Com o avanço tecnológico e o desenvolvimento industrial, as características dos resíduos mudaram, principalmente em relação ao volume produzido e a velocidade de decomposição. Na década de 70, os bens de consumo duráveis eram produzidos para durar de sete a oito anos (por isso eram duráveis). Atualmente, os mesmos produtos são projetados para durarem de oito a dez meses (e ainda são considerados como duráveis), Rodrigues (1998).

“Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS): o lixo é aquilo que seu proprietário não deseja mais, em um certo momento e que não tem valor comercial”.

“Segundo Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo: qualquer material sólido proveniente das atividades diárias do homem em sociedade, cujo produtor ou proprietário não o considera com valor suficiente para ser conservado”.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-NBR 10.004), (1987): resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos ou semi-sólidos, que resultam de atividade da comunidade, e origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Consideram-se também resíduos sólidos os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpo'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviável em face à melhor tecnologia disponível.

2.1.2 Classificação de resíduos sólidos

Os resíduos sólidos podem ser classificados de várias formas, Leite (1997):

- ◇ pela natureza física: seco ou molhado;
- ◇ segundo sua composição química: matéria orgânica e inorgânica;
- ◇ segundo o grau de biodegradabilidade: facilmente, moderadamente, dificilmente e não-degradáveis;
- ◇ segundo sua origem: urbanos, industriais, resíduos de serviço de saúde, resíduos de portos e aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, resíduos agrícolas, entulhos de construção, material radioativo.

Normalmente, os resíduos são classificados segundo sua origem, e de acordo com Schalch et al. (2000), esta classificação é muito útil quando se trata de gerenciamento de resíduos sólidos, dividida em:

- ◇ **urbanos:** incluem resíduo domiciliar, gerado nas residências, resíduo comercial, produzido em escritórios, lojas, hotéis e supermercados e restaurantes e os resíduos de serviços oriundos da limpeza urbana, além dos resíduos de varrição das vias públicas, limpeza de galerias, terrenos, córregos, praias, feiras, podas e capinação.
- ◇ **industriais:** correspondem aos resíduos gerados nos diversos tipos de indústrias de processamentos. E estão agrupados em função de sua periculosidade, segundo a ABNT – NBR 10004 (1987).

A NBR – 10007 (1987), Amostragem de Resíduos – estabelece os critérios de coleta e seleção de uma amostra, que será analisada como representativa de um todo. A partir

desses critérios e ensaios os resíduos sólidos são classificados e podem ser enquadrados em uma das classes seguintes:

resíduos classe I - perigosos

Caso uma amostra seja enquadrada em pelo menos um dos critérios de periculosidade, será o mesmo considerado classe I - perigosos.

resíduos classe II - não- inertes

São aqueles que não se enquadram nas classificações dos resíduos classe I- perigosos ou de classe-III inertes. Podem apresentar propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Estão incluídos nesta categoria os papéis, papelão, matéria vegetal e outros.

resíduos classe III - inertes

São aqueles que, submetidos ao teste de solubilização, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões e potabilidade da água. São rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos facilmente.

◇ **resíduos de serviço de saúde:** são os resíduos produzidos em hospitais, clínicas médicas e veterinárias, laboratórios de análises clínicas, farmácias, centros de saúde, consultórios odontológicos. Estes resíduos podem ser agrupados em dois níveis:

resíduos comuns: correspondem a restos de alimentos, papéis, embalagens de remédios, etc.

resíduos sépticos: constituídos de restos de salas de cirurgia, áreas de isolamentos, centros de hemodiálise, etc. Desta maneira o seu manuseio, acondicionamento, coleta e transporte exige atenção especial devido ao potencial de risco à saúde pública.

◇ **resíduo de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários**: são os resíduos sépticos, que podem conter organismos patogênicos, como por exemplo: materiais de higiene e limpeza pessoal, restos de alimentos e veicular de doenças de outras cidades, estados e países.

◇ **resíduos agrícolas**: correspondem aos resíduos de atividades da agricultura e pecuária, como embalagens de adubos, pesticidas, ração, restos de colheita e esterco animal.

◇ **resíduos de construção civil (entulhos)**: constituem-se de resíduos de construção civil, demolições, restos de obras, solos de escavações, etc.

◇ **resíduos radioativos**: são os resíduos provenientes de combustíveis nucleares ou de alguma outra fonte radioativa, como por exemplo, certos aparelhos hospitalares desativados.

2.1.3 Quantificação e características físicas e químicas de resíduos domiciliares

Os resíduos urbanos (ou domiciliares) são o objeto principal de estudo deste trabalho, dessa forma as informações que seguem são referentes a este tipo de resíduo.

Segundo os autores, Bidone e Povinelli (1999) a quantificação da geração de resíduos sólidos urbanos é baseada em índices relacionados ao número de habitantes atendidos pelo sistema de coleta e ao volume de resíduos gerados, materializando a denominada produção “per capita” de resíduos. Representa, desta maneira, a quantidade

de resíduos sólidos gerados por habitante em um período de tempo específico, geralmente um dia, e é expressa em Kg/hab.dia.

Deve-se considerar a geração de resíduo um processo dinâmico, estando a classificação e o teor de seus componentes sujeitos à variações provocadas por fatores como: crescimento populacional, nível educacional, poder aquisitivo, crescimento industrial, tipo de coleta e outros fatores, Baldochi (1990). Ou seja, a produção de resíduos sólidos é diretamente proporcional à população e a outros fatores como renda média *per capita*, e o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH).

A política nacional de redução de emissão de resíduos e a coleta seletiva pode também influenciar na quantidade média de resíduos gerados por habitante em uma determinada região ou país.

A composição física (composição qualitativa) representa a porcentagem (em peso) dos vários materiais constituintes do lixo. Estes materiais geralmente são constituídos de matéria orgânica, papel, papelão, trapos, couro, plástico (duro e mole), vidro, borracha, metais (ferrosos e não ferrosos), madeira e outros.

A composição química dos resíduos sólidos está relacionada, principalmente a componentes orgânicos destes e engloba principalmente a qualificação de parâmetros, como por exemplo, o carbono, nitrogênio, fósforo e potássio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, ferro, manganês, sódio, enxofre, a relação C/N, o pH e as concentrações de sólidos totais, fixos e voláteis.

Segundo trabalho desenvolvido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo¹ (CETESB) apud Bidone e Povinelli (1999) o valor médio que resultou da quantificação dos resíduos sólidos relativos à cidade de Santo

¹ COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1995). *Resíduos sólidos domésticos: tratamento e disposição final*. São Paulo: CETESB.

André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra, foi de 3,31 L/hab.dia.

A tabela 1 mostra a evolução da composição do lixo na cidade de São Paulo, entre os anos de 1927 a 1995.

Tabela 1 - Evolução da composição do lixo na cidade de São Paulo, entre os anos de 1927 a 1995.

Composição física	SÃO PAULO														
	1927	1957	1965	1969	1971	1972	1975	1976	1979	1980	1989	1990	1991	1993	1995
Matéria orgânica, papel e papelão.	95.9	92.7	92.8	81.4	75.2	73.5	67.4	84.1	67.0	68.0	72.0	77.0	74.5	78.8	78.0
Plástico duro e filme	0.0	0.0	0.0	1.9	2.6	4.3	9.0	5.0	9.0	7.8	7.5	9.0	11.5	12.0	11.2
Metal ferros e não ferroso	1.7	2.2	2.2	7.8	6.9	4.2	6.0	4.0	5.5	3.2	3.3	5.3	3.5	3.2	2.9
Couro, borracha e madeira.	1.5	2.7	0.0	6.2	8.2	6.8	0.8	4.5	3.0	1.5	0.0	0.0	5.2	0.0	2.7
Trapo	0.0	0.0	3.1	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	4.5	3.5
			(b)									(b)		(b)	
Vidros	0.9	1.4	1.5	2.6	3.9	2.1	5.0	1.7	14.6	1.5	1.5	4.2	1.7	1.1	1.7
Outros	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	9.0	9.6	0.7	0.0	2.9	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0

Obs: (a) trapo, couro, borracha (b) trapo, couro (c) trapo, couro, borracha, madeira (d) couro, borracha, madeira, inertes (e) madeira (f) vidro, terra, pedra.

Fonte: Adaptado de Godoi² apud Bidone e Povinelli (1999).

De acordo com Bidone e Povinelli (1999), os aspectos físico-químicos são importantes para definição dos procedimentos a serem adotados para disposição dos resíduos, pois informam sobre o volume, e sobre a umidade, o que possibilita conhecer a capacidade volumétrica dos meios de coleta, transporte e disposição, a quantidade de água contida na massa do lixo, que será importante na definição do poder calorífico dos resíduos, a densidade, e a velocidade de decomposição biológica dos materiais presentes.

² GODOI, M. O (1997). *Origem e destino de resíduos sólidos domiciliares em São Paulo*. São Carlos, 223p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.1997.

2.2 Tecnologias de tratamento de resíduos sólidos domiciliares

Existem várias maneiras de tratamento de resíduos domiciliares, alguns exemplos são mostrados na tabela 2, porém de acordo com Schalch (informação verbal)³, não existe tratamento completo e definitivo, pois sempre existirá um remanescente que não é aproveitado, e que deve ser disposto em aterro sanitário.

Tabela 2 Processos de transformações utilizados no gerenciamento de resíduos sólidos domiciliares

Processo de transformação	Métodos de transformação	Principal conversão em produtos
<i>Físico</i>		
Separação de componentes	Manual ou mecânica	Componentes individuais encontrados nos resíduos domiciliares
Redução de volume	Aplicação de energia em forma de força ou pressão	Redução de volume do Material original
Redução de tamanho	Aplicação de energia para retalhamento ou moagem	Redução de tamanho dos componentes originais
<i>Químico</i>		
Combustão	Oxidação térmica	Dióxido de carbono (CO ₂), dióxido de enxofre (SO ₂), outros produtos de oxidação e cinzas.
Pirólise	Destilação destrutiva	Vários gases, alcatrão e composto de carbono
<i>Biológico</i>		
Compostagem aeróbica	Conversão biológica aeróbia	Composto humidificado usados com condicionador de solos
Digestão anaeróbica	Conversão biológica anaeróbia	Metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂), húmus

Fonte: Adaptado de Tochobanoglous et al. (1993)

³ Informação recebida pelo Prof.Dr.Valdir Schalch em sala de aula, durante a disciplina de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, ministrada em 2001.

Há várias formas de disposição de resíduos sólidos domiciliares que são comumente utilizadas. As disposições são realizadas, na maioria das vezes, em função da disponibilidade da área e da necessidade. Infelizmente no Brasil são poucas as vezes que são usadas formas adequadas.

Seguem algumas destas formas de disposição:

◇ **Lixões**

Os denominados “lixões” ou vazadouros caracterizam-se pela simples descarga de resíduos sólidos. Acarretam vários problemas de saúde, devido à proliferação de moscas, baratas, ratos e outros vetores de transmissão de doenças além de maus odores, poluição do solo e de águas superficiais e subterrâneas, através dos líquidos percolados gerados.

Acrescenta-se ainda a esta situação, o descontrole quanto aos tipos de resíduos recebidos nestes locais, onde é possível encontrar resíduos de origem industriais e resíduos de serviço de saúde. Normalmente associam-se aos lixões fatos como criação de animais (porcos, galinhas, etc) e a existência de catadores, que normalmente moram no local.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, IBGE (2002) 21,2% do lixo coletado no Brasil é disposto em vazadouro à céu aberto (lixões) e 0,1% disposto em vazadouro em áreas alagadas.

◇ **Aterros Controlados**

São formas de disposição que buscam minimizar os impactos ambientais. Confinam-se os resíduos sólidos, cobrindo-os no final de cada dia de trabalho, com uma camada de material inerte, normalmente utilizam-se princípios de engenharia. Em geral, produz poluição mais localizada. Porém, se a superfície de deposição não for

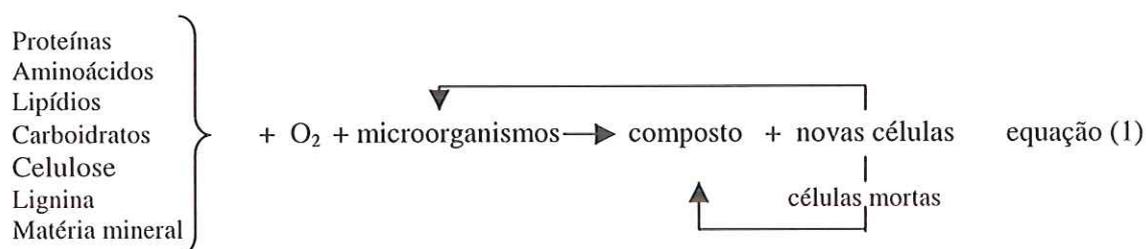
impermeabilizada compromete a qualidade de águas subterrâneas, devido aos líquidos percolados.

Segundo o IBGE (2002) cerca de 13% dos resíduos produzidos no Brasil são dispostos em aterros controlados.

◇ Compostagem

Com exceção de plástico, borracha e componentes de couro, a maior parte da fração orgânica dos resíduos domiciliares é composta de: proteína, aminoácido, lipídio, carboidrato, celulose, lignina e matéria mineral. Quando estes componentes são submetidos à decomposição aeróbica, e também anaeróbia, o produto final da decomposição é a matéria orgânica estabilizada, o húmus, Tchobanoglous et al.(1993).

A equação a seguir, descreve sucintamente este processo:



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous et al.(1993).

O processo mais básico de produção de composto é o da fermentação em leiras, no qual os resíduos após terem sido separados dos materiais recicláveis e serem moídos, para reduzir sua granulometria, são dispostos em leiras ou pilhas, Schalch (1984).

De acordo com Tchobanoglous et al.(1993), os objetivos da compostagem visam transformar o material orgânico biodegradável em material biologicamente estável,

reduzir o volume dos resíduos e também destruir ovos de agentes patogênicos que podem estar presentes na massa de resíduos.

O Composto é acima de tudo, um condicionador do solo, classificado assim pelo fato de sua matéria orgânica humidificada, estar em maior proporção, e que corresponde a cerca de 40 a 70%. No entanto, além do efeito condicionador do solo, o composto é também classificado como um fertilizante de baixa concentração de nutrientes, Schalch (1984).

◇ Pirólise

É definido como um processo térmico de transformação de resíduos com ausência completa de oxigênio. Devido à maioria das substâncias orgânicas serem termicamente instáveis, elas podem aquecer-se em uma atmosfera livre de oxigênio, serem rompida através de uma combinação de *cracking* térmico e sofrer reação de condensação, através de frações sólidas, líquidas e gasosas.

Os componentes resultantes do processo de pirólise são:

fluxo gasoso: contendo hidrogênio, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e outros gases, dependendo das características orgânicas do material a ser pirolisado,

fração líquida: constituída de um fluido de óleo contendo ácido acético, acetona, metanol e hidrocarbonetos. Esta fração líquida pode ser usada como combustível sintético.

carvão: consistindo de carbono puro e material inerte originalmente presente nos resíduos, Tchobanoglous et al. (1993).

◇ Incineração

A purificação com fogo é um conceito antigo. Na Idade Média, usava-se o vagão de fogo, um incinerador móvel, era um vagão retangular de madeira protegido internamente por uma camada de argila. O vagão puxado por cavalos andava pelas ruas

e os moradores jogavam seus rejeitos dentro da fogueira móvel, Hering⁴ apud Dempsey e Oppelt (1996).

Atualmente, a incineração é um processo de engenharia que emprega a decomposição térmica via oxidação térmica à alta temperatura para destruir a fração orgânica dos resíduos e reduzir o volume. Geralmente, resíduos combustíveis ou resíduos com conteúdo significativo de orgânicos são considerados os mais apropriados candidatos à incineração, Dempsey e Oppelt (1996). O processo de incineração pode também ser usado para gerar energia.

Este processo consiste na redução de peso e volume dos resíduos (em até 5% do volume e até 15 % do peso original). Os remanescentes da queima são constituídos de gases, como o dióxido de carbono (CO₂), o dióxido de enxofre (SO₂), o nitrogênio (N₂), o oxigênio (O₂) (provenientes do ar em excesso, que não foi queimado completamente), água, cinzas e escórias de metais ferrosos e inertes, como vidro e pedras, Schalch, et al. (2000).

A queima de materiais é feita (geralmente acima de 900° C) em mistura com uma quantidade apropriada de ar e durante um tempo pré-determinado, Rocha (1989).

Quando a combustão é incompleta, os gases, principalmente o monóxido de carbono (CO) e o material particulado, como partículas e negro de fumo, exercem forte ação poluidora na atmosfera. Portanto, é imprescindível que os incineradores modernos contenham, além da câmara de combustão, equipamentos complementares, como filtros destinados ao tratamento de gases e agregados leves, que são resultantes da combustão dos resíduos, segundo a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB), (1985), em Schalch et al (2000).

⁴ HERING, S.A.(1921).Greelly, *Collection and disposal of municipal refuse*. New York: McGraw Hill

Vantagens da Incineração

- destruição de bactérias ou qualquer outro agente patogênico presente nos resíduos, devido às altas temperaturas de combustão;
- em incineradores bem projetados e bem operados, redução em peso e em volume;
- possibilidade de aproveitamento de energia gerada no processo de combustão.

Desvantagens da Incineração

- elevado custo - cerca de US\$ 20,000 de tonelada/dia custando cerca de 16 a 50 vezes mais que um aterro, Lutzenberger (1992),
- quando são mal operados - efeitos danosos são causados ao meio ambiente e ao homem pela liberação na atmosfera de gases tóxicos como dioxinas e furanos, Nilsson (1992).
- escórias e cinzas geradas - 10 a 30% do total do peso ou do volume dos resíduos, que são altamente tóxicas e até mais perigosas do que todo o grande volume inicial, Gore (1993).

◇ **Reciclagem/ Coleta seletiva**

Um dos caminhos para a reciclagem é a coleta seletiva, que consiste na separação de papéis, plásticos, metais e vidros na fonte geradora, sendo estes materiais posteriormente classificados por categoria e encaminhados às empresas de reciclagem, Amazonas⁵ apud Castro (2001).

A coleta seletiva pode ser realizada em domicílios, por veículo de carroceria adaptada, com frequência semanal, ou através de Posto de Entrega Voluntária (PEVs),

⁵ AMAZONAS, M. (1992). Compostagem do lixo urbano, projeto e reciclagem. *Revista São Paulo*, São Paulo, v.1, n.2, p. 20-23.

mediante a instalação de caçambas e contêineres de cores diferenciadas. Segundo Castro (2001), a educação ambiental é a chave fundamental para o sucesso de programas de reciclagem, por propiciar a aprendizagem do cidadão sobre o seu papel como gerador de resíduos.

Um dos princípios básicos de educação ambiental sobre os resíduos é o conceito dos três “Rs”: reduzir, reutilizar e reciclar.

reduzir: estimular o cidadão a reduzir a quantidade de resíduos que gera, através do reordenamento dos materiais utilizados em seu cotidiano, combatendo o desperdício que resulta em ônus para o poder público e para o contribuinte, além de favorecer a preservação dos recursos naturais.

reutilizar: reaproveitar os mesmos objetos, ou seja, usar embalagens retornáveis e reaproveitar embalagens descartáveis para outros fins, e outras práticas semelhantes à essas.

reciclar: contribuir com programas de coleta seletiva, separando e entregando os materiais recicláveis, quando não for possível reduzir ou reciclá-los.

Castro (2001) observa que aproximadamente 30% dos resíduos domiciliares são materiais passíveis de reciclagem. E coloca que o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE) , avaliando o desempenho de programas de coleta seletiva de oito cidades (Curitiba, Florianópolis, Porto Alegre, Salvador, Santo André, Santos, São José dos Campos e São Paulo) entre 1992 e 1994 concluiu que apenas 4,6 % do total dos resíduos foram coletados pelos programas, alcançando na melhor localidade sucedida um índice de apenas 10,7%. Ou seja, um índice ainda considerado muito baixo.

A tabela 3 mostra a composição média de coleta seletiva.

Tabela 3 - Composição média de coleta seletiva

Material	% em composição
Papel/ papelão	39
Caixinha Tetra Pak	2
Rejeito	8
Plástico filme	7
Plásticos rígidos	12
Vidro	15
Alumínio	1
Metais ferrosos	16

Fonte: Adaptado de JARDIM (1995)

Vantagens da coleta seletiva

- boa qualidade dos materiais recuperados, pois os mesmos não ficam misturados à massa de resíduos, onde há presença de matéria orgânica;
- redução de volume de resíduos dispostos em aterros sanitários, prolongando sua vida útil;
- maior flexibilidade, pois pode ser feita em pequena escala e ampliada gradativamente em função do grau de comprometimento das pessoas;
- possibilidade de parcerias entre escolas, empresas, catadores e sucateiros.

Desvantagens da coleta seletiva

- elevado custo de coleta e transporte, pois necessita de veículos especiais;
- necessidade de um centro de triagem, onde os recicláveis são separados por tipo, mesmo após a segregação na fonte.

2.3 Aterros Sanitários

Segundo a ABNT – NBR 8419 - (1984), 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 a 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 em intervalos menores se for necessário.

Cerca de 36% dos resíduos produzidos no Brasil são depositados em aterros, segundo Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, IBGE (2002).

É comum as pessoas associarem aterros sanitários a “lixões à céu aberto”, portanto é importante salientar que as duas práticas são completamente diferentes.

Segundo Schalch et al. (2000) o aterro sanitário é a única técnica de disposição final de resíduos sólidos.

Considerando-se a resolução CONAMA (nº 001, de 23/01/1986), mesmo que bem planejado e operado, o aterro sanitário causa um impacto negativo ao meio ambiente, e por esse motivo, para sua implementação é necessário apresentar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).

A aplicação desta técnica é difundida em quase todo o mundo, por ser a solução mais economicamente viável, quando comparada com outros processos (incineração, por exemplo). De acordo com Leite (1997), embora em alguns casos a compostagem e a incineração tornem-se viáveis economicamente, como é o caso das grandes cidades, é preciso levar em consideração que tais métodos não descartam a existência de um aterro sanitário em suas proximidades, pois processos produzem resíduos, além de existir a possibilidade de imprevistos nas instalações, que podem impossibilitar a operação das mesmas.

Este processo de tratamento será abordado mais profundamente a seguir, uma vez que o aterro sanitário é parte importante deste trabalho.

O aterro sanitário é um aprimoramento de uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para descarte de seus resíduos, que é o aterramento. Conforme escrito anteriormente, é uma obra de engenharia que tem como objetivo dispor no solo, resíduos no menor espaço prático possível, sem causar danos ao ambiente ou à saúde pública.

O método de aterramento apresenta vantagens e desvantagens, CETESB (1987):

Vantagens:

- custo de investimento muito menor que o requerido em outras formas de tratamento de resíduos;
- método completo, pois não apresenta rejeitos ou refugos que necessitam ser tratados em outras instalações;
- simplicidade operacional;
- flexibilidade operacional, sendo capaz de operar quando há flutuações na quantidade de resíduos a serem aterradas.

Desvantagens:

- não trata os resíduos, consiste em uma forma de armazenamento no solo;
- requer áreas cada vez maiores;
- a operação sofre ação das condições climáticas;
- apresenta risco de contaminação do solo e da água subterrânea, quando mal operados.

2.3.1 Tipos de aterros sanitários:

◇ **Acima do nível original do terreno (método da área ou aterro tipo superficial):**

São os mais popularizados, conhecidos também como aterro do tipo “convencional”. Consiste na formação de camadas de resíduos compactadas, que resultam em configurações típicas de “escadas” ou de tronco de “pirâmide”, CETESB (1987).

Esta técnica de execução de aterro é utilizada quando a topografia local permite o recebimento/confinamento de resíduos sólidos, sem alterar a configuração natural, Bidone e Povinelli (1999).

Construídos em terrenos acidentados

O terreno apresenta topografia acidentada, os resíduos são descarregados junto à base de um desnível já existente, e posteriormente compactados. A compactação é realizada com um trator de esteiras, empurrando-se os resíduos de encontro junto a esse desnível natural, em movimentos ascendentes, formando uma rampa com taludes de inclinação aproximada de 1(V):3(H). Para uma melhor compactação, os resíduos devem ser espalhados por esta rampa, formando camadas de aproximadamente 0,4 metro de espessura, onde o trator de esteiras deve passar de 3 a 5 vezes. Deve-se fazer uma cobertura de aproximadamente 0,30 – 0,50 metros de espessura. A cobertura pode ser aplicada da mesma maneira utilizadas na compactação dos resíduos, depositando-se na base do talude da célula e, em seguida, espalhada e compactada sobre os resíduos com o trator de esteiras, CETESB (1987).

A cobertura tem a finalidade de dificultar a entrada de água de chuva que é precipitada sobre o aterro, diminuir a proliferação de vetores, como ratos, pássaros e moscas, e impedir que materiais leves se espalhem.

O material de cobertura pode ser adquirido na própria área do aterro. As células construídas variam entre 2 e 6 metros de altura, e não há uma medida padrão. Deve-se realizar cálculos para cada situação a ser estudada.

Construídos em terrenos planos

Devem ser criados desníveis com os próprios resíduos. Os resíduos são descarregados em um ponto estratégico do terreno, amontoados e compactados formando uma elevação de formato de um tronco de pirâmide, que é posteriormente coberta com terra.

Depois da cobertura tem-se a formação de uma célula - mãe, a célula inicial que servirá como base para a construção das demais.



Fonte: Bidone e Povinelli (1999).

Figura 1 Célula de aterro sanitário tronco-piramidada.

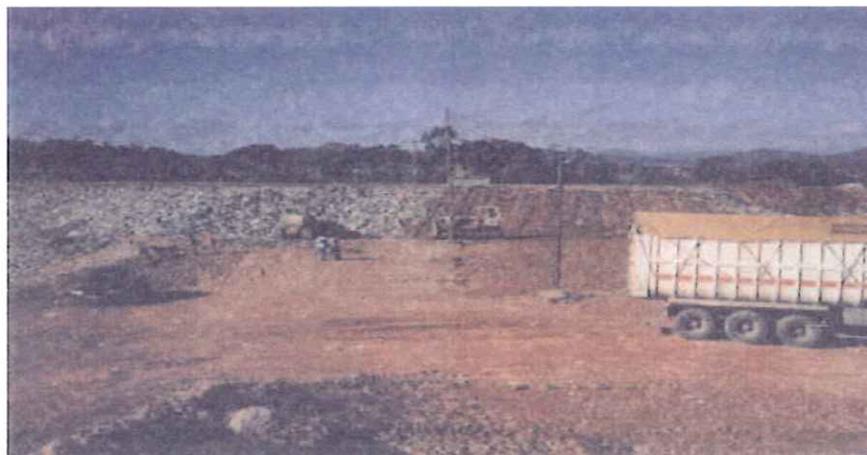
◇ **Abaixo do nível inicial do terreno:**

Os aterros sanitários podem ser construídos abaixo do nível original do terreno, aproveitando as escavações já existentes ou preenchendo valas especialmente escavadas para o recebimento dos resíduos, CETESB (1987).

Escavações já existentes (método da escavação progressiva ou método da encosta)

É viável a construção de um aterro sanitário em áreas degradadas por exploração de jazidas de minérios e minerais ou escavações irregulares das ditas “áreas de empréstimo”, entretanto este aterramento é uma tarefa delicada e difícil em função da maior facilidade de contaminação de mananciais subterrâneos. As cavas que não apresentam elementos de risco e tendo sido comprovada a viabilidade de utilização, a área deve ser previamente preparada. A área preparada é operada da mesma maneira dos terrenos acidentados. Em um ponto previsto em projeto, os resíduos são descarregados e compactados em células, em seguida, os resíduos são cobertos com terras. As células vão sendo justapostas, formando camadas de resíduos sólidos, que tendem devolver ao terreno a topografia que possuía antes das escavações, CETESB (1987).

A figura 2 mostra resíduos sólidos compactados contra uma encosta, em uma das laterais de escavação. Neste caso, a pista de circulação entre a encosta e o resíduo serve de elemento adicional de impermeabilização da encosta, Bidone e Povinelli (1999).



Fonte: Bidone e Povinelli (1999).

Figura 2: Execução de uma célula de aterro sanitário, aproveitando-se a encosta como elemento de contenção.

Escavações não existentes (método da trincheira)

Neste caso as escavações das valas são projetadas especialmente para o aterramento de resíduos.

- *trincheiras de grandes dimensões*: são escavações especiais, com grande capacidade de recepção de resíduos, são operadas como um aterro convencional. Os resíduos são descarregados no interior da trincheira, junto à base do talude de uma das extremidades, e em seguida, são compactados por um trator de esteiras, que os empurra de encontro a esse talude, em movimentos de baixo para cima, formando células. Do mesmo modo dos aterros descritos anteriormente, os resíduos são cobertos por uma camada de solo. Para cobertura, em geral é utilizado o material resultante da escavação da própria trincheira, CESTESB (1987).

Atingida a altura máxima das células, inclusive com a sobreposição de camadas, essas são “seladas”, com solo, com uma cobertura de 60 cm a 1,0 de espessura, Bidone e Povinelli (1999).



Aterro municipal da cidade de Brotas/SP
Figura 3 Abertura de trincheira de grande dimensão.

- *trincheira de pequenas dimensões*: consiste no preenchimento de valas escavadas com dimensões apropriadas, onde os resíduos são dispostos sem compactação. Esta técnica não é recomendada para comunidades com produção de lixo superior a 10 toneladas por dia, pelo fato de os resíduos não serem compactados, o que impede uma utilização integral da área. Os terrenos com lençol freático aflorante ou muito próximos da superfície são impróprios para construção deste tipo de aterro, pois pode haver contaminação do aquífero. Terrenos rochosos também não são indicados, devido à dificuldade de escavação, CETESB (1987); Bidone e Povinelli (1999).



Fonte: Bidone e Povinelli (1999).
Figura 4 Escavação de trincheira de pequena dimensão

2.3.2 Cálculo das dimensões das células, segundo CETESB, (1987).

É importante dimensionar as células de resíduos, tanto pelo aspecto operacional, quanto pelo aspecto econômico, relacionados com o consumo de terra de cobertura. Operacionalmente o cálculo da célula padrão é importante, pois confere proporcionalidade ao aterro. Alturas excessivas das células dificultam a subida do trator, pela rampa formada, dificultando a compactação dos resíduos. E por outro lado, se não houver resíduo suficiente, para configurar uma célula com altura muito grande, poderá resultar em desvirtuamento da obra.

As dimensões da célula de resíduos devem ser calculadas através das seguintes fórmulas:

$$V = b \cdot l \cdot h = b^2 \cdot h \cdot e$$

$$A = b^2 + 2b \cdot h \cdot p$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{V}{p^2}}$$

$$l = b = \sqrt{\frac{V}{h}} = \sqrt[3]{p \cdot V}$$

Onde:

V = volume da célula de resíduos a ser compactada (m^3)

b = frente de operação (m)

l = profundidade da célula (m)

h = altura da célula (m)

A = Área a ser coberta com terra (m^2)

p = talude da rampa de trabalho ($p = 3$)

O volume de lixo é obtido dividindo-se seu peso específico pelo aparente (γ).

Sendo assim:

$$V = \frac{P}{\gamma}$$

Onde:

V = volume do lixo compactado (m^3 /dia)

P = peso de lixo gerado (t/dia)

γ = peso específico aparente

Nota: quanto ao peso específico aparente do lixo compactado, normalmente adota-se o valor de $\gamma = 0,7 \text{ t/m}^3$, embora com tratores de esteiras com ideal compactação, é possível obter o valor de $\gamma = 0,9 \text{ t/m}^3$.

A altura obtida neste cálculo, também determina a altura das camadas do aterro. Adota-se um valor médio das alturas das camadas de resíduos que é utilizado durante toda vida do aterro, por questões de praticidade de estética.

2.3.3 Sistemas de drenagem

◇ sistema de drenagem de líquidos percolados

Os drenos são constituídos por linhas de canaletas escavadas diretamente no solo, ou sobre a camada de aterro impermeabilizante, e preenchidas com pedras britadas. Essas linhas de drenagem assumem um formato de leque ou espinha de peixe, com um ponto de convergência na menor cota da base do aterro.

Os drenos de líquidos percolados situam-se na região mais crítica do aterro, ou seja, na base. Sofrem a ação de toda a carga de resíduos aterrados, estando sujeitos a rompimentos e inversões de declividade. Por isso, é recomendável que na construção destes drenos sejam adotados valores de declividade $i > 2\%$ e de seção transversal em torno de $0,40 \times 0,40 \text{ m}$. Para o dimensionamento dessa estrutura é necessário o conhecimento da vazão a ser drenada e das características gerais dos sistemas, CETESB (1987).

A drenagem é efetuada através de uma estrutura drenante subsuperficial, constituída por um tubo de concreto perfurado, envolvido por uma camisa de pedra britada, ou por um dreno de pedra britada. Esse dreno deve ser aberto com uma retroescavadeira e direcionado para fora da área aterrada. Depois de aberto o dreno

horizontal é preenchido com brita, sobre as pedras deve ser colocado um material que facilite a percolação de líquidos, e que retenha suspensões que possam vir a colmatar o dreno. Podem ser usados materiais sintéticos como o bidim. Neste caso, deve-se envolver todo leito de pedra britada. Após a abertura da vala, recobre-se a escavação com uma manta geotêxtil, assenta-se o tubo perfurado e preenche os vazios com pedra britada, em seguida, deve ser feita a dobradura da manta excedente de maneira a cobrir a superfície superior do dreno, Bidone e Povonelli (1999).

◇ sistemas de drenagem dos gases

Os drenos dos aterros são constituídos por linhas de tubos perfurados, sobrepostos e envoltos por uma camisa de britas, atravessando verticalmente a massa de resíduos aterrada, desde a base até a superfície superior. O diâmetro dos tubos varia de 0,40m até 1,00 metro, dependendo da altura do aterro. Ao redor dos tubos é colocada uma camada de pedras britadas, formando uma camisa de espessura igual ao diâmetro do tubo utilizado. São colocados queimadores especiais na terminação dos drenos dos gases, que possibilitam a queima dos gases a uma altura segura, CETESB (1987).

Segundo Qin et al. (2001) o gás gerado no aterro sanitário pode migrar pelo solo, caso o aterro sanitário não possua barreira para contê-los. De acordo com Tchobanoglous (1993), tanto o metano como o dióxido de carbono, podem ser encontrados por distâncias de até 120 m da base do aterro sem barreiras para contenção, e em concentrações acima de 40%.

◇ sistema de drenagem de águas pluviais

As águas precipitadas nas imediações dos aterros sanitários devem ser captadas e desviadas por canaletas escavadas no terreno. Dependendo do tamanho da área do aterro sanitário, várias canaletas devem ser escavadas de maneira que a vazão seja diminuída.

As águas de chuva precipitadas sobre a área aterrada infiltram-se gerando líquidos percolados ou escoam sobre os taludes, transportando material de cobertura e expondo os resíduos. No topo do talude da camada final e na base dos taludes das demais camadas, devem ser construídas linhas de drenagem para captação das águas que escoam superficialmente. Essas linhas são construídas como canaletas revestidas com meias cana de concreto, que captam e conduzem essas águas para fora do aterro através das laterais ou pelas camadas inferiores.

◇ Impermeabilização do solo

Para impermeabilização do terreno a ser utilizado para construção de aterro sanitário, podem ser colocadas camadas de solos argilosos ou membranas sintéticas (geomembranas). O material deve apresentar estanqueidade, resistência mecânica e química às eventuais agressividades dos materiais aterrados. Atualmente, há uma tendência para recomendação do uso de mantas de polietileno de alta densidade (PEAD), espessura em torno de 2,0 milímetros, CETESB (1987).

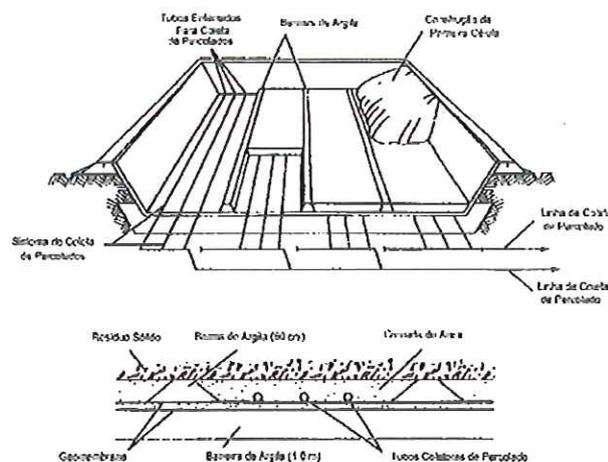


Figura 5 Início de operação de um aterro sanitário e alguns elementos construtivos
Fonte: Tchobanoglous et al.(1993).

2.3.4 Sistemas de tratamento de líquidos percolados:

O chorume é um líquido escuro, derivado da hidrólise dos compostos orgânicos e da umidade de todo sistema. Suas características variam em função do tipo e resíduo aterrado, da idade do aterro, das condições meteorológicas, geológicas e hidrológicas do local. Em geral, possui elevada carga orgânica fontes de nitrogênio, metais pesados e vários grupos microbianos, Schalch (1992).

Outra definição de chorume dada por Schalch (1984): o chorume é formado por digestão de matéria orgânica sólida, por ação de exo-enzimas produzidas pelas bactérias. A função dessas enzimas é solubilizar matéria orgânica, para que possa ser assimilada pelas células bacterianas. As águas de chuva, que caem sobre o aterro, bem como as nascentes, percolam através da massa de resíduos e carregam o chorume e a matéria orgânica, dando origem ao percolado, que pode causar sérios problemas ambientais. A alta carga orgânica, e a complexa composição deste líquido podem comprometer a qualidade da água (superficial ou subterrânea, por infiltração).

É tarefa difícil estimar o volume de líquido percolado que é produzido em um aterro sanitário. Clareto (1996), em seu trabalho obteve dados coletados em 15 locais, e mostrou que uma média de 4 a 7 m³/ha.dia foi gerado em aterros com menos de 12 anos de vida.

Tipos de tratamento de líquidos percolados:

◇ Recirculação

A recirculação foi adotada no início da década de 80 como solução para o tratamento de líquidos percolados. Esta consiste na drenagem e captação dos líquidos em um poço de acumulação, sendo em seguida, devolvido ao aterro. Uma alternativa

para esta operação é a utilização de um caminhão, dotado de um equipamento tipo limpa-fossas, que aspira o líquido do poço de acumulação e os distribui pelos drenos dos gases. É importante salientar que a recirculação só é válida para as regiões onde a taxa de evaporação é superior ao índice de precipitação pluviométrica. Se o volume de água precipitada for muito superior ao perdido por evaporação, haverá um aumento sempre crescente no volume dos líquidos a serem recirculados, inviabilizando o processo. Além da recirculação do chorume evitar que ele acabe proporcionando perigos ambientais de poluição do lençol freático ou cursos d'água, também faz com que a água e os nutrientes que o compõe, não se percam e, ao retornarem a massa de resíduos atuem como catalisados do processo biológico, Schalch (1984).

Em 1989, Barlaz et al., fez um estudo comparativo entre populações microbianas em ensaios com resíduos sólidos com produção de metano, incubados com e sem reciclagem de chorume. A metanogênese dos resíduos foi estimulada pela reciclagem do chorume seguido de neutralização, mas pouca diferença no total de população de bactérias anaeróbias foi evidenciada. Os estudos concluíram que o reciclo do chorume pode ser utilizado para acelerar a decomposição do resíduo sólido, pelo menos em pequena escala, sem a alteração da composição microbiana do ecossistema.

◇ Evaporação

Uma outra alternativa tecnológica para solucionar o problema de tratamento de líquidos percolados é a redução de seu volume pela evaporação de uma parcela de água, possibilitando a concentração e a disposição da "lama" resultante no próprio aterro sanitário. O equipamento pode ser transportado de um aterro para outro, com a redução do chorume mesmo após longo período de desativação. Os processos de evaporação de água contida nos líquidos percolados podem reduzir o volume inicial para menos de 5%.

Nestes processos, pode-se utilizar o próprio gás gerado na decomposição dos resíduos aterrados como fonte de calor, Purchwitz⁶ apud Castro (2001).

De acordo com Castro (2001), algumas vantagens apresentadas pelos fabricantes deste tipo de equipamento são: temperatura de evaporação em torno de 85°C, não volatilizando metais pesados, possibilidade de utilização dos gases gerados no próprio aterro, baixo custo operacional e fácil operação.

Lima (1988), apresentou o resultado de um tratamento físico-químico de chorume, operado em escala piloto. O tratamento apresentado consistia na equalização, sedimentação de amônia. De maneira geral o trabalho apresentou-se de forma satisfatória com grande remoção de poluentes (inclusive de metais pesados como, mercúrio, zinco, ferro, cádmio e chumbo).

Wong e Leung⁷ apud Antonialli (2002) estudaram os efeitos do chorume na irrigação de árvores e espécies vegetais utilizando diferentes diluições (5;10;20 e 40%). De acordo com os resultados obtidos neste estudo, o chorume pode ser reciclado utilizando-o para irrigação, desde que sob diluição adequada. A reciclagem do chorume para área de paisagismo de aterro selado demonstra-se como alternativa atraente, segundo os autores.

2.3.5 Digestão de resíduos sólidos em aterros sanitários

No Brasil, os resíduos sólidos de origem doméstica possuem uma fração considerável de matéria orgânica, citando um exemplo da cidade de São Carlos, interior

⁶ PURSCHWITZ, D.E. (1999). Five ways to treat you leachate. *Waste Age*. v.30, n.10, p.68-99, out.

⁷ WONG e LEUNG (1989). Landfill leachate as irrigation water for tree end vegetable crops. *Water Management & Reasearch*, v.7, p.311-324.

do estado de São Paulo, com 60% de composição orgânica variada e 20% de matéria celulósica de papel Gomes (1989).

Gomes (1989), em seu trabalho, mediu a quantidade de celulose apresentada em aterros experimentais, da cidade de São Carlos, que recebiam especificamente resíduos urbanos, e foi encontrado 56% de celulose.

Barlaz⁸ et al. apud Gomes (1995) indicam que a composição típica dos aterros sanitários municipais é 40% a 50% celulose, 10% a 15% lignina, 12% hemicelulose e 4% proteínas. Sendo assim, a celulose constitui uma das parcelas mais importantes no tratamento dos resíduos sólidos.

A celulose é um polímero composto por várias moléculas de glicose ligadas entre si em duas diferentes posições dos carbonos que a constituem, ligadas por pontes de hidrogênio. A oxidação completa da glicose na natureza, através dos metabolismos aeróbio e anaeróbio, resulta basicamente na liberação de gases para o ambiente.

A degradação da celulose ocorre principalmente pela ação enzimática microbiana. Os microorganismos celulolíticos são capazes de degradar a molécula da celulose e as associações com as moléculas de hemicelulose, lignina e outras em menor grau de importância, de acordo com a capacidade de suas enzimas. As condições metabólicas são determinadas de acordo com as características das várias espécies fúngicas e bacterianas celulolíticas, aeróbias e anaeróbias que podem crescer sob condições extremas de temperatura e pH, Ljungdahl e Eriksson⁹ apud Gomes (1995).

⁸ BARLAZ, M.A. (1989). *Bacterial populations development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill*. Appl. Environ. Microbiol. p.55-65.

⁹ LUNGDAHL, L.G. ; ERIKSSON, K.E. *Ecologic of microbial cellulose degradation*. Adv. Microb. Ecol. p.237-299.

Os primeiros trabalhos visando o conhecimento de como ocorre a degradação da celulose em sistemas anaeróbios foram feitos a partir de estudos com celulose pura como substrato, e com microorganismos isolados de locais de ocorrência da digestão anaeróbia da celulose, como por exemplo, o rúmen, Gomes (1995).

Para Temmes e Mettala¹⁰ apud Gomes (1995), o que difere no processo de digestão anaeróbia que ocorre no rúmen do processo da biodigestão anaeróbia que ocorre com os resíduos orgânicos gerados pelo homem, são as vias precursoras da formação do gás metano. No rúmen, o metano é quase exclusivamente produzido pela redução do dióxido de carbono com o hidrogênio a partir da atividade de bactérias metanogênicas hidrogenotróficas. Já nos processos de tratamento anaeróbio de resíduos, o principal precursor do metano é o acetato. Aproximadamente 70% do metano formado provém das atividades de bactérias metanogênicas acetotróficas e apenas o restante é representado por sistemas microbianos equivalentes ao do rúmen.

Tchobanoglous et al. (1993), diz que o aterro sanitário pode ser definido como um reator bioquímico, sendo os resíduos sólidos e água os principais *inputs* e os gases e líquidos produzidos como os principais *outputs*.

A compreensão dos processos microbianos aeróbios e anaeróbios que ocorrem nos aterros sanitários é de grande importância tanto para auxiliar no controle da produção de enzimas, de ácidos orgânicos e de íons inorgânicos, como para potencializar a exploração dos aterros como biodigestores.

O tempo do processo de decomposição é muito discutido devido às diferenças das características dos resíduos, e às variabilidades das condições meteorológicas de cada região. Por isso, modelos matemáticos utilizados em outros países não podem simplesmente ser adotados. Existem características na composição dos resíduos e nas condições ambientais que têm que ser levadas em consideração.

¹⁰ TEMMES, A.; METTALA, A. (1985). *Degradation of cellulose to methane by different bacterial associations*. University of Helsinki, p.55-63.

◇ Decomposição aeróbia

O processo de decomposição biológica aeróbia ocorre por um curto período, logo que os resíduos são depositados no aterro sanitário. Durante a decomposição aeróbia o dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás produzido.

Metabolismo Aeróbio:



◇ Decomposição anaeróbia

Depois que todo O₂ (oxigênio) é consumido, a decomposição torna-se anaeróbia e a matéria orgânica é convertida a CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), pequena quantidade de amônia e sulfeto, Tchobanoglous et al. (1993).

Metabolismo Anaeróbio Metanogênico:



Estima-se que a digestão anaeróbia seja responsável pela mineração de 5 a 10% de toda matéria orgânica disponível na terra, Chernicharo (1997).

Segundo Chernicharo (1997), a digestão anaeróbia pode ser comparada a um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, e outras células bacterianas. Para o autor, esta digestão é considerada um processo de dois estágios.

No primeiro estágio, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias denominadas formadoras de ácidos ou fermentativas, convertem os orgânicos complexos (carboidratos, proteínas, e lipídeos) em outros compostos mais simples (principalmente ácidos voláteis).

No segundo estágio, ocorre a conversão dos ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos, o metano e o gás carbônico.

Os principais microorganismos empregados no processo anaeróbio, comentado por Malina (1992), são as bactérias. A capacidade de uma bactéria anaeróbia de decompor um determinado substrato é específica, dependendo principalmente das enzimas que possui (as enzimas, responsáveis pelas reações do processo de decomposição, apresentam um alto grau de especificidade).

Na literatura, as bactérias do processo anaeróbio são apresentadas em grupos relativos aos substratos a que têm afinidades às reações que realizam ou aos produtos que formam (por exemplo: hidrolíticas, que hidrolisam substratos complexos, acidogênicas que produzem ácidos, metanogênicas acetofílicas que produzem metano a partir de ácido acético)

Hidrólise Enzimática: esta primeira fase do processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros), em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores). Como as bactérias não são capazes de assimilar matéria orgânica particulada, esta conversão é conseguida através de ação de enzimas excretadas pelas *bactérias hidrolíticas fermentativas*.

Acidogênese: os produtos solúveis, produtos da fase de hidrólise, são metabolizados no interior das células fermentativas sendo convertidos em diversos produtos mais simples os quais são excretados pelas células. Os produtos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e outras células bacterianas. Como os ácidos voláteis são o principal produto dos

organismos fermentativos, estes são designados como *bactérias fermentativas acidogênicas*.

Acetogênese: Nesta fase, ocorre a oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substratos apropriados para as *bactérias metanogênicas*. Os produtos gerados pelas *bactérias acetogênicas* são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato. De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acetogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados pelas *bactérias metanogênicas*.

Algumas reações da etapa de acetogênese são apresentadas na tabela 4. As reações (4.b) a (4.e) representam reações que produzem gás hidrogênio, enquanto na reação (4.f) ocorre o seu consumo. O controle da concentração deste gás, através do equilíbrio entre as espécies que consomem e produzem é fundamental quanto à termodinâmica do processo anaeróbio, para que haja energia disponível às reações.

Tabela 4- Reações acetogênicas

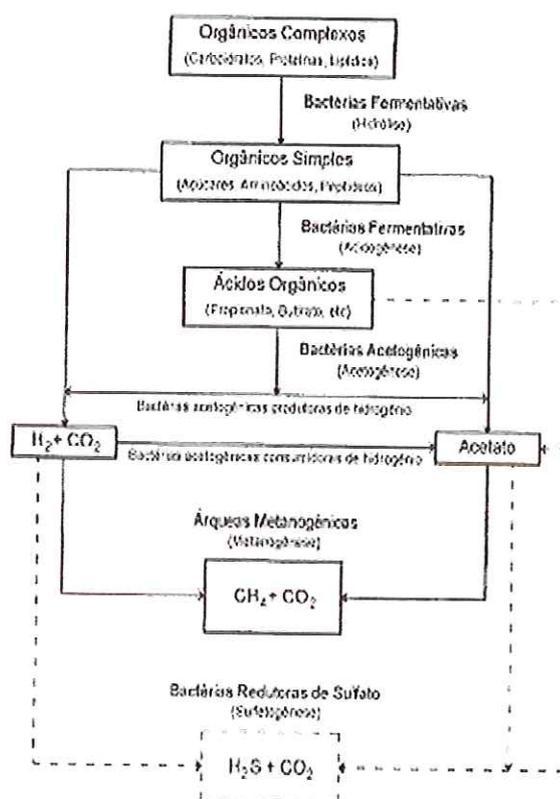
Reação	
etanol + H ₂ O = acetato ⁻ + 2H ₂ + H ⁺	(2.b)
butirato ⁻ + 2H ₂ O = 2 acetato ⁻ + 2H ₂ + H ⁺	(2.c)
propionato ⁻ + 3 H ₂ O = acetato + HCO ₃ ⁻ + 3H ₂ + H ⁺	(2.d)
etanol + 2 HCO ₃ ⁻ + H ₂ O = acetato + formiato ⁻ + 2H ₂ O + H ⁺	(2.e)
H ₂ + 2CO ₂ = acetato ⁻ + H ₂ O + H ⁺	

Fonte: Adaptado de Soubes (1994)

Metanogênese: a etapa final do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono (CO₂) é efetuada pelas *bactérias metanogênicas*. Essas utilizam somente um número limitado de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol,

metilaminas e monóxido de carbono. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as *bactérias* metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol (*metanogênicas acetoclásticas*) e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (*metanogênicas hidrogenotróficas*). Embora poucas espécies de metanogênicas sejam capazes de formar metano a partir do acetato, estas são normalmente os microorganismos predominantes na digestão anaeróbia e são responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano.

Caso o substrato contenha sulfatos ou compostos de enxofre ocorrerá a sulfetogênese. A produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfetos, através da ação de um grupo de bactérias estritas, denominadas *bactérias redutoras de sulfato* (ou *bactérias sulforedutoras*).



Seqüências metabólicas da digestão anaeróbia (com redução de sulfato [---])
Fonte: CHERNICHARO, (1997).

Figura 6 – seqüências metabólicas da digestão anaeróbia

As possíveis rotas de para redução de sulfatos são apresentadas na figura 6 pelas linhas tracejadas. Na ausência de sulfato, o processo de digestão anaeróbia ocorre de acordo com as seqüências metabólicas representadas por linhas contínuas (figura 6).

Tchobanoglous et al. (1993) divide a decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários em cinco fases, que são descritas, a seguir:

Fase I – Ajustamento: ocorre logo após que a massa de resíduos é depositada. A decomposição biológica ocorre sob condições aeróbias, pois ainda existe uma certa quantidade de oxigênio no aterro. Os microorganismos aeróbios e anaeróbios utilizam também recursos do material de cobertura depositados diariamente, de lodo de estação de tratamento de esgotos que eventualmente seja depositado no aterro, e de chorume, quando é realizada a recirculação sobre a massa de resíduos.

Fase II – Transição: o oxigênio é esgotado, iniciando-se condições anaeróbias no aterro. O nitrato e o sulfato passam a ser os aceptores primários de elétrons. O potencial de oxi-redução diminui. Inicia-se pela comunidade microbiana, o processo de conversão de material orgânico complexo (polímeros) para ácidos orgânicos (de cadeias curtas) e outros produtos intermediários à produção de dióxido de carbono e metano. Nessa fase, o pH do percolato formado, começa a cair devido à presença de ácidos orgânicos e da elevada concentração de CO₂.

Fase III – Ácida: a atividade microbiana iniciada na Fase II (conversão de aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono) é acelerada, com produção significativa de ácidos orgânicos e aumento na quantidade de hidrogênio.

Os microorganismos envolvidos nesta fase de conversão são descritos como não-metanogênicos e consistem em bactérias facultativas ou bactérias anaeróbias obrigatórias. São definidos como acidogênicos ou formadores de ácido. Nesta fase, o pH do percolato cai para 5, devido à presença de ácidos orgânicos e da elevada concentração de CO₂ dentro do aterro. A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a condutividade do percolato aumentam,

devido à dissolução de ácidos orgânicos no percolado. Em função de o pH estar baixo, um grande número de componentes inorgânicos (principalmente metais pesados) são solubilizados.

Fase IV – Fermentação Metânica: os microorganismos responsáveis por esta conversão são estritamente anaeróbios e são chamados de metanogênicos. São identificados na literatura como metanogênicos ou formadores de metano. Nessa fase, o pH dentro do aterro irá elevar-se para valores mais neutros (entre 6,8 e 8,0). O pH do líquido percolado irá subir também, e as concentrações de DQO e DBO e os valores de condutividade irão diminuir. Com o aumento do pH, poucos metais permanecem solúveis, e como consequência, a concentração de metais pesados também diminui.

Fase V – Maturação: ocorre depois que todo material orgânico biodegradável é convertido a CO_2 e CH_4 . A geração de gás diminui significativamente nessa fase. Os principais gases que envolvem essa fase são o CO_2 e o CH_4 . Dependendo do aterro uma pequena quantidade de óxido de nitrogênio também pode ser encontrada.

Estudos realizados na Alemanha por Kabbe¹¹ et al apud Silva (2001), relatam que em um projeto desenvolvido para investigar o comportamento das emissões de aterros foram estudados, em uma primeira fase, três locais que mostraram grande dispersão na taxa de degradação da matéria orgânica. A partir de valores iniciais na deposição de 200 a 300 gramas de matéria orgânica por um quilograma de resíduo (considerando apenas a porção sólida menor que 20 mm), estes valores caem, após 10 anos, para valores na faixa de 50 a 150 gramas de matéria orgânica por quilograma de resíduos, mostrando grande variabilidade e possibilidade de baixas taxas de degradação. Segundos os autores os estudos continuariam com aterros fechados entre 20 e 50 anos.

¹¹ KABBE, G. (1985). Assessing The Long-Term Behaviour of Landfills for a Integrated Land Management. In: CONTAMINATED SOIL'95, Maastrich, *Proceeding...* The Research Center Karlsruhe (FZK) and Netherlands Organization for Applied Scientific Research- TNO. 1995. v2.p.1620-1621.

2.3.6 Produção de metano e estabilização da matéria orgânica

Pohland e Harper apud Baldoch (1990) relacionaram a taxa de variação de diferentes parâmetros do percolado e do gás produzido, com as fases de estabilização e o seu significado com dados obtidos na literatura.

A atuação das bactérias nas reações anaeróbias depende das condições do meio em que se encontram. Para cada fator, como composição do meio (substrato, nutrientes, grupos de bactérias presentes), temperatura, pH, etc, existem faixas consideradas ótimas para seu desenvolvimento e outras que podem até ser prejudiciais, causando efeitos inibitórios ou tóxicos:

◇ **ambiente anaeróbio:** para que haja a produção de gás, a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente sem oxigênio, portanto os resíduos devem estar bem aterrados.

◇ **temperatura:** a temperatura tem importante efeito na sobrevivência e crescimento de bactérias, assim como nas atividades de enzimas, sendo que o valor ótimo ocorre sempre dentro de uma ampla faixa.

As reações químicas são favorecidas com o aumento da temperatura, porém as enzimas que catalisam são estruturas complexas e sensíveis, de acordo com Pelczar et al. (1980). A tolerância à temperatura é diferente entre as diversas espécies de bactérias anaeróbias. Pode-se dividir em grupos relativos às faixas preferenciais de temperatura, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 Definição dos organismos de acordo com suas temperaturas de crescimento

Grupos	T mínima (°C)	T ótima (°C)	T máxima (°C)
Psicrófilos	<0	<15	<20
Mesófilos tolerantes	<5	>15	>20
Mesófilos	>5	<45	<50
Termófilos	>25	>45	>50
Termófilos extremos	>45	>65	>70

Nota: O sinal < foi utilizado para indicar que valores inferiores ainda podem ser encontrados na literatura. Fonte: Wiegel apud Nascimento (1990) (adaptado).

◊ **umidade:** a umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras. Elas dependem da umidade inicial do resíduo, da infiltração da água da superfície, do solo, e da água produzida durante a decomposição.

Mcbeam e Farquahr apud Baldoch, (1990) investigando a influência da umidade e temperatura em aterro sanitário, observaram que um aumento de umidade estimulou a produção de gás, até um certo nível de saturação, mas uma infiltração excessiva retardou a produção de gás.

◊ **nutrientes:** Speece (1996), mostrou que certos nutrientes não são somente essenciais para metanogênese, mais ainda são necessários para que outros se tornem efetivos. Neste experimento de estimulação nutricional ficou demonstrado que os nutrientes mais importantes, em ordem decrescente são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibidênio, selênio, riboflavina e vitamina B12.

Segundo Malina (1992), a quantidade requerida de cada nutriente é variável. Se o nutriente não atingir a quantidade requerida, pode limitar o crescimento da massa microbiana. E se o nutriente exceder a quantidade pode assumir características tóxicas e inibir o crescimento da massa microbiana.

◇ **tamanho das partículas:** as técnicas e equipamentos utilizados na coleta, transporte, processamento e disposição do lixo modificam as características físicas como: tamanho da partícula, densidade e homogeneidade dos resíduos. A redução do tamanho da partícula por trituração em veículos de coleta ou em estações de transferência aumenta significativamente a velocidade de degradação.

◇ **pH:** é um fator importante no crescimento das bactérias, sendo que a maioria das bactérias não tolera pH acima de 9,5 ou abaixo de 4,0. Metcalf e Eddy (1991) citam a faixa ótima de pH para o crescimento de bactérias entre 6,5 e 7,5.

No processo anaeróbio, os diferentes grupos de bactérias podem apresentar faixas ótimas de pH com valores diferentes. Por exemplo, as bactérias produtoras de metano, têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,8 e 7,4, Zehnder et al. (1982). As bactérias produtoras de ácidos graxos voláteis produtos gerados durante a decomposição anaeróbia, têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 5,0 e 6,0, de acordo com Chernicharo e Aroeira (1994).

As bactérias metanogênicas são as mais sensíveis às variações de pH. O metabolismo lento dessas bactérias em relação aos demais grupos faz com que sua adaptação às variações de pH seja também lenta.

Existem muitos estudos sobre a potencialidade de geração de gases de resíduos sólidos domiciliares e a produção de gás em aterros sanitários. Segundo Qin, Egolfopoulos e Tsotsis (2001) uma tonelada de resíduos sólidos domiciliares pode produzir mais de 300 m³ de gás de aterro. Os mesmos autores relatam que em um aterro, a produção de gás inicia-se quase que imediatamente após a deposição do resíduo, atingindo seu pico de produção em aproximadamente 10 anos e podendo se estender por um período maior que 40 anos. Os resultados do presente estudo são válidos para as características específicas do aterro sanitário estudado.

De acordo com Tchobanoglous et al.(1993), sob condições normais, a taxa de decomposição, medida como produção de gás, atinge o pico dentro dos primeiros dois anos e depois diminui de forma lenta, continuando, em muitos casos, por períodos de até 25 anos ou mais.

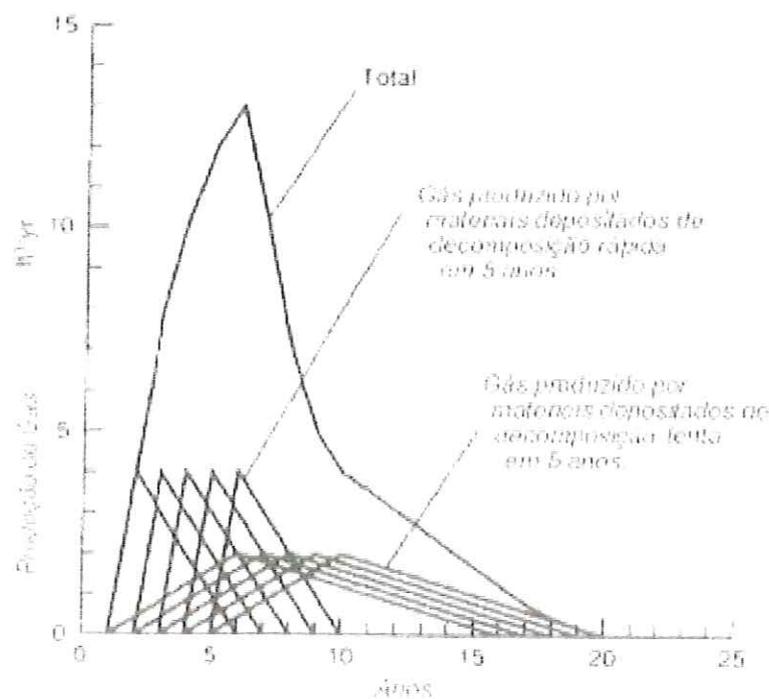


Figura 7: Representação gráfica da produção de gás de resíduos rapidamente e lentamente biodegradáveis, aterrados por um período de cinco anos.

Fonte: Tchobanoglous et al.(1993)

A qualidade do percolado pode ser indicativa do progresso da decomposição e do potencial de geração de gás. Smith¹² apud Silva (2001), exemplifica dizendo que, um aterro sanitário na fase metanogênica estável, com alta atividade, possui uma razão entre a Demanda Bioquímica de Oxigênio e a Demanda Química de Oxigênio (DBO/DQO),

¹² SMITH, M. V. (1993). Landfill Gases. In: CONTAMINATED LAND – PROBLEMAS AND SOLUTIONS. Blakie Academic and Professional. 351p.

em média igual ou menor que 0,3. A degradação anaeróbia continua e esta razão cai para 0,1 ou menos, indicando a presença de substâncias difíceis de serem degradadas. Entretanto essa razão DBO/DQO pode indicar a presença de materiais tóxicos inibindo a degradação.

O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)¹³ (1996) apud Alves, (2000) estima que dentre as emissões antropogênicas de metano, as geradas pela decomposição anaeróbia dos resíduos contribuem com aproximadamente 13 a 31% da estimativa de 375 Tg (10⁶t) de metano lançado anualmente em todo planeta.

Tabela 6- Composição típica dos gases encontrados em aterros sanitários

Componente	Porcentagem (base em volume seco)*
Metano	45-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrogênio	2-5
Oxigênio	0,1-1,0
Sulfetos, Dissulfetos, Mercaptanas, etc	0-1,0
Amônia	0,1-1,0
Hidrogênio	0-0,2
Monóxido de carbono	0-0,2
Constituintes traços	0,01-0,6

* a distribuição percentual exata varia de acordo com a idade do aterro sanitário.

Fonte: Tchobanoglous et al.(1993)

¹³ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1996). *IPCC Guidelines for national greenhouse inventories: Workbook*, França, Cap.6 de 6.1 a 6.37.

2.4 Mudanças Climáticas

Diversas pesquisas realizadas mostram o quanto ações antrópicas alteram a natureza, Drew¹⁴ apud Rodrigues (1998), observa o quanto esta ação é milenar, dizendo que o Homem alterou pela primeira vez a ação global da atmosfera e, portanto o clima, há sete ou nove mil anos, ao mudar a face da terra com derrubada de florestas, a semeadura e a irrigação, porém as mudanças climáticas daí resultantes foram quase que imperceptíveis.

De acordo com Goldemberg (1998), o meio ambiente no qual vivemos muda continuamente devido à “causas naturais” sobre as quais temos pouco controle. As estações do ano são as mais evidentes destas mudanças, principalmente nos locais geográficos de altas altitudes (norte e sul). Segundo o autor, há muitas outras variações, como por exemplo, a inclinação do eixo da terra, as manchas solares na superfície do sol e há ainda, aquelas com origem na própria Terra, tais como: erupções vulcânicas, terremotos, furacões, inundações e queimadas em florestas.

Porém, a Terra entrou num período de mudança hidrográfica, climática e biológica que difere dos episódios anteriores de mudança global, uma vez que ela tem origem humana. Os seres humanos, tanto individualmente como coletivamente, sempre procuraram mudar o mundo que lhes cerca. Mas, pela primeira vez, eles começaram a desempenhar um papel fundamental no sentido de alterar os sistemas biogeoquímicos globais e a Terra como um todo.

Após a revolução industrial, no final do século XVIII, a agressão antropogênica tornou-se maior, devido ao aumento populacional e ao grande aumento do consumo pessoal, principalmente nos países industrializados.

Para Goldemberg (1998), a forma como a energia é produzida e utilizada, está na raiz de muitas dessas causas e faz uma correlação de causa efeito entre a energia e problemas ambientais, por exemplo: a poluição do ar e a chuva ácida que ocorrem

¹⁴ DREW, D. (1989). *Processos interativos homem-meio ambiente*. São Paulo: Bertrand Brasil.

principalmente em virtude da queima de combustíveis fósseis e do transporte urbano; o aquecimento por efeito estufa e das mudanças climáticas que são devidos principalmente, à queima dos combustíveis fósseis e o desmatamento; e a degradação do solo que, são devidos em parte, ao uso de madeira para cozinhar.

Em 1995, o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), realizou um relatório com as previsões dos possíveis impactos em diversas áreas do mundo, que poderão ocorrer devido às possíveis mudanças de temperaturas da Terra, principalmente pelo uso de combustíveis fósseis.

De acordo com o IPCC (2001), os impactos econômicos, sociais e ambientais, decorrentes do aquecimento global afetarão todos os países, porém cada um irá sentir de uma maneira diferente.

O quadro a seguir resume este relatório de previsões dos possíveis impactos em diversas áreas do mundo.

Região	Prováveis Impactos
África	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da produção agrícola; - Diminuição da disponibilidade de água na região do mediterrâneo e em países do sul; -Aumento de vetores de diversas doenças -Aumento da desertificação; - Extinção de animais e plantas.
Ásia	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da produção agrícola; - Diminuição da disponibilidade de água nas regiões áridas e semi-áridas; - Aumento do nível do mar deverá deslocar milhões de pessoas.
Austrália e Nova Zelândia	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da disponibilidade de água; - Extinção de plantas e animais.
Europa	<ul style="list-style-type: none"> - Desaparecimento de geleiras nos Alpes; - Aumento da produção agrícola em algumas regiões; - Impactos no turismo.
América Latina	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da produção agrícola; - Aumento de vetores de diversas doenças; - Extinção de animais e plantas.
América do Norte	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da produção agrícola em algumas regiões; - Aumento de vetores de diversas doenças.
Polar	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da calota polar; - Extinção de animais e plantas.
Pequenas ilhas	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do nível do mar deverá deslocar milhões de pessoas; - Diminuição da disponibilidade de água; - Diminuição da atividade pesqueira; - Impacto no turismo.

Figura:8 Impactos possíveis em diversas áreas do mundo.
 Fonte: Adaptado de IPCC (2001).

As estimativas atuais do aquecimento global sugerem um aumento na temperatura global de 2°C a 6°C, Ricklefs (2001).

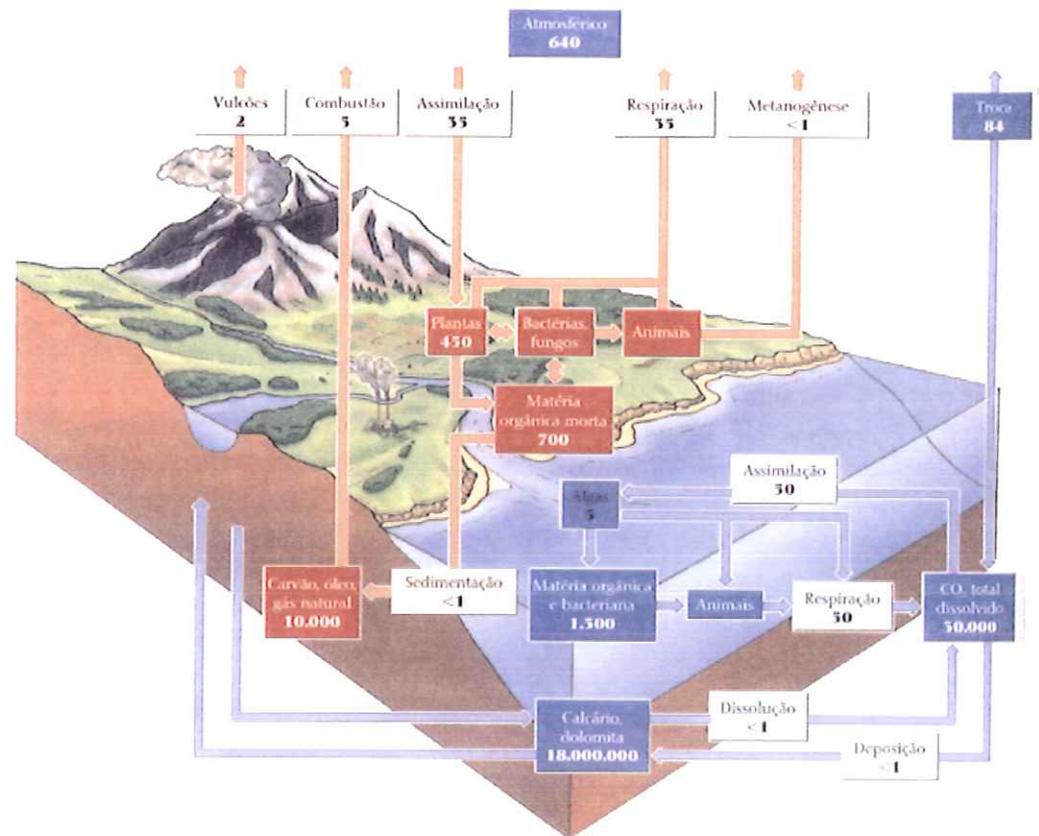
2.4.1 Ciclo do Carbono

O dióxido de carbono (CO₂) ocorre naturalmente na atmosfera. Em nível global, o ciclo do CO₂ é um dos mais importantes ciclos biogeoquímicos, e é extremamente vulnerável às perturbações antrópicas, que podem causar mudanças ambientais e climáticas. Neste ciclo, a quantidade de carbono existente é muito pequena quando comparada com o carbono dos oceanos e dos combustíveis fósseis e outros estoques na crosta terrestre.

Até antes da Revolução Industrial, acreditava-se existir um equilíbrio entre atmosfera e continentes oceânicos. Entretanto, depois da Revolução Industrial, o volume de CO₂ tem aumentado devido a *inputs* antropogênicos, Odum (1983).

Antes da Revolução Industrial, a adição de CO₂ à atmosfera pela respiração de organismos terrestres era aproximadamente 120 bilhões de toneladas de carbono por ano, que era equilibrada pela produção primária bruta da vegetação terrestre, e a quantidade total era mantida em equilíbrio. Foram adicionados, CO₂ na atmosfera através da queima de combustíveis fósseis, pelo desmatamento e queima de florestas. Atualmente o desmatamento é responsável pela adição de quase 2 bilhões de toneladas de carbono na atmosfera anualmente; a queima de combustíveis fósseis adiciona cerca de 5 bilhões de toneladas. Assim as atividades antrópicas aumentaram o fluxo de carbono na atmosfera em cerca de 6% (aproximadamente), Ricklefs (2001).

A figura 9 apresenta o ciclo do carbono.



Nota: O tamanho dos compartimentos e transferência entre os compartimentos estão em bilhões de toneladas métricas (10^{15} g), ou gigatoneladas (Gt), e Gt por ano.

Figura: 9 O ciclo global do carbono.

Fonte: Fenchel e Blackburn¹⁵ apud Ricklefs (2001).

O efeito estufa é devido ao acúmulo de alguns gases na natureza, entre estes gases está o dióxido de carbono (CO₂).

¹⁵ FENCHEL, T.; BLACKBURN, T.H. (1981). *Bacteria and Mineral Cycling*. New York: Academic Press.

2.4.2 Efeito estufa

Grande parte da quantidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra é re-emitada na forma de radiação infravermelha. Uma pequena fração dos gases da atmosfera tem propriedade de reter a radiação infravermelha, agindo como estufa de vidro em torno do planeta. Os vidros nas estufas funcionam com o mesmo princípio. Estes gases são conhecidos como “gases de efeito estufa” ou “*greenhouse gas*”. São eles: vapor d’água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os CFC’s. Esses gases impedem que esta energia passe diretamente para o espaço. Caso esse fato ocorresse o planeta teria variações de temperatura da ordem de 100°C a mais durante o dia, e 100°C a menos durante a noite, Goldemberg¹⁶ apud Alves (2000).

Acima de tudo, o efeito estufa beneficia grandemente a vida na superfície da Terra por mantê-la dentro de um intervalo de variação favorável, Ricklefs (2001).

Segundo Goldemberg (1998), o CO_2 é responsável por 55% do fenômeno do efeito estufa, o restante é causado pelo metano (CH_4), que é responsável por 15%, e pelos clorofluorcarbonos (CFCs), que contribuem com 20%, cabendo 10% ao óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3) e outros.

A presença desses gases na atmosfera resulta dos seguintes processos, Mota (1997):

CO_2 : queima de petróleo e do carvão, para o transporte, geração de energia, etc, desmatamento, queima de biomassa.

CH_4 : queima de biomassa, queima de combustíveis fósseis, decomposição anaeróbia.

CFC’s: substâncias utilizadas em *sprays* e em sistemas de refrigeração.

N_2O : queima de combustíveis fósseis, queima da madeira.

O_3 : são produzidos em reações que envolvem hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, e liberados na queima de combustíveis fósseis.

¹⁶ GOLDEMBERG, J. (1990). *O Efeito Estufa: S.O.S. Planeta Terra*. São Paulo: Brasiliense.p.11.

A figura 10 apresenta a descrição esquemática do efeito estufa.

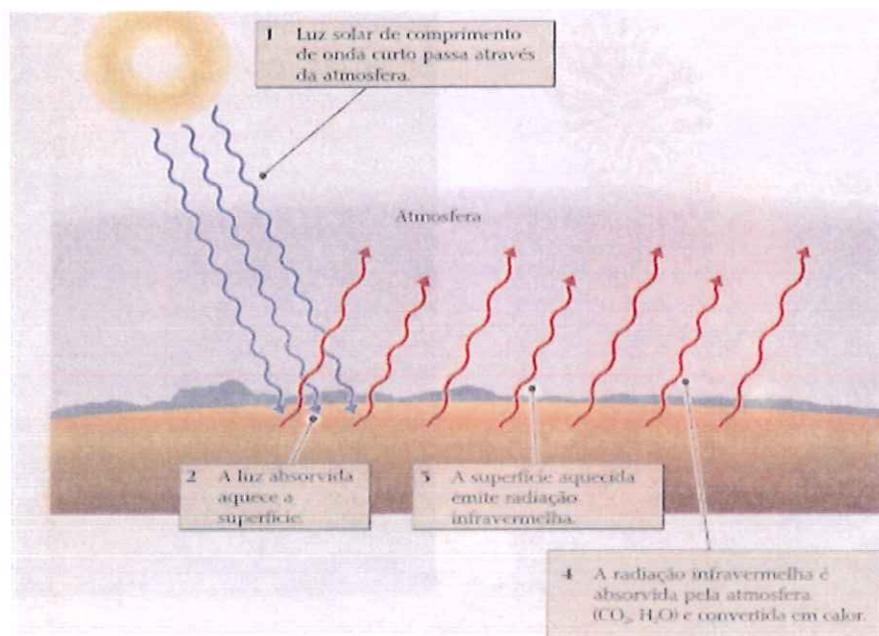


Figura 10: O efeito estufa
Fonte: Ricklefs (2001)

Quaisquer mudanças feitas pelo homem no equilíbrio irradiante da Terra tenderão a alterar a temperatura atmosférica e oceânica e os tipos de clima. À medida que a atmosfera se aquece, a realimentação (mudanças no vapor d'água, no gelo do mar, nas nuvens e nos rios) amplifica ou reduz o aquecimento levando às mudanças climáticas, Goldemberg (1998).

As temperaturas mais quentes causadas pelo efeito estufa, terão efeitos diversos na produtividade. Pelo lado positivo, as temperaturas mais quentes alongam a estação de crescimento e aceleram o metabolismo, e dessa forma tendem a intensificar a produção nos ambientes úmidos. Como as plantas demandam de dióxido de carbono para a fotossíntese, este efeito provavelmente será intensificado pela concentração mais alta de CO_2 na atmosfera. Contrabalançando este benefício, está a probabilidade de aumentar o ambiente de seca nos climas áridos, o que pode reduzir a produção agrícola e acelerar a conversão de terras de pastagens sobreutilizadas em terras inutilizáveis. Outros

problemas potenciais incluem a inundação de comunidades costeiras pela elevação do nível do mar alimentado pelo derretimento de calotas de gelo polar e pela extensão de água aquecida, Ricklefs (2001).

Segundo a WRI (2002), o potencial de aquecimento global é um índice usado para transformar o nível de emissão de vários gases em uma medida comum, com o objetivo de comparar a radiação relativa de diferentes gases. O potencial de aquecimento global é utilizado para expressar a força radiativa de gases do efeito estufa em termos de equivalentes de CO₂. O dióxido de carbono equivalente (CO₂ e) é uma medida usada para comparar as diferentes emissões de diferentes gases do efeito estufa baseados no potencial de aquecimento global de uma unidade de massa de CO₂ durante um período de tempo (usualmente 100 anos). O metano, por exemplo, possui um potencial de aquecimento global igual a 23, ou seja, a emissão de uma tonelada de metano é equivalente à emissão de 23 toneladas de dióxido de carbono. A tabela 7 mostra alguns gases de efeito estufa e seus respectivos potenciais de aquecimento global e o tempo de permanência na atmosfera.

Tabela 7 - Gases de efeito estufa e seus respectivos potenciais de aquecimento global e o tempo de permanência na atmosfera.

Gás	Tempo de vida na atmosfera	Potencial de aquecimento global (tempo base igual a 100 anos)
Dióxido de carbono (CO ₂)	500 - 200	1
Metano (CH ₄)	12	23
Óxido nitroso (N ₂ O)	114	296
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	3.200	22.200

Fonte: IPCC¹⁷ (2001) apud WRI (2002).

¹⁷ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001). Climate Change. Synthesis report, p.189.

2.4.3 Uso de combustíveis fósseis

O consumo de energia *per capita* em um país da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico ou Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) é superior a 100GJ, chegando a 317 nos Estados Unidos, e em um país em desenvolvimento o consumo de energia *per capita* e da ordem de 24 GJ. Como por exemplo, no Brasil é 24 GJ e em Uganda e outros países da África é 1 GJ. As previsões para as próximas décadas indicam ainda a manutenção do crescimento populacional dos países em desenvolvimento, enquanto o número de habitantes dos países desenvolvidos permanecerá estável, resultando na elevação da população mundial dos atuais 6 bilhões de habitantes para 10 bilhões em 2050, World Resource Institut (WRI) apud Alves (2000). Deste total, 80% estará em países em desenvolvimento de acordo com, Alves (2000). Considerando que os povos dos países em desenvolvimento almejam e necessitam elevar seus padrões de vida, elevando conseqüentemente o nível de renda e o consumo de energia e de recursos naturais. Ver figura 11.

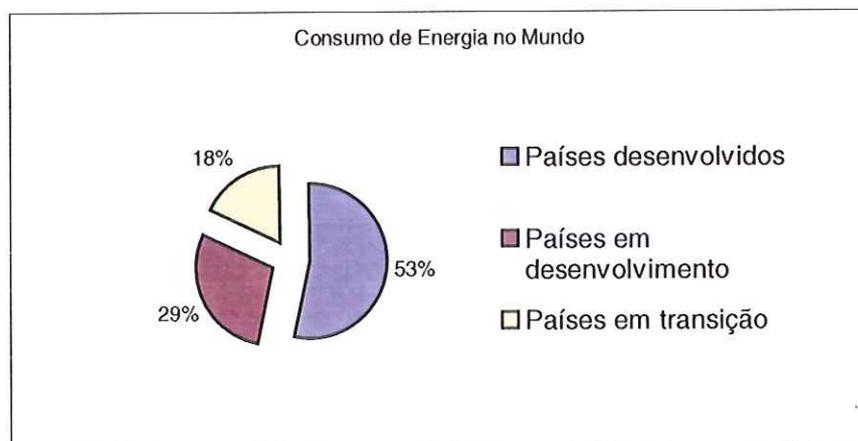


Figura 11 Energia consumida no mundo
Fonte: WRI¹⁸ apud Alves 2000.

¹⁸ WORLD RESOURCES INSTITUTE (1996). *A Guide to the global environment – The urban environment*, Oxford: Oxford University Press, p.365.

A figura 12 mostra o crescimento populacional em escala mundial até 2050.

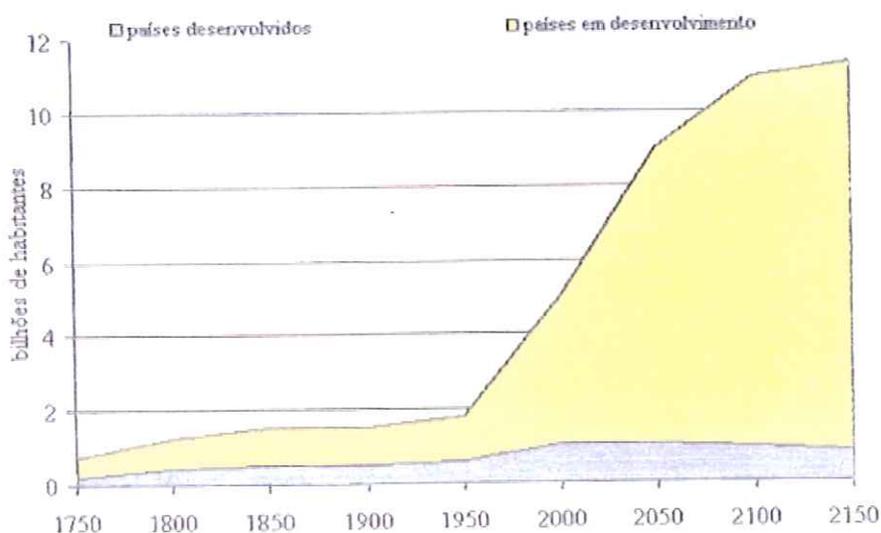


Figura 12 Crescimento do número de habitantes em escala mundial
Fonte: Adaptado de Alves (2000)

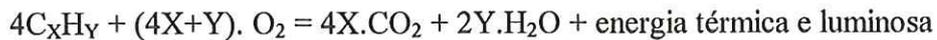
A principal causa dos problemas ambientais está relacionada ao uso de energia, e ao emprego de combustíveis fósseis, seja na produção de eletricidade, no setor de transportes ou na indústria, Winteringham (1991).

A maneira mais óbvia de resolver o problema é a remoção das causas, desta forma, as fontes de energia renováveis são um caminho para isso.

Em seu livro Winteringham (1991), diz que combustíveis fósseis são resíduos fosfolizados de uma grande camada acumulada de animais primitivos e plantas que devem ter sido processadas por pressões geológicas, efeitos geotérmicos e possivelmente por uma lenta incorporação de abióticos ou componentes não vivos de seu meio geológico. Os principais combustíveis fósseis são: carvão, petróleo e gás natural.

O combustível fóssil representa um recurso energético não renovável, declinante e limitado. Não só o crescimento populacional implica no aumento da demanda de energia, mas também a modificação das aspirações humanas.

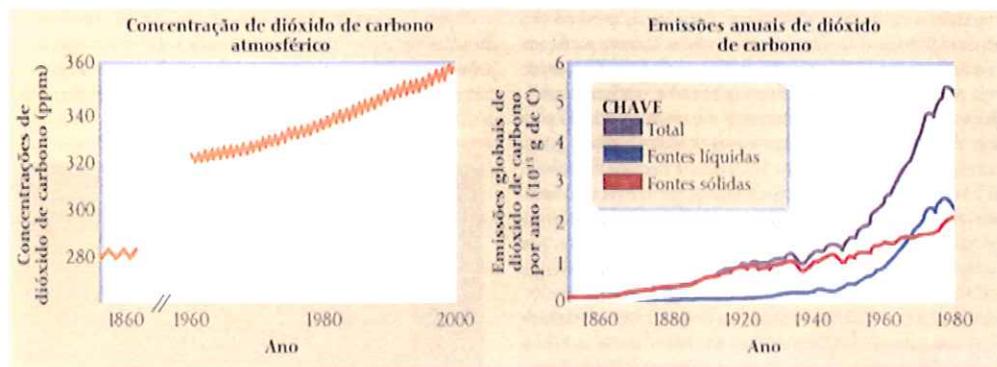
A energia potencial quimicamente guardada destes combustíveis é extraída por combustão oxidativa ou queima. Pode-se representar a equação simplificada do seguinte modo:



Depois da Segunda Guerra Mundial, o número de automóveis usados em todo o mundo aumentou de aproximadamente 50 milhões de veículos no ano de 1945 para mais de 170 milhões no ano de 1965, Winteringham (1991).

Além da emissão de dióxido de carbono (CO_2), o uso de combustíveis fósseis está associado à emissões de outros tipos de gases, (especialmente no uso do carvão e diesel) e nestas emissões incluem-se o enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e outros elementos potencialmente tóxicos, como por exemplo: cádmio, cobre, mercúrio, zinco e chumbo, Winteringham (1991).

O aumento de dióxido de carbono atmosférico é uma tendência que se tem acelerado desde o começo da Revolução Industrial, e é motivado pelo crescente uso de combustíveis fósseis e pela eliminação das florestas, Stern et al. (1993).



Fonte: Solomon¹⁹ et al. apud Ricklefs (2001)

Figura 13 A concentração atmosférica de CO₂ nos últimos 150 anos.

A figura 13 mostra fontes e quantidade de CO₂ emitidas devidas à produção de energia.

¹⁹ SOLOMON, A .M (1985). *Atmosphere carbon dioxide and global dioxide cycle*. Washington: Department of Energy, n, p. 1-13 e 63-80.

Tabela 8 - Emissões de CO₂ devidas à produção de energia

Tecnologia	Emissões devidas à produção de energia (gCO ₂ /MJ)			
	Extração do combustível	Construção	Operação	Total
Termelétrica convencional a carvão	0,3	0,3	267,2	267,8
Termelétrica a carvão alternativa - 1	0,3	0,3	266,7	267,2
Termelétrica a carvão alternativa - 2	0,3	0,3	208,0	208,6
Termelétrica a óleo	-	-	201,7	201,7
Termelétrica a gás	-	-	134,4	134,4
Geração elétrica por energia térmica oceânica	-	1,0	83,4	84,4
Termelétrica a vapor geotérmica	0,1	0,3	15,4	15,8
Pequena hidrelétrica	-	2,8	-	2,8
Termelétrica a vapor d'água	0,4	0,3	1,5	2,2
Geração elétrica de gerador eólico	-	2,1	-	2,1
Geração elétrica de coletor solar	-	1,5	-	1,5
Geração elétrica por coletor solar térmico	-	1,0	-	1,0
Grandes hidrelétricas	-	0,9	-	0,9
Termelétrica a biomassa - manejo sustentável	419,2	0,8	374,0	44,4

Fonte San Martin apud IEA, 1991.

Nota: Unidade original: (tCO₂/Gwh)= 13,6 (gco/MJ)

2.5.4 Emissão de metano

Medidas da concentração do metano atmosférico analisado a partir de amostras de gelo escavado em profundidade que chegam a 2 Km passaram de aproximadamente

0,5 partes por milhão em volumes (ppmv) no período pré-industrial, para atuais 1,7 ppmv, citado por Bodeb et al. (1990) em Alves, (2000).

Essa tendência de aumento é atribuída ao crescimento da população humana, que, por sua vez, causa aumento na demanda de alimentos, levando a outros incrementos, como por exemplo, da plantação de arroz em áreas alagadas, criação de animais, da utilização de combustíveis fósseis, e conseqüentemente da geração de grande quantidade de resíduos sólidos, Alvalá et al. (1999).

De acordo com Augenbraum et al. (1999) apud El – Fadel (2001) as emissões de metano na natureza se distribuem de acordo com dados da tabela 9.

Tabela 9 - Contribuições naturais e antrópicas na emissão de metano

Fonte	Contribuição (%)
Oceanos	3
Insetos	4
Dejetos de animais	5
Tratamento de esgoto	5
Aterros sanitários	6
Queima de biomassa	8
Cultivo de arroz irrigado por alagamento	12
Fermentação entérica de animais	16
Exploração de carvão, óleo e gás natural	19
Pântanos e alagados naturais	22

Fonte: Augenbraum et al. (1999) apud El – Fadel (2001)

No ano de 1997, foi iniciada pela CETESB, sob a coordenação do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), a execução do Inventário Nacional de Emissões de Metano Gerado pelo Manejo de Resíduos, de acordo com a metodologia estabelecida pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

De acordo com a Agenda 21 do governo do Estado de São Paulo, a elevação do nível de renda da população corresponde a maiores níveis de geração de resíduos e, em consequência, de metano. Países pobres têm níveis de emissão de metano inferiores a 5 Kg CH₄/hab.ano; países desenvolvidos chegam a 40 Kg CH₄/ hab.ano.

O radical OH é responsável pela remoção de diversas espécies químicas da atmosfera terrestre. No entanto, o metano e o monóxido de carbono são os sumidouros majoritários desse radical. Portanto, um aumento na concentração de um desses dois gases traços pode reduzir a concentração do radical OH e a capacidade de oxidação da atmosfera, Alvalá et al. (1999).

Há diferentes tecnologias de estimativas de emissão de metano pelos locais de disposição de resíduos. Pode-se estimar as emissões de um país ou Estado usando-se a metodologia do IPCC (1996) ou para um aterro sanitário específico, empregando-se a metodologia da USEPA (1996). Ambas apresentam, elevadas incertezas, que ocorre devido à escassez de dados locais sobre a geração de resíduos, composição e disposição.

Metodologia revisada: IPCC (1996):

De acordo com esta metodologia, o total de metano emitido pela degradação anaeróbia dos resíduos gerados em um ano pode ser calculado pela seguinte equação:

$$E = \frac{\text{Popurb} \times \text{taxa RSD} \times \text{RSDf} \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{CODf} \times F \times 16}{12}$$

Onde:

Popurb = População urbana (n° de habitantes)

taxa RSD = Taxa de Geração de Resíduos Sólidos Domésticos Urbanos por Habitante por ano. [KgRSD/habitante/ano]

RSD_f = Fração de Resíduos sólidos Domésticos que é depositada em locais para disposição de resíduos sólidos (%)

FCM = Fator de Conversão de Metano

COD = Carbono Orgânico Degradável no resíduo sólido doméstico [gC/gRSD]

COD_f = Fração de COD que realmente se degrada (%)

F = Fração de Metano no gás de locais para disposição de resíduos sólidos

16/12 = Taxa de conversão de carbono em metano

Nota: Esta metodologia estima o biogás total gerado pelo resíduo. Não são feitas considerações a respeito do período de degradação que pode levar anos.

Outra metodologia recomendada pela IPCC, (1996) para locais de disposição de resíduos sólidos:

Neste caso, é reconhecido que o metano é emitido ao longo de um período. Uma aproximação da cinética de geração leva em conta os fatores que a influenciam. Esta metodologia aplica-se a estimativa de emissão dos locais de disposição de resíduos sólidos individualmente ou para todo o país. É recomendado que sejam considerados

fatores, como: geração de resíduos *per capita*, total de geração de resíduo, umidade, acidez, temperatura e disponibilidade de nutrientes.

Esta equação representa este comportamento: IPCC (1996)

$$Q_{T,x} = k R_x L_0 e^{-k(T-x)}$$

Onde:

$Q_{T,x}$ = vazão de biogás (t/ano)

k = constante de geração de metano (ano^{-1})

R_x = quantidade de resíduo aterrada no ano (Mg)

x = ano de aterramento do resíduo (ano)

L_0 = carbono orgânico degradável (m^3/Mg de resíduo)

T = ano corrente (ano)

O IPCC (1996), estima que:

$$k = 0,1$$

$$R_x = 500\text{Mg}$$

$$L_0 = 0,8$$

A estimativa das emissões que ocorrem em vários anos é a soma das emissões anuais, que é representada pela seguinte equação:

$$Q_T = \sum Q_{T,x}$$

A USEPA (1996), propõe uma metodologia de avaliação preliminar de viabilidade econômica de recuperação do gás gerado pelos locais de disposição de resíduos sólidos,

onde é verificado um tamanho economicamente explorável dos resíduos depositados em locais de disposição de resíduos sólidos. Este tamanho pode ser estimado pela seguinte equação:

$$T = \text{Pop}_{\text{urb}} \times \% \text{ coleta} \times \text{Taxa RSD} \times \text{Idade} \times 0,001 \text{ (USEPA, 1996)}$$

Onde:

T= tamanho do local para deposição de resíduos sólidos (t)

0,001 = conversão de unidades (t/kg)

Pop_{urb} = população urbana em habitantes

Taxa RSD = taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (Kg resíduos/hab.ano)

% coleta = taxa de coleta de resíduos

Idade = número de anos que vem sendo depositados resíduos no local de deposição de resíduos sólidos (ano)

A experiência da USPA indica que locais de disposição de resíduos sólidos que contenham pelo menos 1 milhão de toneladas de resíduos são aproveitáveis para coleta e utilização do metano. Porém, a quantidade de gás gerado varia de aterro para aterro, sob a influência de fatores como:

- ◇ conhecimento da composição dos resíduos, do gás gerado e da estrutura do aterro,
- ◇ composição dos resíduos, quanto maior a quantidade de matéria orgânica depositada, maior será a geração de gás.

Outra metodologia para estimativa de quantidade de metano gerada da USEPA (1996), neste caso, estima-se a quantidade de metano emitida por resíduos por habitantes ao ano.

Supondo que cada pessoa produz, no Brasil, 182 Kg de resíduos por ano, cada tonelada dessa massa de resíduos (em aterros) produz, até se decompor totalmente, de 400 a 500 m³ de gás com a composição de aproximadamente 50% de metano, USEPA (1996).

Neste caso, a USEPA considera que 80% dos resíduos produzidos vão para aterro.

$$\frac{182 \text{kg lixo}}{\text{pessoa.ano}} \cdot 80\% \cdot \frac{1 \text{t}}{1000 \text{Kg}} \cdot \frac{400 \approx 500 \text{m}^3 \text{gás}}{\text{t}} \cdot \frac{50\% \text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{m}^3 \text{gás}} = 29,1 \approx 36,4$$

$$\frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{pessoa.ano}}$$

Ou seja:

$$Q(\text{Pop}) = 36,4 \cdot \text{Pop}_{\text{urb}}$$

Onde:

Q (Pop): Vazão do biogás do aterro (m³ CH₄/ano)

Pop_{urb}: População urbana atendida pelo aterro considerado (habitantes).

OBS: O que permite supor que hoje a cidade de São Paulo, que tem uma população de 14 a 15 milhões de habitantes, esteja emitindo de 500 a 600 milhões de metano.

O IPCC estima que dentre as emissões antropogênicas de metano, as geradas pela decomposição anaeróbia dos resíduos contribuam com aproximadamente 13 a 31% da estimativa de 375Tg (10^6 t) de metano, que são lançadas anualmente no planeta IPCC, (1996).

O IPCC definiu duas metodologias: uma dirigida aos países em desenvolvimento, que emprega informações censitárias, como por exemplo, população urbana, produção industrial, taxa de coleta de resíduos e efluentes; e a outra metodologia, direcionada a países desenvolvidos, que visa, o emprego de informações como local de disposição de resíduos, medição direta de gás metano, quantidade de resíduos depositada diariamente em aterros sanitários e a composição dos resíduos.

O IPCC, 1996 estabeleceu uma metodologia que define valor padrão de fração de carbono orgânico degradável (Degradable Organic Carbon – DOC), apresentada na tabela 10:

Tabela 10 – Carbono orgânico degradável

Resíduo	Fração de DOC (em peso)
Papel e tecidos	0,4
Resíduos de poda, Folhas, orgânicos	0,4
Perecíveis (exceto produtos alimentícios)	0,17
Resto de comida	0,15
Madeira	0,30

Fonte: IPCC, 1996

2.6 Projetos de uso do gás metano para fins energéticos

O interesse científico pelo biogás é bastante antigo, Robert Boyle e Denis Papin em 1682, já referenciavam o assunto em seus trabalhos. Breves referências também são encontradas no trabalho de Stephen Halles que data de 1727, Pine²⁰ (1971) apud Filho. Em 1776, Alexandro Volta descobre que a produção de um “gás combustível” podia ocorrer a partir de sedimentos orgânicos de rios, pântanos e lagos. Depois desta data, ocorre uma série de outras descobertas: Béchamp, Popoff, Tappaneiner, Hoppe – Seyler, Söhngen e Omelianski, que permitiram estabelecer a base microbiológica da formação do gás metano, Balch; Fox.; Magrun. e Wolfe,²¹ (1979) apud Filho.

Referências às aplicações práticas do biogás datam de mais de cem anos, porém o processo formal de produção de metano, acredita-se ser mais antigo: ano de 1897, ocorrido na Índia. Na mesma época, é citada a geração de energia pelo gás metano

²⁰ PINE, M.J.(1971). *Methane Fermentation*. In: Anaerobic Biological Treatment Processes.

²¹ BALCH, W.E.; FOX, G.E.; MAGRUN, L..J.; WOESE, C.R. ; WOLFE, R.S (1979). Methanogens: Reevaluation of a unique biological group. *Microbiological Reviews*, . p.260-296, jun.

na Inglaterra onde já era usado para aquecimento e iluminação. Na Austrália, em 1911, fundou-se uma companhia para produzir e comercializar o biogás obtido da fermentação do esgoto urbano, Paturau²² (1969) apud Filho (1984).

É importante salientar que projetos de recuperação de biogás gerado em estações de tratamento de efluentes são diferentes daqueles em que o gás é gerado em aterros. As quantidades de gás geradas em aterros são maiores que nas estações de tratamento de efluentes. Porém, o biogás gerado nas ETE's (estações de tratamento de efluentes) é mais rico em metano. Enquanto o resíduo sólido é disposto constantemente nos aterros, o efluente tem uma permanência média de 12 horas na estação de tratamento, e depois é lançado aos corpos d'água. O tempo de geração de biogás em ETE's é constante e dura até quando durar a atividade da indústria ou no caso de esgoto até quando o tratamento for efetuado. No caso de aterros, o fluxo de gás tem um tempo ótimo e depois vai decaindo, Nascimento (2002).

O uso energético do gás gerado pelos resíduos é um dos princípios de desenvolvimento sustentável aplicável à indústria e ao governo, aumentando a qualidade operacional e ambiental.

O metano gerado em aterro sanitário pode ser utilizado em residências, no comércio, em indústrias e em veículos. Seu uso residencial pode ser para cocção de alimentos e aquecimento de água, na indústria como combustível para fornecimento de calor, geração de eletricidade e força motriz na área de transportes, pode ser usado e em ônibus e automóveis, em substituição do diesel ou da gasolina, Alves (2000)

Segundo Mather apud Silva (2001), os aterros anteriores à década de 70, em geral, eram não controlados e de pequeno tamanho. Os resíduos depositados que degradavam – se anaerobicamente, e produzindo dióxido de carbono em processo exotérmico, resultavam em altas temperaturas que freqüentemente causavam incêndios, queimando os materiais potencialmente degradáveis, como madeiras e papel. Com o

²² PATURAU, J.M. (1969). Direct and Indirect utilization of bagasse as fuel. *By Products of Sugar Cane Industry*. Amsterdam, Elsevier, p.51-52.

início dos grandes aterros controlados, a degradação aeróbia ocorre por pouco tempo e em uma extensão limitada, dominando o processo anaeróbio, com produção de metano.

Com os altos custos dos derivados de petróleo, praticados durante a década de 70, várias pesquisas foram iniciadas para aproveitamento em veículos, Silva (2001)

Uma experiência de aproveitamento de gás metano de aterro sanitário usado para fins energéticos, foi realizada pela Companhia de Gás do Município de São Paulo (COMGÁS), em 1978 no aterro da Estação da Rodovia Raposo Tavares (Km 14,5). Neste aterro haviam sido depositadas 2.100 toneladas de resíduos, onde a COMGÁS iniciou uma estação experimental para captação e análise do gás ali produzido. O gás extraído da estação foi distribuído para cerca de 30 residências e para uma indústria de produtos isolantes, que ficava nas proximidades do aterro, COMGÁS (1985).

Em 1985, a COMGÁS fez um projeto para abastecimento de 40 ônibus da Companhia Municipal de Transportes Coletivos (CMTTC). Neste caso, o gás utilizado era captado no aterro de Santo Amaro, que neste ano tinha capacidade potencial de produção de gás de 80.694 Nm³/dia. Foram depositados 5.757.410 de resíduos até o ano de 1984.

Em janeiro de 2004, a Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente, em parceria com empresas privadas, inaugurou uma grande usina de geração de energia a partir de gases de aterro sanitário. Segundos dados divulgados no Jornal O Estado de São Paulo, de 25 de Janeiro de 2004, a usina instalada no Aterro Bandeirantes, de São Paulo, terá a produção de 170 mil megawatts por hora e abastecerá aproximadamente 200 mil pessoas ou 50 mil famílias, evitando o lançamento de 10 milhões de metros cúbicos de metano na atmosfera. Além da produção de energia, haverá a comercialização de certificados de redução de emissões no mercado de crédito de carbono, previsto no Protocolo de Quioto.

Na França, Jaffrin et al. (2003), descobriram uma maneira barata para aquecer estufas de cultivo de plantas durante o inverno, e também, uma fonte abundante de

dióxido de carbono, garantindo o crescimento das plantas durante todo ano. Neste experimento, realizado em escala real pelo French Institut National de la Recherche Agronomique em parceria com empresas privadas, os gases oriundos de um aterro sanitário municipal foram usados para aquecimento da estufa, no caso do metano, e o dióxido de carbono, após passar por um processo de purificação para remoção dos resíduos fitotóxicos, foi utilizado como fonte suplementar de CO₂, para auxiliar no crescimento das plantas. Durante 24 meses foram monitoradas duas estufas idênticas, porém, uma com a atmosfera normal e aquecida com combustível convencional e a outra com injeção de CO₂ e utilizando metano como combustível para o aquecimento. A pesquisa concluiu que o enriquecimento da atmosfera de estufas com CO₂ purificado oriundo de gás de aterro sanitário é perfeitamente viável e a produção pode aumentar mais que 100% se comparado com outras safras. Além disso, a redução nos custos para o aquecimento é bastante significativa.

2.5.1 Particularidades do uso do gás metano para fins energéticos

O estudo da viabilidade de emprego dos gases de aterros sanitários inicia-se pela avaliação de equivalência energética entre o metano e o combustível a ser substituído. Além do poder calorífico, é necessário que se observem outras propriedades como presença de contaminantes e acidez, Alves (2000).

De acordo com Alves (2000), a presença de substâncias não combustíveis no gás de aterro sanitário, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente, estas substâncias entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia elétrica gerada.

À medida que se eleva a concentração das impurezas o poder calorífico do metano torna-se menor. O poder calorífico do gás de aterro é igual a 5.000 Kcal/m³, o que corresponde a um litro de óleo Diesel, Alves (2000).

Segundo Gastaldoni²³ apud Alves (2000), o desempenho do gás de aterro sanitário como combustível automotivo é bastante semelhante ao obtido com o Gás Natural Combustível.

Processos de purificação de gás de aterro:

A purificação dos gases de aterro para atender unidades móveis, consiste na remoção de gás carbônico que não é combustível e do gás sulfídrico que é corrosivo, restando o metano em proporções de 95% aproximadamente, com boas características combustíveis, Silva (1995).

Como qualquer outro gás, as características de gás de aterro sanitário dependem da pressão, temperatura, umidade, concentração de metano e gases inertes e ácidos. Possui a composição semelhante ao Gás Natural Combustível (GNC), e pode ser usado nas condições em que é gerado, e dependendo da aplicação pode ser necessária a redução da concentração de H₂S (ácido sulfídrico) e CO₂ (dióxido de carbono), redução da umidade ou até elevação da pressão.

◇ Remoção de CO₂

Um dos processos de remoção do dióxido de carbono (CO₂) do biogás é feito através adsorção física do CO₂ na água. Segundo Beduschi²⁴ et al. apud Alves (2000), este é um processo antigo, que usa água como adsorvente, e esta pode ser regenerada por despressurização. Ou seja, quando o CO₂ é dissolvido na água, forma ácido

²³ GASTALDONI, I. (1985). O biogás como combustível automotivo. In: II ENCONTRO SOBRE BIOGÁS AUTOMOTIVO. *Trabalhos Apresentados...* EMBRATER/UNESP, Jaboticabal. p.61-69.

²⁴ BEDUSCHI, L. C. (1985). Considerações gerais sobre a estação da UNESP de biogás automotivo abaixo pressão. In: II ENCONTRO SOBRE BIOGÁS AUTOMOTIVO, *Trabalhos Apresentados...* EMBRATER/UNESP, Jaboticabal. p.45-49.

carbônico, (esta dissolução ocorre mais eficientemente sob pressão) e quando se despressuriza a água de lavagem, o CO₂ se desprende para atmosfera.

◇ Remoção do H₂S

Pode ser feita a remoção de H₂S (ácido sulfídrico), usando-se limalhas de ferro. Ainda segundo Beduschi et al. apud Alves (2000), este é um dos métodos mais antigos e simples usados na remoção de enxofre de uma corrente gasosa. Além disso, tem como vantagem o baixo custo, a simplicidade nas instalações e a possibilidade da completa remoção do H₂S que reagem com óxido de ferro formando sulfeto. O óxido de ferro pode ser palha de aço, cavacos e limalhas de ferro.

◇ Desumidificação

Pode ser feita tanto pelo resfriamento do fluxo gasoso até o ponto de orvalho, quanto pelo contato deste por substâncias higroscópicas.

Segundo Silva (1995), o maior obstáculo para se alimentar motores automotivo com metano, está na dificuldade de armazená-lo, o que requer cilindros pesados e volumosos que refletem na carga útil veicular.

Há três opções de armazenamento de metano para uso automotivo: o liquefeito, o comprimido e o adsorvido, cujas características técnicas são apresentadas por Barra²⁵ (1984) apud Silva (1995) na tabela 11.

²⁵ BARRA, M.E. (1984). Purificação e Liquefação Criogênica do Metano. IN: ENCONTRO SOBRE BIOGÁS AUTOMOTIVO PARA EMPRESA RURAL, Londrina. Anais... EMBRATER, p.21-28.

Tabela 11 - Opções de armazenamento de metano

Características Técnicas do Armazenamento	Sistema de Armazenamento		
	Liquefeito	Adsorvido	Comprimido
Pressão (atm)	2,0	20	200
Temperatura (°C)	-161	Ambiente	Ambiente
Energia Armazenada (KJ/L)	22.300	2640	9800
Peso do Cilindro (Kg/m ³ n)	1,0	7,0	6,5

Fonte: Barra (1984) apud Silva (1995).

O sistema liquefeito destaca-se por armazenar a maior quantidade de energia na unidade de volume a baixa pressão, 600 L de metano gasoso são acondicionados em 1 L de metano líquido garantido boa autonomia nas unidades veiculares, porém segundo Bruder²⁶ apud Silva (1985), a estrutura para liquefação se dá a -160 °C, e é complexa e onerosa.

O sistema adsorvido (também denominado baixa pressão), armazena o metano à temperatura ambiente na forma adsorvida em carvão ativado. Adsorção é um fenômeno pelo qual moléculas de um gás são atraídas pela superfície de sólidos denominados adsorventes. Combinando-se a porosidade do adsorvente com o produto a ser adsorvido é possível armazenar de 3 a 10 vezes mais quantidade de gás a mesma pressão e volume do recipiente. Porém, é o sistema que armazena menos energia por unidade de volume, comprometendo a autonomia ou o espaço útil do veículo.

O sistema comprimido (também denominado alta pressão), armazena o metano a temperatura ambiente, e garante razoável autonomia. É o sistema mais empregado para o armazenamento de metano e também do gás natural. O armazenamento do gás no sistema comprimido é feito em cilindros de aço-carbono sem costura, Silva (1985).

²⁶ BRUDER, C. (1985). Uso de gás metano em motores de combustão interna. In: ENCONTRO SOBRE BIOGÁS AUTOMOTIVO 2. Jabcotical. Anais... EMBRATER/UNESP, p.85-88.

A escassez de recursos financeiros é a responsável pela ausência de investimento de recuperação energética de metano. Um outro problema é a estreita relação entre a recuperação do gás metano gerado em locais de disposição de resíduos sólidos pela degradação anaeróbia e os graves problemas sanitários que países em desenvolvimento apresentam.

Como bem coloca Alves (2000) em seu trabalho, empregar um combustível gerado a partir da digestão de resíduos, implica em obter-se recursos que contribuam para o custeio do saneamento. Além disso, seu uso evita o lançamento dos gases de efeito estufa à atmosfera e diminui o uso de combustíveis fósseis, que emitem CO₂ (que também contribui para o efeito estufa).

O desenvolvimento de tecnologias baseadas em consumo de recursos renováveis é fundamental. A substituição de combustíveis fósseis por uma fonte energia renovável, como é o caso do metano gerado durante a digestão anaeróbia de resíduos sólidos, solidifica-se quando buscamos um desenvolvimento sustentável

2.6 Protocolo de Quioto

A crescente conscientização ambiental dos povos tem levado os países a firmar acordos internacionais para redução de poluição ou preservação da fauna e flora em todo o planeta. Pode-se citar pelo 59 tratados internacionais firmados desde 1959 até 1994 (GESP 7, 1997)²⁷ apud Alves, 2000.

Para equacionar o problema do efeito estufa e suas conseqüências para o Homem, foi estabelecida em 1992, durante a Rio 92, ocorrida no Rio de Janeiro, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (United Nations Framework Convention on Climate Change) ou (UNFCCC). A Convenção do Clima

²⁷SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente (1993). *Tratados e organizações internacionais em matéria de meio ambiente, Série "Entendendo o meio ambiente"*. São Paulo, 2.ed. v.1, com alterações, Imprensa oficial do Estado, 1997.

entrou em vigor em 21 de março de 1994 e atualmente tem 186 “Partes” ou seja, países. Desde então, as Partes têm se reunido para discutir o assunto e tentar encontrar soluções para o problema, comentado por Rocha (2003).

Até a presente data, foram realizados nove encontros, denominados Conferência das Partes (COP). As últimas conferências ocorreram em: Quioto/1997, Buenos Aires/1998, Bonn/1999, Haia/2000, Marrakesh/2001, Nova Deli/2002, Milão/2003.

A Conferência das Partes realizada em Quioto, no Japão, em 1997 foi considerada uma das mais importantes. Neste encontro, foi estabelecido um acordo que define as metas de redução das emissões de gases de efeito estufa dos chamados países do Anexo I²⁸ que são basicamente os países industrializados. Este acordo, que ficou conhecido como Protocolo de Quioto, estabelece que os países do Anexo I devem reduzir suas emissões a 5,0% abaixo dos níveis observados em 1990 no período de compromisso entre os anos de 2008 a 2012.

Para que este protocolo entre em vigor, é necessário que pelo menos 55 países, que representam pelo menos 55% das emissões de gases de efeito estufa, o ratifiquem.

Atualmente, 102 países, representando 43% das emissões, já o ratificaram ou estão no processo de realizá-lo.

No Brasil, o Protocolo foi ratificado no dia 19 de junho de 2002 e sancionado pelo Presidente da República em 23 de julho do mesmo ano.

Durante a nona conferência das Partes (COP9) da Convenção do Clima, que ocorreu em Milão, Itália, entre os dias 1º a 12 de dezembro de 2003, foi esperada a adesão da Rússia, o que não ocorreu. Esta adesão permitiria o alcance de 55% do total das emissões geradas pelos Estados Partes da Convenção. Nesta convenção, os Estados Unidos decidiram não ratificar o Protocolo.

Existem vários interesses em jogo, os mais relevantes são: os interesses da indústria do petróleo, onde países da Organização dos Países Exportadores de Petróleo

²⁸

A lista de países membros do Anexo I encontra-se no Apêndice I.

(OPEP) passariam a ter uma grande responsabilidade na implementação do Protocolo; os interesses de países desenvolvidos, que deveriam reduzir suas emissões e tornar mais limpa sua matriz energética; e os interesses de países em desenvolvimento, que apresentam um crescimento baseado na maioria das vezes, no uso de combustíveis fósseis.

2.6.1 Protocolo de Quioto e o mercado de carbono

O Protocolo de Quioto estabelece alguns “mecanismos de flexibilização” que são: implementação conjunta (*joint implementation*), comércio de emissões (*emission trade*), e mecanismo de desenvolvimento limpo (*clean development mechanism*).

Segundo Rocha (2003), a partir dos mecanismos de flexibilização estabelecidos no Protocolo de Quioto, ficou claro que o mercado poderia auxiliar no processo de redução das emissões de gases de efeito estufa, através da proposta de criar um valor transacional de redução de emissões, semelhante aos mecanismos adotados pela Europa e Estados Unidos, para outros gases poluidores, como por exemplo, os CFC's.

Segue abaixo o que significam estes mecanismos de flexibilização:

◇ Implementação em conjunto (*joint implementation*)

Definido no artigo 6, onde os países do anexo I da UNFCC podem desenvolver projetos de mitigação em conjunto, gerando créditos que podem ser usados para o cumprimento do compromisso assumido. Implica, portanto, em constituição e transferência de créditos de emissões de gases de efeito estufa do país em que o projeto está sendo implementado para o país emissor. Este pode comprar “créditos de carbono”, e em troca, constituir fundo em outros países. Os recursos financeiros obtidos deverão ser aplicados na redução de emissões ou em remoção de carbono.

Artigo 6.1 do Protocolo de Quioto

Artigo 6.1- Afim de cumprir os compromissos assumidos sob o Artigo 3, qualquer Parte incluída no Anexo I pode transferir para ou adquirir de qualquer outra dessas Partes, unidades de redução de emissões resultantes de projetos, visando a redução das emissões antrópicas por fontes ou aumento das remoções antrópicas por sumidouros de gases de efeito estufa em qualquer setor da economia, desde que:

- a) o projeto tenha a aprovação das partes envolvidas;
- b) o projeto promova uma redução das emissões por fontes ou uma aumento das remoções por sumidouros que sejam adicionais aos que ocorreriam na sua ausência;
- c) a parte não adquira nenhuma unidade de redução de emissão se não estiver em conformidade com suas obrigações assumidas sob os artigos 5 e 7;
e
- d) a aquisição de unidades de redução de emissões seja suplementar às ações domésticas realizadas com o fim de cumprir os compromissos previstos no Artigo 3.

◇ Comércio de emissões (*emissions trade*)

É definido no artigo 17 do protocolo de Quioto. Cada país do Anexo I pode comercializar parte da redução de suas emissões que exceder as metas compromissadas.

Artigo 17 do Protocolo de Quioto

Artigo 17- A conferência das Partes deve definir os princípios, as modalidades, regras e diretrizes apropriadas, em particular para a verificação, elaboração de relatórios e prestação de contas do comércio de emissões. As partes incluídas no Anexo I podem participar do comércio de missões com o objetivo de cumprir os compromissos assumidos sob o artigo 3. Tal comércio deve ser suplementar às ações domésticas com vistas a atender os compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, assumidos sob esse Artigo.

Uma vez que existem diferentes custos de abatimento de gases de efeito estufa, passam a existir incentivos econômicos para que empresas comecem a oferecer este tipo de serviço, denominado comércio de emissões (*emissions trade*). Cria-se, portanto, um valor de mercado para o carbono. Este valor é estimado em US\$ 12t/C ou aproximadamente US\$ 4 por tonelada de CO₂^{*}, segundo Costa (1998). No total, estima-se que os recursos a serem negociados no mundo podem chegar a US\$ 3 bilhões por ano, segundo Goldemberg (1999).

◇ Mecanismo de desenvolvimento limpo (*clean development mechanism*)

Definido no artigo 12 do protocolo, onde países não-anexo I da UNFCCC desenvolvem projetos de mitigação, gerando créditos de redução de emissão (CER) que podem ser usados pelas partes do Anexo I da UNFCCC para cumprir seus compromissos e ajudar os países não-anexo I a alcançar o desenvolvimento sustentado.

Ou seja, a proposta do mecanismo de desenvolvimento limpo, consiste que em cada tonelada de CO₂ deixada de ser emitida ou retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento, poderá ser negociada no mercado mundial. As empresas que não conseguirem ou não desejarem reduzir suas emissões poderão comprar certificados de emissões reduzidas (CER) em países em desenvolvimento, que por sua vez usarão os recursos para promover seu desenvolvimento sustentável.

* Uma tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO₂, o que significa dizer que uma tonelada de CO₂ equivale a 0,27 toneladas de C.

Artigos 12.2 e 12.3 do Protocolo de Quioto

Artigo 12.2 - O objetivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo deve ser assistir às Partes não incluídas no Anexo I para que atinjam o desenvolvimento sustentável e contribuam para o objetivo final da Convenção, e assistir às Partes Incluídas no Anexo I para que cumpram seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, assumidos no Artigo 3.

Artigo 12.3 – Sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo:

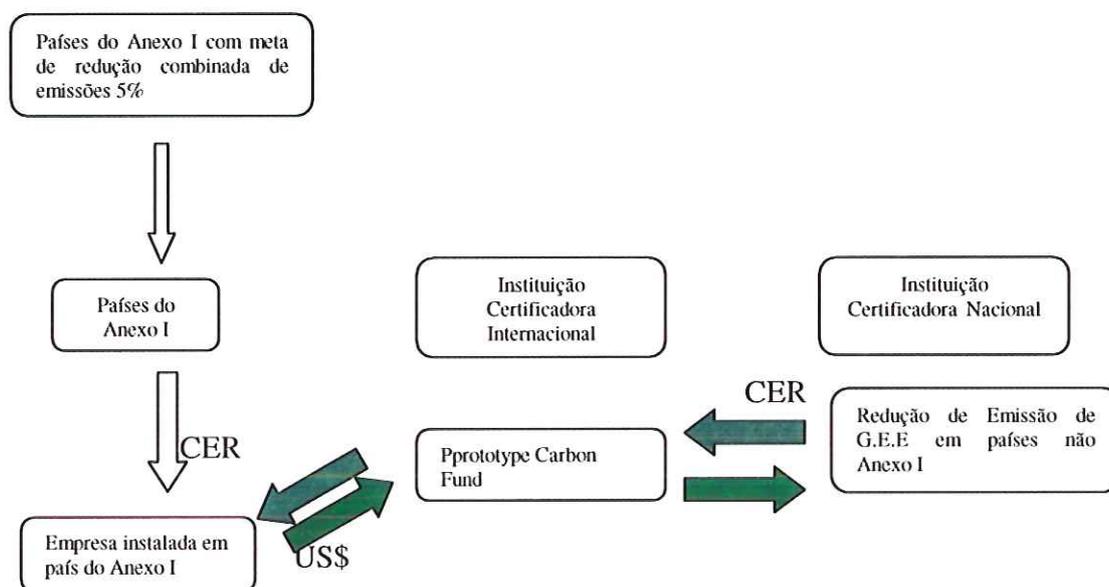
- (a) As Partes não incluídas no Anexo I beneficiar-se-ão de atividades de projetos que resultem em reduções certificadas de emissões; e
- (b) A Partes incluídas no Anexo I podem utilizar as reduções certificadas de emissões, resultantes de tais atividades de projetos, para contribuir com o cumprimento de parte de seus compromissos quantificados de limitação e redução emissões, assumidos no Artigo 3, como determinado pela Conferência das Partes na qualidade de reunião das Partes deste Protocolo.

O mecanismo de desenvolvimento limpo é dividido em três modalidades: fontes renováveis e energia alternativa**, eficiência/ conservação de energia, reflorestamento.

Cada país deverá ter sua Autoridade Nacional Designada para o mecanismo de desenvolvimento limpo, cuja função principal é aprovar ou não os projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no país hospedeiro. Ou seja, esta entidade deverá definir se os projetos estão cumprindo seu duplo papel: reduzir as emissões de gases de efeito estufa e/ou seqüestrar carbono e promover o desenvolvimento sustentável em países em desenvolvimento, Rocha (2003).

* * Nesta modalidade estão incluídos os projetos de uso de gás metano de aterro sanitário para fins energéticos.

Figura 14. Esquema do mercado de carbono:



Fonte: Adaptado de Rocha (2003).

2.6.2 O *Prototype Carbon Fund* do Banco Mundial

Em seu trabalho, Rocha (2003) escreve sobre a criação do *Prototype Carbon Fund* (PFC) pelo Banco Mundial, em julho de 1999. O autor comenta que o objetivo do PFC é auxiliar na mitigação das mudanças climáticas, promovendo o desenvolvimento sustentável e demonstrando possibilidades de relacionamento entre o setor privado e o público. Os projetos criados por este Fundo devem produzir reduções de emissão e/ou seqüestro de carbono que sejam aceitos dentro do Protocolo de Quioto.

Os recursos do *Prototype Carbon Fund* estão disponíveis tanto para o setor privado como para o setor público. Companhias e Governos que contribuíram para o Fundo irão usá-lo para incentivar projetos de implementação conjunta e mecanismo de desenvolvimento limpo. Os participantes irão receber uma parcela de emissões

reduzidas, verificadas e certificadas de acordo com contratos estabelecidos com países sede dos projetos.

Desde sua criação o *Prototype Carbon Fund*, aprovou vários projetos, entre eles estão alguns na área de resíduos sólidos:

- ◇ Letônia: manejo de resíduos sólidos, contrato de US\$ 2,5 milhões;
- ◇ Brasil: seqüestro de carbono e uso de biomassa para fins energéticos, contrato de US\$ 5,3 milhões;
- ◇ África do Sul: manejo de resíduos sólidos, contrato de US\$ 10,0 milhões;
- ◇ Índia: manejo de resíduos sólidos, contrato de US\$ 10,5 milhões;

3 METODOLOGIA

As amostras para a realização do estudo do presente trabalho, foram coletadas no aterro municipal de Piracicaba. Abaixo segue uma descrição do local.

3.1 Aterro municipal de Piracicaba “Pau Queimado”

O município de Piracicaba localiza-se no Estado de São Paulo, latitude sul 22°42'30 “e longitude 47°38'01”, a uma altitude de 554 metros. Ocupa uma área total de 1.372,8 Km², sendo que 186,18 Km² correspondem à área urbana, a qual abriga 96% dos 313.131 habitantes do município IBGE (2000).

Apresenta taxa de crescimento populacional de 1,68% ao ano, segundo IBGE (2000).

O município de Piracicaba, até o ano de 1996 dispunha seus resíduos em um lixão denominado de “Pau Queimado. Por determinação da CETESB, através do Ministério Público, foram realizadas várias modificações para que o local se transformasse em aterro controlado.

O aterro “Pau Queimado” está localizado no bairro rural de mesmo nome, com acesso pela estrada municipal Pedro Henrique.

O empreendimento está inserido na micro-bacia do Córrego Águas das Pedras, afluente do Ribeirão Marins, distando cerca de 15 quilômetros do centro da cidade. O aterro ocupa uma área total de 101.000 m², sendo que 87.000 m² (antigo lixão e aterro atual) são destinados à disposição de resíduos, Castro (2001).

De acordo com informações da Secretaria do Planejamento do Município, a área antiga do aterro recebeu resíduos de 1976 até 1998, e a área mais recente (aterro novo) recebe resíduos desde 1998 até os dias de hoje.

Na área restante ficam as atividades de apoio como guarita e balança. A área de entorno é ocupada pela atividade agrícola, como cana-de-açúcar e hortaliças.

No mesmo local, encontra-se a nascente do Córrego Águas das Pedras, o que torna a área vulnerável em relação à contaminação das águas.

Este aterro recebe diariamente, aproximadamente 220 toneladas de resíduos domiciliares, estando com sua vida útil esgotada. A disposição dos resíduos está sendo efetuada em área emergencial, aguardando a finalização das obras do novo aterro sanitário.

Segundo o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares, divulgado anualmente pela CETESB, no ano de 2002, o aterro controlado do município de Piracicaba ficou com o valor 7,0 de Índice de Qualidade do Aterro de Resíduos (IQR) o que o enquadra no *status* de condições controladas.

3.2 Levantamento da revisão bibliográfica referente ao uso de gás metano proveniente de aterros sanitários, para fins energéticos.

Para aquisição destes dados foram utilizados materiais do acervo da EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, assim como materiais obtidos de empréstimo de outras bibliotecas, tais como: CETESB, e outros campi da Universidade de São Paulo, tais como Piracicaba, São Paulo e Ribeirão Preto.

Os artigos referenciados são na maioria, de jornais e revistas eletrônicas catalogadas no acervo DEDALUS da USP.

3.3 Relacionamento das características físico-químicas dos líquidos percolados com o tempo de disposição dos resíduos no aterro sanitário.

Foram realizadas análises de: pH, nitrogênio amoniacal, nitrogênio, nitrato, sulfatos, sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, carbono orgânico total, óleos e graxas, demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio, zinco, chumbo, cádmio e níquel, ferro solúvel, cobre, manganês, cromo total e cromo hexavalente. As análises foram coletadas e executadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th edição.

Foram coletadas duas amostras no mês de dezembro de 2004.

3.4 Perfuração de pontos previamente definidos nos dois aterros sanitários (aterro novo e velho) para conhecimento do estágio de degradação do material facilmente degradável.

Foram realizadas três perfurações no aterro sanitário novo e no aterro sanitário velho, nas profundidades de 5, 10 e 15 metros.

Foram coletadas amostras de aproximadamente 20 Kg, em cada ponto, que foram acondicionadas em sacos e plásticos e mantidas sobre refrigeração até o momento da análise.

As profundidades foram selecionadas em função do tempo de disposição dos resíduos, assim como para seleção dos pontos de perfuração também foi utilizado o mesmo critério.(Figura 20).

As perfurações foram realizadas com a máquina CD 27 – CLOZIRONI (Trado Mecânico) como mostra a figura 15.

A máquina possui duas hastes telescópicas de 15,0 metros de altura o diâmetro da rosca é 0,25 metro.

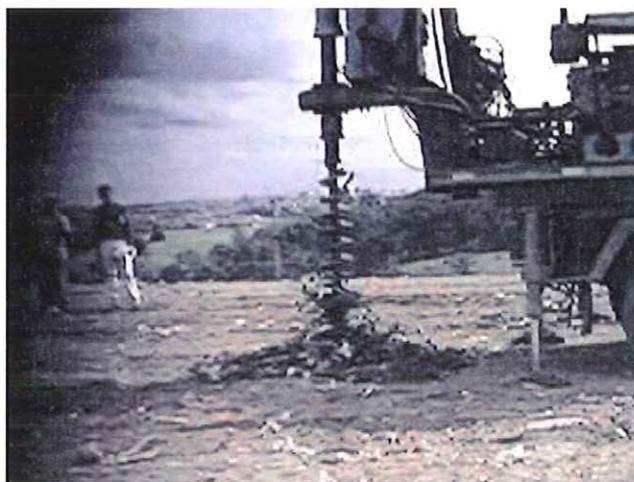


Figura 15 Perfuração realizada no dia 17 de dezembro de 2003 para coleta de amostras (aterro novo).



Figura 16 Perfuração realizada no dia 17 de dezembro de 2003 para coleta de amostras (aterro velho).



Figura 17 Perfuração realizada no dia 17 de dezembro de 2003 para coleta de amostras (aterro velho)

Os pontos definidos para perfuração estão indicados na figura 16. São três pontos no aterro velho e três pontos no aterro novo. Em cada ponto foram coletadas amostras a 5, 10 e 15 metros de profundidade.

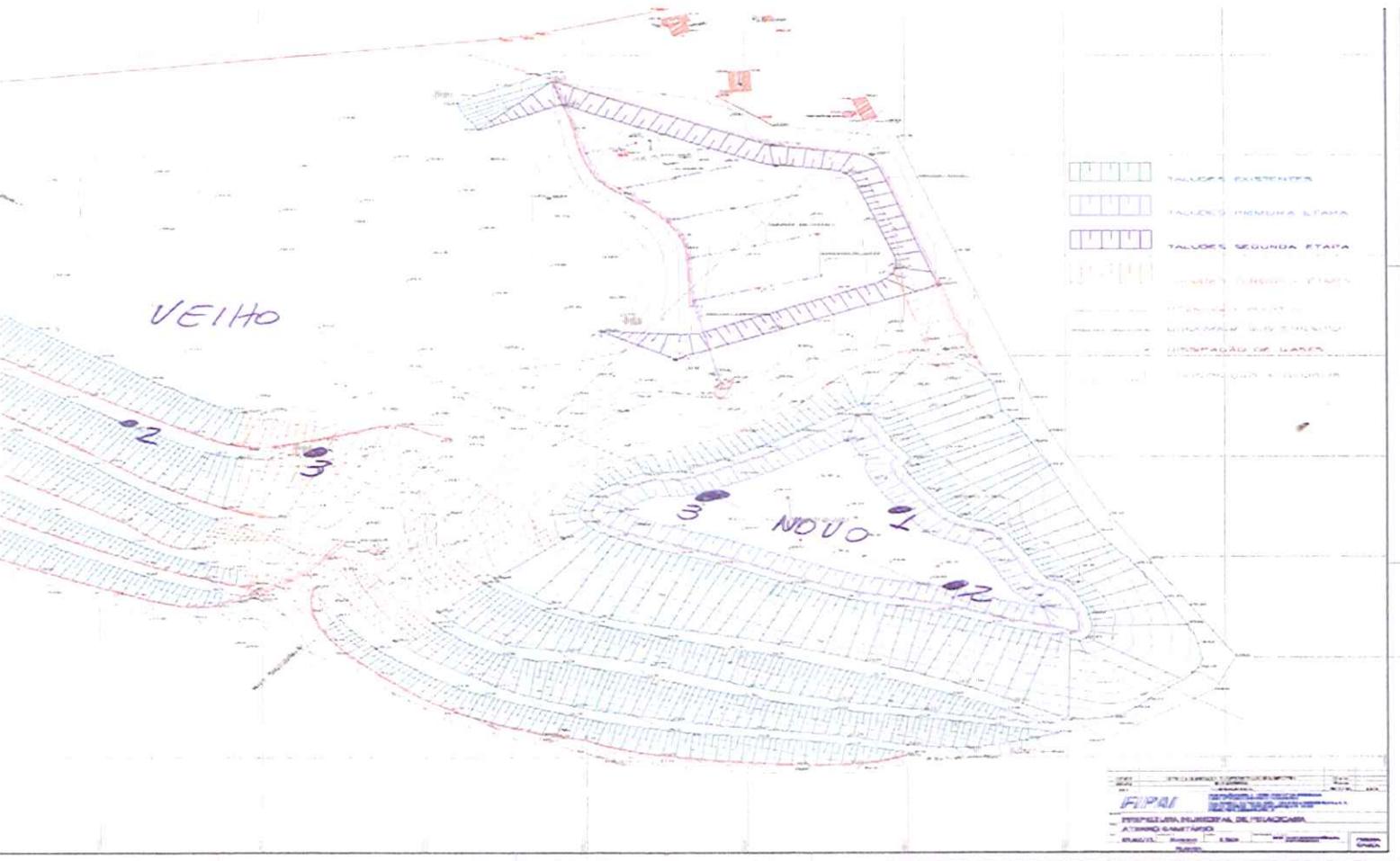


Figura 18 - Localização dos pontos de coleta de amostras sólidas - mapa do aterro sanitário "Pau Queimado"

Fonte: Secretaria de Defesa do Meio Ambiente de Piracicaba/SP (SEDEMA)

As medidas de profundidade foram aproximadas, no entanto tentou-se manter uma precisão bastante razoável. As amostras foram coletadas de uma só vez, no dia 17 dezembro de 2003.

O aterro velho possui resíduos aterrados desde 1976 até 1998 e o aterro novo desde 1998 até os dias de hoje (2004).

3.5 Análises laboratoriais

3.5.1. Análise de Demanda Química de Oxigênio (parte sólida – massa de resíduos)

A análise da porção sólida das amostras foi coletada dia 18 de dezembro de 2003 e em seguida encaminhada para o Laboratório do Departamento de Hidráulica e Saneamento, onde foram realizadas as análises de Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Para o preparo das amostras foi usada a metodologia desenvolvida por Gomes (1989), e para análise de DQO foi utilizado o método do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20ª edição.

Roteiro para preparar a amostra e em seguida executar a análise de DQO, Gomes, (1989):

- ◇ secar a amostra em estufa a 105° por 24 horas, aproximadamente 20 Kg;
- ◇ separar os inertes;
- ◇ macerar a massa seca (em almofariz), aproximadamente 500g;
- ◇ pesar 1g da amostra macerada;
- ◇ adicionar água destilada (5 mL) e acidificar com ácido sulfúrico (20mL),
- ◇ mexer com um bastão de vidro até que a reação diminua (esfrie),
- ◇ transferir a mistura para um balão volumétrico de 250 mL e completar o volume com água destilada,
- ◇ filtrar a amostras (usar papel de filtro),
- ◇ o líquido filtrado é a amostra líquida utilizada para análise,
- ◇ seguir a metodologia do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater para análise da DQO.

3.5.2 Análises dos parâmetros físico-químicos dos líquidos percolados

A análises dos parâmetros físico-químicos (parte líquida), foram realizadas no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Os ensaios realizados usaram como referência os métodos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (1998).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi colocado no presente trabalho com o intuito de se obter resultados preliminares através de uma única coleta de amostras, que poderão ser úteis para futuras aplicações das metodologias propostas, sem aprofundar no momento em sua discussão. Parâmetros analisados no chorume dos aterros novo e velho, como por exemplo, DQO, DBO, pH e sólidos totais encontram-se em faixas com variações semelhantes às observadas na literatura, como apresentado na tabela 12.

4.1 Análise do chorume, do aterro novo e do aterro velho

Tabela 12 - Resultados de análise de físico-química do chorume coletado no aterro municipal de Piracicaba – aterro “Pau Queimado”.

Parâmetros	Chorume (aterro novo)	Chorume (aterro velho)
pH	8,6	8,3
Nitrogênio amoniacal (mg N/L)	1.553,0	773,0
Nitrogênio Nitrato (mg N/L)	41,31	81,07
Sulfatos (mg SO ₄ ⁻² /L)	< 1	< 1
Sólidos totais (mg/L)	12.873,0	8.846,0
Sólidos totais fixos (mg/L)	9.195,0	6.293,0
Sólidos totais voláteis (mg/L)	3.678,0	2.353,0
Carbono orgânico total (mg C/L)	1.178,0	609,75
Óleos e graxas (mg/L)	29,0	25,0
Demanda química de oxigênio (mgO ₂ /L)	3.880,0	1.835,0
Demanda bioquímica de oxigênio (mgO ₂ /L)	2.912,0	682,0
Zinco (mgZn/L)	0,501	0,426
Chumbo (mgPb/L)	0,008	0,042
Cádmio (mg Cd/L)	< 0,002	<0,002
Níquel (mg Ni/L)	0,306	0,213
Ferro solúvel (mg Fe/L)	7,419	4,979
Manganês solúvel (mg Mn/L)	0,453	0,394
Cobre (mg Cu/L)	0,095	0,056
Cromo total (mg Cr/L)	0,633	0,324
Cromo hexavalente	<0,001	<0,001

Fonte: Laboratório de Saneamento -SHS- EESC -USP

Nota: Data de análise: 17 de dezembro de 2003

Os valores de DQO e DBO, encontrados nos líquidos percolados dos aterros novo e velho são bastante característicos, de acordo com várias literaturas pesquisadas, Chian e DeWalle (1976), Keenan et al. (1983), Baldochi (1990).

A relação DBO/DQO (0,37) encontrada no aterro velho, indica que o aterro está na fase metanogênica estável, segundo Smith (1993), portanto com potencial de geração de metano.

A concentração de metais, no caso do aterro velho encontra-se em geral, mais baixa, o que é esperado devido a degradação dos materiais com o passar dos anos. No caso específico deste aterro, ocorre a recirculação do chorume sobre a massa de resíduos, que como foi mencionado na revisão bibliográfica, pode acelerar o processo de biodegradação e conseqüentemente a geração de metano.

Comparando-se os valores de pH dos resultados obtidos das análises de chorume dos dois aterros sanitários (novo e velho), com os valores encontrados na literatura, nota-se que os parâmetros estão na mesma faixa, que poderia ser explicado pela recirculação do chorume sobre a massa do aterro.

De acordo com Speece (1996), o bom desenvolvimento das bactérias metanogênicas depende do pH, é importante que o sistema seja operado na faixa entre 6,5 a 8,5 para não haver inibição do crescimento destes microorganismos e conseqüentemente da produção de metano.

Castro (2001) avaliou resultados de pH do chorume neste aterro (Pau Queimado) de março de 1999 até outubro de 2000 e constatou que os resultados variaram muito pouco ao longo do tempo. Neste caso, os dois líquidos dos dois aterros foram analisados juntos.

4.2 Análise da biodegradabilidade da matéria orgânica

Tabela 13 - Resultados de Demanda Química de Oxigênio - aterro velho

	Profundidade		DQO	
	(m)	g DQO/Kg		%
		res. seco	res. degradáveis	
Furo 1	5	45,50	4,55	
	10	76,90	7,69	
	15	62,30	6,23	
Furo 2	5	55,58	5,56	
	10	85,88	8,60	
	15	60,63	6,07	
Furo 3	5	74,00	7,40	
	10	42,88	4,29	
	15	39,88	3,99	

As análises foram realizadas em duplicata, portanto os valores indicados na tabela são as médias das análises.

Tabela 14 - Resultados de Demanda Química de Oxigênio – aterro novo

	Profundidade		DOQ	
	(m)	g DQO/Kg		%
		res. seco	res. degradáveis	
Furo 1	5	162,40	16,24	
	10	69,50	6,95	
	15	60,50	6,05	
Furo 2	5	66,25	6,63	
	10	33,13	3,32	
	15	46,89	4,69	
Furo 3	5	46,63	4,67	
	10	37,63	3,77	
	15	97,88	9,79	

As análises foram realizadas em duplicata, portanto os valores indicados na tabela são as médias das análises.

As fotos a seguir mostram as amostras após serem coletadas sendo homogeneizadas e preparadas.



Figura 19 - Amostra coletada no aterro novo, sendo preparada para análise Coletada no primeiro furo a 10 metros de profundidade



Figura 20 - Amostra coletada no aterro velho sendo preparadas para análise, Coletada no terceiro furo a 15 metros de profundidade.

A análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) mede a quantidade de matéria orgânica existente nos resíduos em estudo. Segundo Gomes (1989), DQO indica

a degradação que ocorre na massa de resíduos ao longo do tempo. Inicialmente, há muita matéria a ser degradada que com o passar do tempo vai diminuindo. Desta forma, espera-se que os resíduos aterrados há menos tempo tenha a DQO mais alta.

Em função da heterogeneidade do material aterrado e pelo não conhecimento da variação de sua composição gravimétrica ao longo dos anos de aterramento, os resultados de porcentagem de DQO obtidos devem ser vistos como uma tentativa de direcionamento da fase de estabilização da matéria orgânica na qual o aterro se encontra naquele momento.

No entanto, o levantamento destes resultados e conseqüente correlação com as fases de digestão anaeróbia, não foi bem sucedido, em função do número de análises realizadas, e em função da época da coleta, que foi de bastante chuva. Esta metodologia de perfuração foi usada como apoio relacionar as fases de digestão anaeróbia com a taxa de geração de metano.

O Fato dos resultados não se mostrarem conclusivos no trabalho em questão, não significa que a metodologia não seja válida, e sim que é preciso, fazer mais perfurações, coletar mais amostras em mais pontos e fazer mais análises. O que não foi possível devido às restrições de tempo e custo.

Portanto, pelos resultados levantados, observa-se uma média de degradação elevada tanto para o aterro novo quanto para o aterro velho.

Para o aterro novo, o que aparentemente é que a fase de produção de gases no caso do aterro sanitário "Pau Queimado" encontra-se elevada nos primeiros anos de aterramento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Várias alternativas de uso de gás de aterro sanitário para fins energéticos foram apresentadas, entre elas pode-se destacar o uso em veículos, em residências, na geração de energia para aquecimento de estufas e até mesmo o dióxido de carbono também liberado junto com o metano, pode ser usado como suplemento para o crescimento de plantas cultivadas em estufas.

Através dos resultados das análises de DQO e DBO obtidas nos líquidos percolados, dos resíduos depositados entre 1976 e 1998 (aterro velho) conclui-se que os valores estejam na faixa metonogênica estável, portanto, com potencial para produção de metano para usos energéticos.

Para uma análise mais detalhada recomenda-se um estudo mais profundo dos resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários de diferentes idades, através de sua caracterização física, além da viabilidade de realizar perfurações em maior número de pontos, com o uso da metodologia descrita no presente trabalho.

Recomenda-se para trabalhos futuros, a realização de medidas da produção de metano em conjunto com os parâmetros analisados no presente estudo, com o intuito de obter recomendações que possam ser utilizadas com mais eficácia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21 (2003). Proteção da atmosfera e qualidade do ar, Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: www.ambiente.sp.gov.br/agenda21/ag21sprev/05.pdf. Acesso em: 25 jun.

ALVALÁ, P. C.; KIRHHOFF, W. J. H.; PAVÃO, H. G. (1999). Metano na atmosfera. *Revista biotecnologia*, São Paulo, n.7, p.40-43.

ALVES, J.W.S. (2000). *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. 151p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

ANONIALLI, A. (2002). *Recuperação do lixão do Pau Queimado do município de Piracicaba, SP*. 109p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação*. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 10007: Amostragem de resíduos - procedimentos*. São Paulo.

BADRA, R. J. (1993). *Isolamento e caracterização de bactérias metanogênicas de um aterro sanitário experimental*. 175p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1993.

BALDOCHI, V. M. Z. (1990). *Comportamento de ácidos voláteis no processo de estabilização anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário*. 172p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1990.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI J. (1999). *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. São Carlos: EESC/USP.

BRANCO, S. (1997). *O meio ambiente em debate*. 26ª edição. São Paulo: Moderna.

BROCK, T.D. ; MADIGAN, M.T. (1988). *Biologia of microorganisms*. New Jersey,: Prentice Hall.

CASTRO, M. C. A. A.(2001). Avaliação de um sistema australiano de lagoas no tratamento conjunto de esgoto sanitário e líquidos percolados gerados em aterro sanitário. 247 p. Tese (Doutorado). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1987). *Aterro sanitário: apostilas ambientais*. São Paulo.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2003). *Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares*. São Paulo.

CHERNICHARO, C.A.L; AROEIRA, R. M. (1994). Metodologia para avaliação de alcalinidade em processos anaeróbios. *Revista BIO*, São Paulo, v.12, n.2, p.31-36.

CHERNICHARO, C. A. L. (1997). *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Minas Gerais: Segrac. p. 23-33.

CLARETO, C. R. (1996). *Tratamento de líquidos percolados gerados em aterros sanitários utilizando reator anaeróbio compartimentado*. 78 p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1996.

COMPANHIA DE GÁS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (1.985). *Aproveitamento de biogás nos aterros sanitários do município de São Paulo: experiências da COMGÁS e perspectivas de utilização*. São Paulo.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. (1986) *Resolução n° 001*. Brasília.

COSTA, P. M. (1998). Breve história da evolução dos mercados de carbono. *Revista Silvicultura*, São Paulo, n.76.

DEMPSEY, C. R.; OPPELT, E. T. (1996). *Incineração de resíduos perigosos: uma visão crítica e atualizada*. Tradução de Milton Norio Sogabe. São Paulo: CETESB.

EL - FADEL, M.; MASSOUD, M. (2001). Methane emissions from wastewater management. *Enviromental Pollution*, n.114, p.177-185.

FILHO, A.J.B.A.; BELO, R. F. [ca.1984]. *Avaliação de alternativas energéticas: o gás metano - biogás- como substituto dos combustíveis convencionais na agricultura*. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, Brasmetano Tecnologias Integradas. Piracicaba.

FUSCALDO, W.C. (2001). *Resíduos sólidos: práticas e conceitos: um estudo a partir da experiência de Londrina, PR*. 204 p. Dissertação (mestrado). – Curso de Pós Graduação em Geografia Humana da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências., Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

GOLDEMBERG, J. (1998). *Energia, Meio ambiente e Desenvolvimento*. São Paulo: Edusp.

GOMES, L. P. (1989). *Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários*. 159p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1989.

GOMES, L. P. (1995). *Avaliação da atividade bacteriana anaeróbia celulolítica do chorume originado em sistemas de disposição de resíduos sólidos urbanos à céu aberto* 210p. Tese (Doutorado). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1995.

GORE, A. (1993). *A Terra em balanço*. Tradução de Elenice Mazzili. São Paulo. Cap.8, p.162-182.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2000). *Censo: 2000*. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 3 ago.2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2002) *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 1 jul.2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1995). Technical summary of the working group I. *The science of climate change*. Madrid.



INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1996). *Guidelines for national greenhouse inventories*. França.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001). Technical summary of the working group II. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Geneva.

JAFFRIN, A. ; BENTOUNES, N.; JOAN, A. M. (2003). Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth. *Biosystems Engineering*, França. Disponível em: < www.sciencedirect.com >. Acesso em: 20 mar. 2003.

JARDIM, N.S (Org.) (1995). *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*. 1ª ed. São Paulo: IPT; CEMPRE.

LEITE, W.C.A. (1997). Estudo da gestão de resíduos sólidos: uma proposta de modelo tomando a unidade de gerenciamento de recursos hídricos como referência. 270p. Tese (Doutorado). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1997.

LIMA, L. M. (1988). *Estudo da influência da reciclagem de chorume na aceleração da metanogênese em aterro sanitário*. 433p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1988.

LUTZENBERGER, J. (1992). *Do jardim ao poder*. Porto Alegre. p.51-60.

MALINA, J.F.B. (1992). Design of biological wastewater treatment systems. In: SEMINÁRIOS DE TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA – TRATAMENTO DE ESGOTOS, 1992, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES. p.165-171.

METCALF, L. ; EDDY, H. P.(1991). *Wastewater Engineering: treatment disposal reuse*. 3. ed. New York: McGraw-Hill.

MOTA, S. (1987). *Introdução à engenharia ambiental*. Rio de Janeiro: ABES.

NASCIMENTO, R. A. (1996). *Desempenho de reator anaeróbio de manta de lodo, utilizando efluentes líquidos de indústria alimentícia*. 114p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1996.

NILSSON, K. (1992). Tendencias Mundialis de la incineration de resíduos sólidos. In: CONGRESO Y EXPOSICION INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 6, 1992, Madrid, Libro de conferencias 1, Ategrus, p.1-10.

ODUM, E.P. (1983). *Basic Ecology*. New York: US College .p. 200.

O ESTADO DE SÃO PAULO (2004). Energia a partir do lixo. *O Estado de São Paulo*, São Paulo, 25 jan. Notas e Informações, p.3.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (2001). Oficina regional para Europa. Division Bilthoven. *Métodos de evaluación de riesgos para la salud generados por la exposicion a substancias peligrosas liberadas por relleos sanitários*. Disponível em: <w.w.w.cepis.org.pe/bvsea/e/fulltext/metodos/metodos/pdf>. Acesso em: 12 mar 2003.

PELCZAR, M.; REID, R.; CHAN, E.C.S. (1980). *Microbiologia*. São Paulo: McGraw-Hill,.

PINTO, D. M.C. L. (2000). *Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado*. 175 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.

POVINELLI, J. (1987). *Ação dos metais pesados nos processos biológicos de tratamento de águas residuárias*. 83 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1991.

PROTOCOLO DE QUIOTO (1998). Convenção sobre mudanças climáticas. Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasil.

QIN, W.; EGOLFOPOULOS, F. N.; TSOTSIS, T. T. (2001) Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation. *Chemical Engineering Journal*, 82 (2001), p.157-172.

RICKLEFS, R. E. (2001). *A economia da natureza*. Tradução de Cecília Bueno. 5.ed Missouri: Guanabara Koogan.

ROCHA, A. A. (1989). Incinerador e caracterização biológica. *Revista DAE*, São Paulo, v.32, n.154, jan.

ROCHA, M. T. (2003). *Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT*. 188p. Tese (Doutorado). – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

RODRIGUES, A. M. (1998). *Produção e consumo do e no espaço: problemática ambiental urbana*. São Paulo: Hucitec.

SCHALCH, V. (1984). *Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano*. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1984.

SCHALCH, V. (1992). *Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia*. 219p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1992.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C.; FERNANDES, J. L.; CASTRO, M. C. A. A. (2000). *Gerenciamento de resíduos sólidos*. Apostila de sala de aula, EESC, USP. São Carlos. 2000.

SILVA, F. M. (1995). *Sistema de alimentação de motores com duplo combustível: metano e diesel*. 121p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1995.

SILVA, F.A.N. (2001). *Avaliação ambiental preliminar de antigas áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos do município de São Paulo*. 104p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SOUBES, M. (1994). *Microbiologia de la digestión anaeróbia*. In TALLER Y SEMINARIO LATINO AMERICANO DETRATAMENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUARIAS, 3 , Montevideo. 1994 .

SPEECE, R. E. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*.Tennessee: Achae Press.

STANDARD METHODS for the examination of water and wastewater. (1999). 20th ed. CD - ROM.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*.E.U.A.: McGraw-Hill.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1996). *A guideline for methane mitigation projects- Gas to energy at landfills and open dumps*. Editors: Mark Orlic and Tom Kerr.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (2002). *Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. 3.ed. São Carlos.

WINTERINGHAN, F.P.W. (1991). *Energy use and environment*. California.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (2002). *Corporate Guide to Green Power Markets. Opportunities with landfill gas*. Washington. Disponível em: <http://pdf.wri.org/gpmdg_corporate_guide_02.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2003.

ZEHNDER, A. J. B.; INGVORSEN, K.; MARTI, T. (1982). Microbiology of methane bacteria. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION, 2, 1982, Amsterdam. Proceedings...Biomedical Press p. 45-65.

APÊNDICE 1 – Lista de países membros do Anexo I, segundo Protocolo de Quioto.

Alemanha
Austrália
Belarus
Bélgica
Bulgária
Canadá
Dinamarca
Eslováquia
Eslovênia
Espanha
Estados Unidos da América
Estônia
Federação Russa
Finlândia
França
Grécia
Hungria
Irlanda
Islândia
Itália
Japão
Letônia
Liechtenstein
Lituânia
Luxemburgo
Mônaco
Noruega
Nova Zelândia
Países Baixos
Polônia
Portugal
Reino Unido da Grã –Bretanha e Irlanda do Norte
República Tcheca
Romênia
Suécia
Suíça
Turquia
Ucrânia

Fonte: Protocolo de Quioto (1997)